



**Politecnico
di Torino**

Sviluppo e Progettazione di materiali multifunzionali con caratteristiche Self-Sensing, mediante tecniche di stampa 3D

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

Relatore:
Prof. Enrico Zappino

Autore:
Luca Mini 317501

Dicembre 2024

Indice

| | | |
|----------|---------------------------------------------------|-----------|
| 1 | Abstract | 6 |
| 2 | Materiali Multifunzionali | 7 |
| 2.1 | Introduzione Materiali Multifunzionali | 7 |
| 2.1.1 | Materiali compositi | 8 |
| 2.1.2 | Metamateriali | 9 |
| 2.1.3 | Smart Materials | 10 |
| 2.2 | Materiali Self-Sensing | 11 |
| 2.3 | Meccanismi di Self-Sensing | 11 |
| 2.3.1 | Piezoresistività | 11 |
| 2.3.2 | Capacità | 13 |
| 2.3.3 | Induttanza | 14 |
| 2.4 | Teoria della Percolazione | 14 |
| 3 | Stampa 3D | 16 |
| 3.1 | Introduzione | 16 |
| 3.2 | Metodi di Stampa | 16 |
| 3.3 | Stampa 3D & Self-Sensing | 18 |
| 3.3.1 | Esempi da letteratura: Sensori | 19 |
| 3.4 | Stampanti Utilizzate | 22 |
| 3.4.1 | Markforged MARK 2 | 22 |
| 3.4.2 | Bambu Lab A1 Mini | 23 |
| 3.5 | Caratterizzazione Materiale Conduttivo | 23 |
| 3.5.1 | Prove sul filamento | 24 |
| 3.5.2 | Prove sul Materiale Stampato | 26 |
| 3.5.3 | Prove di tipo capacitivo | 28 |
| 4 | Sensori | 36 |
| 4.1 | Sensore Resistivo con Fibra di Carbonio | 36 |
| 4.2 | Sensori Con Materiale Conduttivo | 37 |
| 4.2.1 | Sensore Capacitivo di Flessione | 38 |
| 4.2.2 | Sensore Capacitivo di Posizione | 45 |
| 4.2.3 | Sensore "Touch-Screen" | 49 |
| 4.2.4 | Sensore Forza | 58 |
| 5 | Conclusioni | 67 |
| 5.1 | Materiale Conduttivo | 67 |
| 5.2 | Sensori | 67 |
| 5.2.1 | Sensore Flessione | 67 |
| 5.2.2 | Sensore Posizione | 67 |
| 5.2.3 | Sensore Touch | 68 |
| 5.2.4 | Sensore Forza | 68 |
| A | Programma Arduino | 71 |

Elenco delle figure

| | | |
|------|---------------------------------------------------------|----|
| 2.1 | Materiali multifunzionali [2] | 8 |
| 2.2 | Metamateriali [14] | 10 |
| 2.3 | Sensore incluso negli strati del composito [2] | 11 |
| 2.4 | Condensatori [5] | 13 |
| 3.1 | Stampa 3D [3] | 16 |
| 3.2 | SLA | 17 |
| 3.3 | SLS [12] | 17 |
| 3.4 | FDM [12] | 17 |
| 3.5 | Mat. Jetting [12] | 18 |
| 3.6 | EBM [12] | 18 |
| 3.7 | Esempi di sensori di deformazione [16] | 20 |
| 3.8 | Stampante MarkForge MK2 | 22 |
| 3.9 | Stampante Bambulab A1 Mini con accessorio AMS | 23 |
| 3.10 | Segmenti Filamento | 24 |
| 3.11 | Grafico Resistività Filamento | 25 |
| 3.12 | Barre Stampate | 26 |
| 3.13 | Grafico Resistività Filamento Stampato | 27 |
| 3.14 | Scanalatura | 28 |
| 3.15 | Piastra | 28 |
| 3.16 | Costante Temporale, [21] | 29 |
| 3.17 | Circuito per Capacità | 29 |
| 3.18 | CAD Condensatore | 30 |
| 3.19 | Provino per studio capacitivo lungo asse x. | 32 |
| 3.20 | Prototipo realizzato per studio capacitivo lungo asse x | 33 |
| 3.21 | Provino per studio capacitivo lungo asse y. | 33 |
| 3.22 | Prototipo realizzato per studio capacitivo lungo asse y | 34 |
| 3.23 | Provino per studio capacitivo lungo asse z. | 34 |
| 3.24 | Prototipo realizzato per studio capacitivo lungo asse z | 35 |
| 4.1 | Desing Sensore 1 | 36 |
| 4.2 | CAD del Sensore di flessione | 38 |
| 4.3 | Sensore di flessione | 38 |
| 4.4 | Sensore di flessione modificato | 39 |
| 4.5 | Setup prova di Flessione | 39 |
| 4.6 | Prova Flessione | 40 |
| 4.7 | Ciclo di spostamento prova di flessione | 40 |
| 4.8 | Sensore Flessione Basso | 41 |
| 4.9 | Dati Sensore Flessione Basso | 41 |
| 4.10 | Sensore Flessione Medio | 42 |
| 4.11 | Dati Sensore Flessione Medio provino 1 | 42 |
| 4.12 | Dati Sensore Flessione Medio provino 2 | 43 |
| 4.13 | Sensore Flessione Alto | 44 |

| | | |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.14 | Dati Sensore Flessione Alto | 44 |
| 4.15 | Dimensioni Sensore Posizione | 45 |
| 4.16 | CAD del Sensore di Posizione | 45 |
| 4.17 | Vista supplementare del design | 46 |
| 4.18 | Sensore di Posizione | 46 |
| 4.19 | Setup Prova di Posizione | 47 |
| 4.20 | Dati Sensore di Posizione | 48 |
| 4.21 | CAD del Sensore Touch (sopra), visualizzazione della disposizione delle armature interne (sotto) | 49 |
| 4.22 | Sensore Touch | 50 |
| 4.23 | Sensore Touch seconda Iterazione | 51 |
| 4.24 | Sensore Touch V2 | 52 |
| 4.25 | Sensore Touch con Assi Evidenziati | 52 |
| 4.26 | Sensore Touch | 53 |
| 4.27 | Flowchart programma Arduino | 54 |
| 4.28 | Rappresentazione virtuale della piastra toccata (posizione C3) | 55 |
| 4.29 | Dati raccolti durante la prova relativi ai diversi canali/armature | 56 |
| 4.30 | Design finale per il Sensore Touch | 57 |
| 4.31 | Collegamento piastra con Arduino | 58 |
| 4.32 | Design Sensore di Forza | 59 |
| 4.33 | Grafico dei dati relativi a spostamenti e capacità calcolate per l'analisi FEM e i risultati sperimentali | 60 |
| 4.34 | Visualizzazione Deformazione Prova FEM | 61 |
| 4.35 | Rappresentazione della stratificazione prodotta dallo slicer | 62 |
| 4.36 | Setup Prova del Sensore di Forza | 62 |
| 4.37 | Prova Sensore di Forza | 63 |
| 4.38 | Deformazione Sensore di Forza | 63 |
| 4.39 | Grafico Forza / Spostamento misurata durante la prova | 64 |
| 4.40 | Capacità misurata durante la prova | 65 |
| 4.41 | Sensore di Forza | 66 |
| 5.1 | Provini per la Caratterizzazione del materiale conduttivo | 69 |
| 5.2 | Sensori realizzati | 69 |

Abstract

L'utilizzo di materiali che permettono di donare funzionalità aggiuntive alle strutture e/o componenti realizzati, è una procedura sempre più diffusa in molteplici settori ingegneristici.

I cosiddetti materiali multifunzionali sono al centro degli studi che rendono possibile questa pratica.

L'utilizzo di proprietà intrinseche di uno o più materiali o della struttura interna in cui essi possono essere costituiti offre ampio margine di lavoro per lo studio e l'implementazione delle proprietà e funzionalità che oggi vengono richieste agli ingegneri di integrare all'interno dei loro progetti.

Questo documento si pone l'obiettivo di approfondire leggermente gli studi su una parte di questo campo di ricerca, ovvero il comportamento e la fattibilità di una serie di componenti in multi-materiale prodotti con tecniche additive.

Il concetto alla base è quello dei materiali multifunzionali, con un focus su quelli che permettono di fornire proprietà di self-sensing ai particolari realizzati.

Dopo una breve esposizione dei concetti teorici alla base, delle tecniche utilizzate e delle caratteristiche dei materiali considerati, si procede con una fase di caratterizzazione dei materiali impiegati.

Successivamente vengono esposte alcune prove di sensori e strutture realizzate ed i relativi test condotti.

Gli studi riportati in questo documento servono per esplorare la possibilità di utilizzare la stampa 3D, in comunione con alcuni materiali, per creare diversi componenti in grado di fornire un'opzione pratica per implementare il sensing.

Tale aspetto è di notevole interesse in ambito spaziale e non solo.

La possibilità di produrre sensori, o altri particolari, nello spazio fornirebbe una grande opportunità per incrementare lo sviluppo tecnologico, ridurre costi e tempi di manutenzione, velocizzare riparazioni e miglioramenti in loco.

La sfida risulta rendere possibile tutto ciò utilizzando tecniche e materiali accessibili.

Nello spazio, infatti, non si possono reperire stampanti 3D molto complesse o di recente ideazione; anche i materiali disponibili e/o utilizzabili risultano essere limitati.

Queste sfide offrono l'opportunità di esplorare e sviluppare nuovi approcci e metodi di produzione.

Le prove e i risultati ottenuti nell'esperienza riportata in questo documento servono a fornire un punto di partenza per realizzare questo obiettivo.

Materiali Multifunzionali

2.1 Introduzione Materiali Multifunzionali

I materiali multifunzionali sono materiali in grado di adempiere ad una o più sotto-funzioni, sfruttando determinate proprietà e/o comportamenti del materiale stesso, senza l'introduzione di elementi esterni.

Generalmente si tratta di materiali che costituiscono componenti strutturali di varia natura, in cui viene inserita, in fase di progetto o successivamente, la capacità di svolgere una funzione secondaria a quella principale per cui il componente era stato progettato (esempio: auto-monitoraggio strutturale per elementi strutturali di un edificio). Lo studio di questo campo ha permesso, negli ultimi anni, di sviluppare nuovi materiali, tecniche e processi produttivi in grado di rivoluzionare il design e la progettazione in diversi settori ingegneristici.

Le diverse sotto-funzioni che i materiali multifunzionali possono adempiere coprono un vasto range, ed offrono quindi ampia libertà di utilizzo e sviluppo per molteplici applicazioni.

Si riportano alcune principali sotto-funzioni già implementate o comunque già largamente studiate:

- Sensing: La capacità di un componente di "sentire" differenti stimoli esterni (oggetto di questo documento). Si possono rilevare e misurare svariate grandezze, tra cui: forze, spostamenti, variazioni di temperatura e molto altro. È sufficiente variare i materiali e/o la loro configurazione all'interno della struttura principale per scegliere come e cosa misurare. Questa funzionalità risulta sempre più fondamentale in ogni campo della moderna ingegneria.
- Attuazione: È, in un certo senso, l'opposto del Sensing in quanto si fornisce ad un componente uno stimolo ed esso si muove o svolge altre azioni in relazione allo stimolo ricevuto, sfruttando le proprietà del materiale di cui è composto.
- Auto riparazione: La capacità di riparare se stessi, nel campo dei materiali, offre molteplici opportunità. Infatti, si può prolungare la vita operativa di innumerevoli componenti in molteplici campi industriali e non solo, si possono ridurre i costi ed incrementare l'affidabilità.
- Generazione/stoccaggio di energia: Generalmente si lavora con energia elettrica che viene prodotta con fonti esterne al componente (solare, termica, meccanica ...). I materiali con questa capacità sono in grado di immagazzinare energia al loro interno ed alimentare alcuni dispositivi. Così facendo, questi materiali offrono una nuova possibile soluzione di alimentazione o stoccaggio energetico, anche se le energie gestite risultano ancora relativamente piccole.

Quando si parla di materiali multi-funzionali risulta essere molto interessante, oltre al Self-Sensing, anche il campo dell'immagazzinamento energetico.

Grazie all'impiego della stampa 3D, si punta alla realizzazione di elementi in grado di immagazzinare piccole quantità di energia. Dispositivi simili a condensatori possono essere ricreati all'interno di un elemento per contenere piccole quantità di energia.

In questa direzione vengono studiati principalmente condensatori realizzati utilizzando inchiostri conduttivi, di diversa natura, disposti su di un substrato della forma voluta precedentemente stampato [24].

La possibilità di realizzare le armature della forma voluta ed inoltre poter sovrapporre diversi strati, offre una libertà relativamente ampia nella produzione di questi dispositivi.

Tornando ad un punto di vista più generale sui materiali multifunzionali, la natura è, come sempre, fonte principale d'ispirazione nel campo; offre molteplici come legno ed ossa [1].

Si possono identificare diversi tipi di materiali multifunzionali e quindi operare una prima suddivisione: materiali compositi, metamateriali, materiali self-sensing e smart-materials.

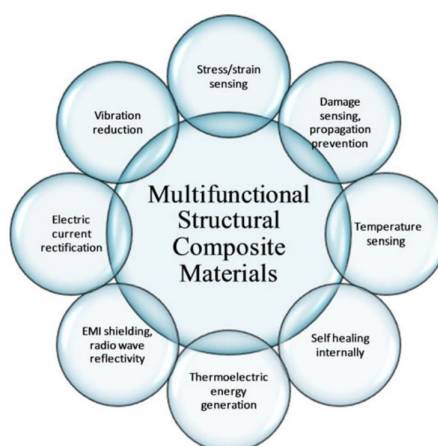


Figura 2.1: Materiali multifunzionali [2]

Questa tipologia di materiali comporta nuove sfide nel campo della progettazione computazionale, in quanto non vi sono ancora modelli affidabili che simulino il comportamento di questi materiali. Per questo motivo il loro utilizzo non ha ancora raggiunto il pieno potenziale.

2.1.1 Materiali compositi

I materiali compositi sono, come suggerisce il nome, materiali composti da due o più componenti. Generalmente si ha una matrice, la quale può essere di natura polimerica, metallica o ceramica, unita ad un rinforzo. Più comuni, come forma di rinforzo, sono le fibre di carbonio, ma si hanno molteplici altre fibre che variano per natura e prestazioni o possibili applicazioni; inoltre si possono utilizzare diversi tipi di particelle (metalliche e non).

Questa tipologia di materiali cerca di unire le proprietà dei due diversi componenti in

modo tale da creare una comunione delle proprietà. Ad esempio si può parlare della fibra di carbonio, che presenta un'alta rigidità e resistenza a trazione, ma di contro, è estremamente fragile; quindi si procede ad immergerla all'interno di una matrice di resina epossidica, bassa resistenza a trazione ma molto flessibile. Si realizza così un materiale che abbina le proprietà migliori dei suoi costituenti, ovvero un'alta flessibilità ed elevata resistenza.

Altri materiali compositi potrebbero presentare, oltre che caratteristiche meccaniche migliorate, anche altre proprietà sfruttabili per applicazioni diverse.

2.1.2 Metamateriali

I Metamateriali sono una classe di materiali la cui micro/nano architettura viene progettata con un certo livello di complessità, in modo tale da ottenere determinate proprietà meccaniche [14].

Ciò significa che le proprietà del materiale sono dettate principalmente dalla sua geometria, invece che dalla sua composizione chimica.

Le caratteristiche distintive includono la capacità di essere estremamente rigidi in alcune modalità di deformazione ed estremamente flessibili in altre. Tale capacità deriva dagli autovalori del tensore degli sforzi del materiale. Un autovalore piccolo indica che il materiale è più cedevole nella direzione associata all'autovalore [14].

Questa tipologia di materiali, in combinazione con le tecniche di stampa 3D, permette di realizzare materiali con proprietà meccaniche progettate appositamente per le applicazioni finali del componente.

Studiando questo tipo di materiali si osserva come sia possibile variare, appunto, alcune caratteristiche meccaniche, tra cui il coefficiente di Poisson ν .

Per materiali isotropi si considera la seguente relazione:

$$\frac{B}{G} = \frac{\nu + 1}{3(\frac{1}{2} - \nu)} \quad (2.1)$$

B è il modulo di compressibilità e G è il modulo di taglio, entrambi sono assunti positivi per far in modo che il tensore elastico sia anch'esso positivo. Si deduce che per avere B e G positivi il coefficiente di Poisson deve essere compreso tra $-1 < \nu < 0.5$ [14].

Il caso con $\nu = 0.5$ non è di particolare interesse poiché molti materiali possiedono tale coefficiente, mentre un $\nu = -1$ implica un materiale con modulo di taglio di molto maggiore rispetto a quello di compressibilità. Tali materiali (dilatational materials), se sottoposti a sollecitazione, non variano la propria forma ma solo il volume.

Questi materiali sono solo una parte dei materiali con ν negativo, più generalmente si è interessati a tali materiali poiché sono in grado di espandersi se sottoposti a sollecitazione, invece di restringersi.

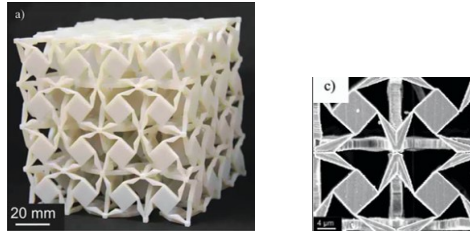


Figura 2.2: Metamateriali [14]

2.1.3 Smart Materials

Lo studio dei materiali ha permesso, nell'arco degli anni, di approfondire le conoscenze e i processi produttivi dei materiali. Da materiali per fini strettamente strutturali si è passati a materiali specificatamente progettati per una funzione, arrivando in fine ai cosiddetti "materiali intelligenti" [9].

Per Smart Materials (materiali intelligenti) si intendo sistemi composti da sensori ed attuatori direttamente incorporati all'interno del materiale o di una struttura (Smart Structures). Ciò permette di ottenere, ad esempio, una struttura in grado non solo di monitorare una sollecitazione, ma anche di attuare dell'azioni in risposta [9].

Quindi si possono implementare, grazie agli Smart Materials delle risposte in funzione degli stimoli esterni, le quali agiscono in completa autonomia senza l'ausilio di un controllo esterno.

Gli Smart Materials si possono distinguere in diverse categorie, in base al processo misurazione e risposta agli stimoli [9]:

- Piezoelettrici
- Elettrostrittivi
- Magnetostrittivi
- Leghe a memoria di forma
- Fibre ottiche
- Materiali con funzioni aggiuntive

Le Smart Structures sono una diretta conseguenza dell'impiego dei materiali intelligenti. Esse sono composte generalmente da 5 componenti [9]:

- Acquisizione dati: sensori
- Trasmissione dati
- Unità di controllo: in funzione degli stimoli elabora una risposta adeguata alla funzione che deve svolgere il materiale
- Trasmissione istruzioni
- Attuatore

2.2 Materiali Self-Sensing

Il Self-Sensing, ovvero la capacità di acquisire una misurazione di una grandezza da parte della struttura o del componente stesso; è una delle sotto-funzioni che più si ricercano nel campo dei materiali multifunzionali. L'abilità di "sentire" in autonomia permette, ad esempio, alle strutture di eseguire un'azione di auto monitoraggio senza l'ausilio di sensori esterni. I sensori generalmente utilizzati, collocati sulla superficie esterna dei particolari, potrebbero risultare inefficienti o recare danni durante l'utilizzo. Inoltre, potrebbe risultare impossibile il loro collocamento, o più in generale, il processo di monitoraggio utilizzando tali componenti sarebbe troppo complicato e costoso.

Un primo metodo di self-sensing è stato quello di inserire direttamente sensori all'interno dei materiali compositi, tra i diversi strati, durante il processo produttivo [2].

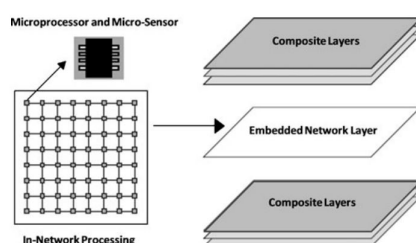


Figura 2.3: Sensore incluso negli strati del composito [2]

Oppure si sfruttano direttamente le proprietà dei materiali costituenti i compositi. Generalmente si utilizzano le proprietà elettriche dei rinforzi; nel caso dei compositi in fibra di carbonio si sfruttano le fibre di carbonio stesse per raccogliere e trasportare il dato di deformazione del materiale.

2.3 Meccanismi di Self-Sensing

Per implementare i diversi tipi di sensing si utilizzano principalmente segnali elettrici, in modo tale da ricavare dati facilmente interpretabili ed analizzabili da un computer. Questa metodologia apre le porte all'utilizzo di alcune proprietà intrinseche di molteplici materiali.

La risposta di questi materiali agli stimoli applicati su di essi, può essere progettata in fase di design del materiale stesso o del componente che si vuole realizzare.

Di seguito si espongono le principali grandezze fisiche utilizzate in questo ambito.

2.3.1 Piezoresistività

La variazione di resistenza osservata in un materiale sottoposto a deformazione o stress è il principale metodo di sensing implementato. La piezoresistività, quasi sempre reversibile, è un fenomeno che si osserva in alcuni materiali, in genere di carattere cristallino

(piezoelettrici), dove una sollecitazione provoca un cambiamento nella microstruttura e di conseguenza una variazione nella risposta elettrica [4]. Tale proprietà è la più comune per registrare cambiamenti di resistenza, e differisce dalla piezoelettricità in quanto si basa sulla conduzione elettrica [4]. Risulta quindi necessario che il materiale o il sensore apposto siano in grado di condurre elettricità.

Il concetto teorico alla base è quello della resistenza volumetrica, la quale è funzione della resistività volumetrica del materiale e del volume del componente [4].

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (2.2)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l}(1 + 2\nu) \quad (2.3)$$

Tale equazione si basa su di alcune assunzioni: la sollecitazione e la resistenza sono applicate/misurate lungo la stessa direzione, il materiale è isotropo lungo le altre due direzioni [4]. Come osserva dall'eq. 2.3, sia una variazione di resistività che di deformazione contribuiscono alla variazione di resistenza. Per meglio caratterizzare questa variazione di resistenza si fa affidamento al Gauge Factor (GF).

Si procede esponendo tre casi principali [4]:

- Caso 1: $(\Delta \rho)/\rho \gg (\Delta l)/l$
La resistenza ed il relativo GF diventano:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad GF = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} = \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\frac{\Delta l}{l}} \quad (2.4)$$

- Caso 2: $(\Delta \rho)/\rho \approx (\Delta l)/l$
La resistenza ed il relativo GF diventano:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l}(2 + 2\nu) \quad GF = 2 + 2\nu \quad (2.5)$$

Essendo il coefficiente di Poisson $\nu \leq 0.5$, il massimo GF ottenibile risulta pari a 3 (valore abbastanza piccolo).

- Caso 3: $(\Delta \rho)/\rho \ll (\Delta l)/l$
La resistenza ed il relativo GF diventano:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l}(1 + 2\nu) \quad GF = 1 + 2\nu \quad (2.6)$$

Sempre per il coefficiente di Poisson $\nu \leq 0.5$, GF risulta pari a 2. In questo caso la variazione di resistenza è causata maggiormente dalle variazioni dimensionali [4].

Si può dedurre da quanto esposto sopra, che il GF decresca se la deformazione cresce. Di conseguenza risulta importante riportare insieme al valore del GF anche il range di deformazioni in cui è stato misurato [4].

Per ottenere alti valori di GF bisogna avere basse deformazioni, di contro, misurare uno spostamento piccolo risulta più complicato che misurarne uno grande [4].

Per quanto riguarda materiali costituiti da nanotubi di carbonio o particolati conduttivi, la piezoresistività è altamente influenzata dal comportamento del network interno al materiale. per tali materiali il GF risulta essere nell'ordine di 500-1000.

2.3.2 Capacità

La capacità è una grandezza fisica che misura la quantità di energia immagazzinabile da un condensatore. Per condensatore si intende un componente elettrico costituito da due armature conduttive, con interposto un materiale dielettrico. Il condensatore è in grado di immagazzinare carica elettrica sulle armature ed il dielettrico impedisce o limita che esse si scarichino sulla faccia opposta. Di seguito (fig. 2.4) vengono mostrati alcuni esempi, e relative formule per il calcolo della capacità.

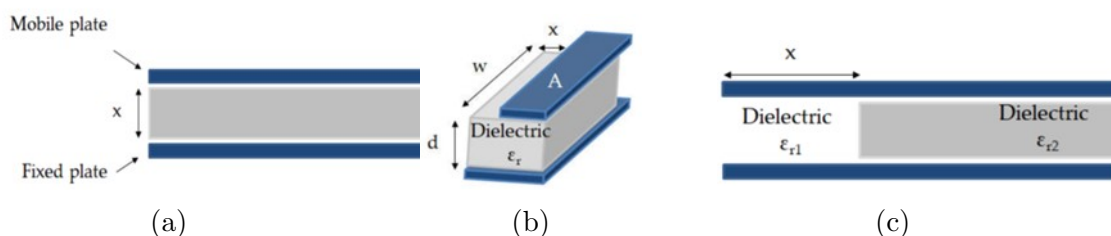


Figura 2.4: Condensatori [5]

$$(a) \rightarrow C_x = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{x} \quad (2.7)$$

$$(b) \rightarrow C_x = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{d} (A - wx) \quad (2.8)$$

$$(c) \rightarrow C_x = \frac{\epsilon_0 w}{d} [\epsilon_{r2} - x(\epsilon_{r2} - \epsilon_{r1})] \quad (2.9)$$

Da questi esempi si nota che la capacità di un condensatore dipende principalmente dall'area delle armature e dalla distanza tra di esse, senza tralasciare ovviamente l'effetto del materiale dielettrico interposto tra le armature [5].

Si osserva che, a parità di dielettrico, una variazione nella distanza tra le armature o nell'area delle stesse provoca una variazione della capacità. Tale variazione può essere misurata ed utilizzata per il Self-Sensing.

I sensori capacitivi consumano meno potenza rispetto ai resistivi ed hanno un tempo di risposta minore [5].

È possibile produrre tali sensori direttamente all'interno di altri componenti, strutturali e non, tramite la stampa 3D o altri mezzi.

2.3.3 Induttanza

L'induttanza (L) è una proprietà elettrica, tale per cui la variazione di corrente elettrica, nel tempo, all'interno di un circuito, provoca la formazione di una forza elettromotrice proporzionale alla variazione del flusso magnetico concatenato dal circuito stesso.

$$L = \frac{\Phi_B}{i} \quad (2.10)$$

Tale proprietà si basa sul passaggio di corrente elettrica all'interno del materiale. Si applica tale proprietà per materiali conduttivi o particelle che permettano la conduzione.

Alla luce dell'argomento di questa tesi si nominano principalmente i polimeri induttivi, nello specifico, polimeri con particolato conduttivo immerso nella matrice in grado di condurre corrente.

Nel campo del Self-Sensing induttivo in ambito strutturale, si misura la variazione di induttanza in funzione della deformazione della geometria, la quale provoca un incremento dell'induttanza [13].

Questa forma di Sensing è stata tralasciata precedentemente, concentrandosi principalmente su proprietà come resistività per il Sensing dell'allungamento proporzionale alla sollecitazione. Tuttavia, si sta sviluppando per offrire l'opportunità di monitorare anche la variazione della geometria del componente in caso di sollecitazioni a schiacciamento, ondulazione o frantumazione del componente. In questo modo si amplia il campo di deformazioni/sollecitazioni che si possono misurare mediante il Self-Sensing offerto dall'uso di questi materiali.

2.4 Teoria della Percolazione

In questo elaborato, il focus principale è l'utilizzo di materiali conduttivi per la produzione di sensori e/o componenti in grado di esercitare una funzione di sensing. Per spiegare il fenomeno per cui i materiali conduttivi di natura polimerica sono in grado di condurre elettricità, si può usufruire della teoria della percolazione

La teoria della percolazione è stata inizialmente sviluppata da S. B. Broadbent e J. M. Hammersley (1957), per spiegare il comportamento di sistemi disomogenei [27],[28]. Tale teoria si adatta allo studio del comportamento dei materiali conduttivi considerati in questo studio.

I materiali conduttivi considerati sono di natura polimerica (PLA) e di base sono isolanti. Per ovviare a questo problema si utilizzano particelle di diversa natura, diffuse all'interno del materiale principale per donare a quest ultimo delle proprietà diverse, generalmente conduttive.

L'infusione di particelle produttive, le quali possono essere frammenti di fibre o particolati metallici, costituisce di per se un sistema disomogeneo.

La conduzione del materiale è estremamente influenzata dalla connettività del network creato tra le particelle.

La teoria della percolazione aiuta lo studio di questa rete interna al materiale, per comprendere come essa vari in funzione della quantità e disposizione delle particelle stesse.

Concetto importante della teoria è quello di soglia di percolazione (percolation threshold); si riferisce al limite di concentrazione che si deve verificare affinché si instauri un network conduttivo tra le particelle all'interno del materiale [27],[28].

Questo limite dipende principalmente da:

- Tipo di particelle conduttive
- Dimensioni e distribuzione delle particelle
- Proprietà del materiale di base (matrice)

La teoria della percolazione è più rilevante quando la concentrazione di particelle è ad un livello considerevole, ma a concentrazioni più basse si può avere comunque una forma di conduzione per effetto di Tunneling degli elettroni [29].

L'effetto di Tunneling è un fenomeno quanto-meccanico, per il quale un elettrone riesce a attraversare una barriera energetica che generalmente non riuscirebbe a passare. Questo avviene quando due particelle conduttive sono abbastanza vicine ma non in contatto.

Questo effetto è utile per spiegare come questi materiali, anche quando la concentrazione di particelle conduttive è inferiore alla soglia di conduzione, siano in grado di esibire un comportamento conduttivo, anche se ridotto.

Stampa 3D

3.1 Introduzione

La stampa 3D, o meglio la manifattura additiva, è un processo produttivo nato negli ultimi decenni (Charles Hull 1986). Il concetto alla base è quello dell'apporto di materiale necessario alla costituzione del particolare, invece che della sua asportazione [1]. La produzione industriale odierna si basa su macchine ad asportazione di materiale, queste forniscono prodotti finiti per innumerevoli settori. L'utilizzo di questa metodologia produttiva comporta degli svantaggi: si produce una notevole quantità di scarto di materiale, i grani cristallini non vengono preservati, le geometrie di complessità elevata o con forme non idonee non possono essere prodotte.

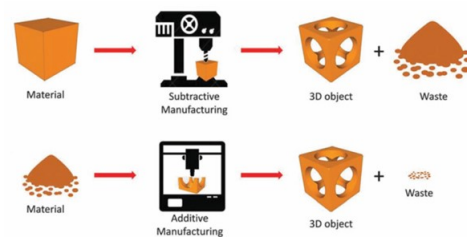


Figura 3.1: Stampa 3D [3]

La manifattura additiva, nonostante sia una tecnologia relativamente recente, offre la possibilità di ridurre il materiale di scarto (il materiale viene depositato principalmente dove serve), la struttura cristallina del materiale è maggiormente preservata ed il grado di complessità e personalizzazione del componente è maggiore. Tuttavia, questa tecnologia non è esente da svantaggi: per l'appunto è una tecnologia recente, in base al processo utilizzato si hanno diverse limitazioni sul materiale impiegabile e sui parametri di stampa, dal punto di vista meccanico sono pochi i processi di stampa che producono un prodotto finito che non necessiti di lavorazioni successive per raggiungere gli standard di qualità superficiale o altri requisiti. In ambito aerospaziale la relativa certificazione di un componente realizzato con questa tecnologia è difficile da ottenere.

3.2 Metodi di Stampa

Vari metodi di stampa 3D sono stati sviluppati nel corso degli anni. Fin dalla realizzazione dei primi prototipi, si è innescato un processo continuo di ricerca e sviluppo attuo a migliorare sia i metodi che i macchinari per la manifattura additiva.

Molteplici studi sono in corso per migliorare le tecniche utilizzate oggi e svilupparne di nuove. Si cerca inoltre di ampliare i materiali utilizzabili da tale tecnologia e se ne ricercano di nuovi appositamente progettati.

Di seguito viene esposta una serie di metodologie sviluppate in ambito additivo che varia per possibilità di applicazioni e materiali utilizzabili.

Stereolitografia (SLA)

La stereolitografia è stata una delle prime tecniche di manifattura create (Charles Hull 1986).

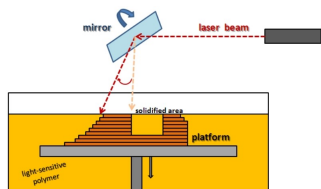


Figura 3.2: SLA

Il principio alla base è l'utilizzo di un fascio di luce (principalmente UV), per solidificare della resina fotosensibile. Concentrando e limitando il fascio di luce, risulta possibile solidificare specifiche zone del bagno di resina, in modo tale da costituire strato per strato il componente finale [12].

Selective Laser Sintering (SLS)

La sinterizzazione selettiva tramite laser sfrutta appunto un laser come sorgente di calore per fondere in modo preciso

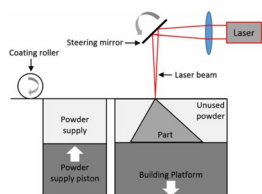


Figura 3.3: SLS [12]

la polvere di materiale precedentemente depositata. Il letto di polvere è costituito da fine particolato di materiale, che viene preriscaldato in modo tale da facilitare la fusione e ridurre stress termici. Si usa generalmente per materiali metallici ed offre risultati relativamente notevoli in funzione dei parametri implementati [12].

Fused Deposition Modelling (FDM)

La deposizione di materiale fuso è una tecnica additiva che si basa sul processo di estrusione.

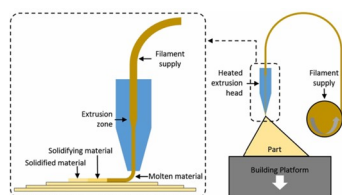


Figura 3.4: FDM [12]

Il materiale (generalmente di natura polimerica), viene riscaldato poco sotto il punto di fusione all'interno di un estrusore. Così facendo si riesce, tramite una testina mobile, a depositare il materiale sul piano di stampa, costituendo uno dopo l'altro i diversi layer del componente [12]. Sono molto importanti i parametri di stampa al fine di ottenere risultati ottimali, sia a livello superficiale sia a livello della microstruttura del componente finito.

Tale processo è utilizzato maggiormente, per le stampanti, a livello hobbistico.

Material Jetting

Questa tecnologia si basa sull'impiego di una serie di ugelli, i quali si occupano di depositare materiale o agenti leganti, su di un substrato di materiale per solidificarlo. In genere, il materiale utilizzato è in polvere posto sul piano di stampa. Si differenzia dal SLS poiché il componente prodotto non è costituito da materiale fuso ma è più precisamente un agglomerato [12], il quale necessita di un processo di lavorazione successivo; come sinterizzazione o infusione.

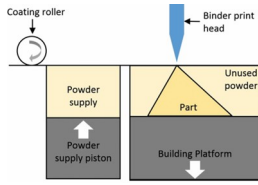


Figura 3.5: Mat. Jetting [12]

Electron Beam Manufacturing (EBM)

Questa tecnica è simile alla SLS ma usa un fascio di elettroni concentrato come sorgente di calore per riscaldare il materiale: in alcuni casi si arriva a fusione, in altri a sinterizzazione.

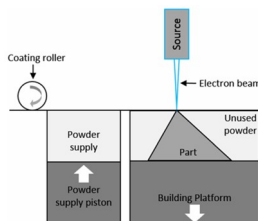


Figura 3.6: EBM [12]

Nonostante sia un processo nuovo, è largamente usato per la lavorazione di metalli. Il processo si svolge in un ambiente sotto vuoto, in modo tale da non ridurre l'efficienza del raggio di elettroni; molto sensibili a collisioni che possono deviarne o bloccarne la traiettoria [12]. È un processo molto costoso ma che offre buone caratteristiche a livello di microstruttura del componente finito,

3.3 Stampa 3D & Self-Sensing

La stampa 3D permette di realizzare, come già esposto, design più complessi ed inoltre permette di inserire all'interno della struttura del materiale parti di sensori o sensori completi per implementare funzionalità di sensing.

Considerando la stampa 3D di sensori piezoelettrici in relazione ad altre tecnologie produttive, risulta un metodo di produzione ancora immaturo e con una limitata scelta di materiali lavorabili; in questo ambito sono necessari ancora alcuni miglioramenti [3].

Ciò nonostante, tale tecnologia permette di realizzare sensori di varia forma, in funzione dell'applicazione, e di diminuire i costi di produzione.

3.3.1 Esempi da letteratura: Sensori

Di seguito viene fornita una serie di esempi sugli studi compiuti nell'ambito di materiali multi-funzionali e Self-Sensing. In particolare si riportano alcuni sensori realizzati con questi materiali sfruttando tecniche di stampa 3D.

Soft Sensor

Un'applicazione del self-sensing tramite stampa 3D è la fabbricazione di sensori di varia natura. Ad esempio si possono dotare dei robot o altri macchinari con sensori "soft", per l'acquisizione di segnali di feedback, necessari al loro corretto funzionamento [16]. L'inserimento di sensori all'interno di attuatori stampati permette di chiudere il ciclo. Si può realizzare un assieme in grado di svolgere la funzione preposta senza l'ausilio di elementi esterni, ed al massimo dell'efficienza, avendo progettato e realizzato il sistema su misura per le proprie esigenze.

Tali sensori si possono realizzare mediante la stampa 3D, utilizzando più materiali diversi. Generalmente si utilizzano più materiali poiché risulta più semplice la fabbricazione. Un primo materiale fa da supporto e costituisce il componente seguendo la geometria voluta. Un secondo materiale, di solito conduttivo per sfruttare proprietà elettriche, è disposto strategicamente per massimizzare il sensing del componente stesso.

Questo approccio è molto utile nello sviluppo e produzione di appendici mobili per robot o macchinari [16]. In tale casistica risultano inefficienti i normali sistemi di monitoraggio.

Seguendo questo ragionamento si possono realizzare molteplici sensori di diverse geometrie e con innumerevoli funzionalità: ad esempio Benjamin Shih ed il suo team [16] hanno realizzato alcuni sensori di questa tipologia per applicazioni robotiche e per testare l'effettiva efficacia.

Partendo da un semplice sensore mono assiale di deformazione, passando poi ad un sensore bi assiale di deformazione unito ad uno di pressione, hanno sviluppato e caratterizzato i loro sensori con un grado di complessità crescente.

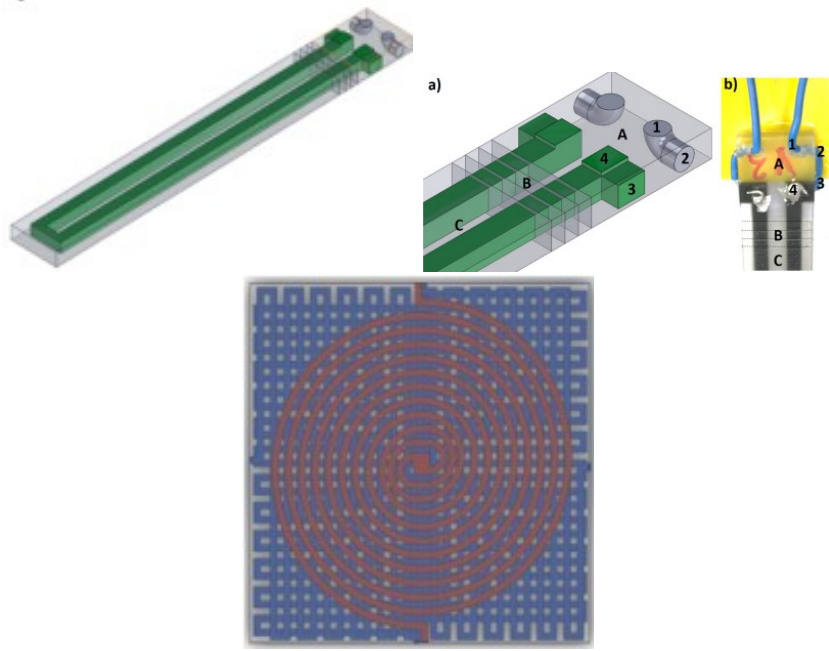


Figura 3.7: Esempi di sensori di deformazione [16]

Per la caratterizzazione dei sensori si sono basati sulla variazione di resistenza prodotta nel sensore durante la deformazione. La sezione delle "piste" di materiale conduttivo, infatti, subisce una variazione provocando un mutamento nella resistenza dello stesso [16].

Assunte sezioni rettangolari, l'equazione che governa il comportamento del sensore è la seguente:

$$R_0 = \frac{\rho L}{wh} \quad (3.1)$$

Dove R è la resistenza, L è la lunghezza del conduttore, ρ è la resistività del conduttore e w ed h sono le dimensioni della sezione lungo il sensore.

$$\Delta R = R - R_0 = \rho \frac{L + \Delta L}{(w + \Delta w)(h + \Delta h)} - \rho \frac{L}{wh} \quad (3.2)$$

Si possono effettuare le seguenti sostituzioni [16]: $\Delta w = -\nu \epsilon w$ e $\Delta h = -\nu \epsilon h$ con $\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$.

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \epsilon \left[\frac{(1 + 2\nu) - \nu^2 \epsilon}{(1 - \nu \epsilon)^2} \right] \quad (3.3)$$

Grazie a questa equazione è possibile correlare la variazione di resistenza e la deformazione del sensore.

Per il caso del sensore di pressione, la formula ottenuta dagli studi di Benjamin Shih ed il suo team [16] è la seguente:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{1}{1 - 2(1 - \nu^2)wP/(Eh)} \quad (3.4)$$

Dove per P si intende la pressione esercitata sul sensore e per E il modulo elastico del materiale.

A seguito dei test di verifica si sono riscontrate alcune anomalie. La variazione dei valori ottenuti sperimentalmente e quelli teorici può essere attribuita a diversi fattori. Tra questi il più probabile è che la sezione del materiale conduttore non rimane costante durante la deformazione ed inoltre, si possono verificare alcuni mutamenti a livello atomico nel materiale stesso [16].

La risposta nel tempo di questi sensori è risultata essere molto fedele, fatto non assicurato osservando altri sensori di questa tipologia [16].

Flexible Sensor

I sensori di deformazione si basano principalmente su fenomeni resistivi o capacitivi per effettuare misurazioni. Prendendo spunto dalla struttura di un condensatore piano si potrebbe realizzare un sensore composto da due strati di materiale conduttivo, interposti da materiale dielettrico per costituire un condensatore, il tutto stampato in 3D per massimizzare l'efficienza e realizzare un sensore della geometria voluta.

I sensori di questo tipo si basano sulla variazione di capacità osservata dal sensore una volta deformato [17]. La deformazione provoca il mutamento della distanza tra le armature o dell'area delle stesse, fornendo un dato che è possibile raccogliere ed analizzare.

Tuttavia, nonostante abbiano una risposta veloce, la variazione di capacità che producono è limitata e questo li rende particolarmente suscettibili ad interferenze [17].

La disposizione di materiale conduttivo, nel materiale di supporto, può variare da quella di progetto alterando le successive misure o rendendo inutilizzabile il sensore.

3.4 Stampanti Utilizzate

Le stampanti utilizzate per realizzare i componenti necessari per gli studi condotti sono due: la Markforged MARK 2 e la Bambu Lab A1 Mini.

Sono state scelte queste due stampanti poiché offrono notevoli prestazioni e, combinate, un'ampia gamma di materiali utilizzabili e componenti realizzabili.

La maggior parte dello studio è stato compiuto con la stampante Bambu Lab ma viene riportata anche la Markforged in quanto è stata impiegata nella fase iniziale di ricerca.

Di seguito sono esposte le diverse caratteristiche, qualità e difetti per ognuna della due stampanti.

3.4.1 Markforged MARK 2

Questa stampante è stata progettata per stampare materiali in fibra di carbonio, ad esempio l'Onyx, composto di Nylon e microfibra di carbonio. Inoltre, tale stampante è in grado di depositare, durante la stampa, tratti di fibra continua. Questo permette di creare strutture composite e di irrobustire componenti a livelli mai visti prima. Oltre a costituire irrigidimenti, questa caratteristica della stampante, permette di costituire vere e proprie parti di circuiti o sensori in modo tale da creare un apparato di Sensing progettato direttamente all'interno del componente.

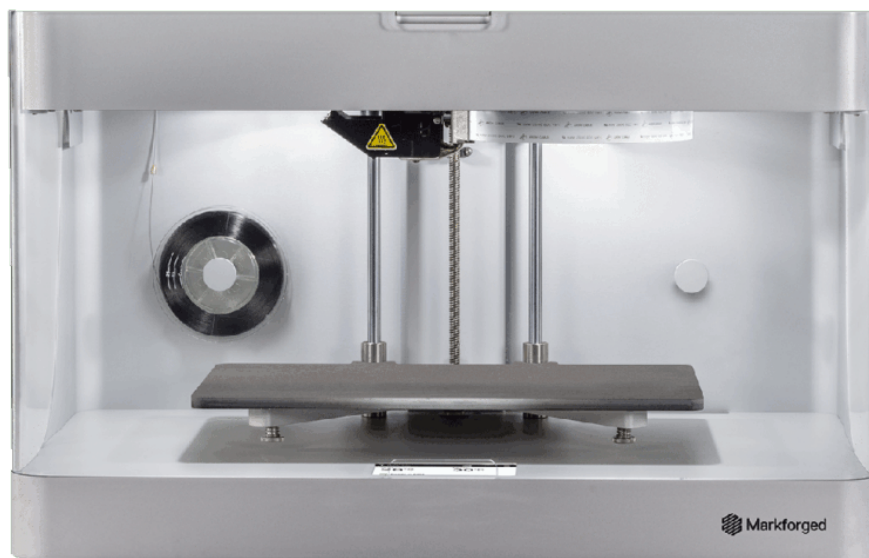


Figura 3.8: Stampante MarkForge MK2

3.4.2 Bambu Lab A1 Mini

La stampante A1 Mini della Bambu Lab è stata scelta poiché offre la possibilità di lavorare con molteplici materiali plastici; tra tutti risulta di notevole interesse un polimero dalle proprietà conduttive.

Ultimo design uscito, ad oggi, dall'azienda Bambu Lab; è studiata per essere una stampante per principianti che entrano nel mondo della stampa 3D. Ciò nonostante, possiede tutte le funzionalità di stampanti di livello superiore ed offre risultati e performance di alto livello.

Grazie all'accessorio AMS (Sistema Automatico dei Materiali), questa stampante è in grado di utilizzare fino a 4 materiali differenti contemporaneamente.

Per i fini di questo studio, tale funzionalità è stata ampiamente sfruttata. Infatti, sono stati impiegati due tipi di materiali per tale stampante: un PLA generico per realizzare substrati e/o geometrie di supporto, ed un PLA conduttivo per implementare le funzionalità di sensing. La loro combinazione ha permesso la realizzazione e lo studio di diversi sensori e strutture con proprietà di sensing.



Figura 3.9: Stampante Bambulab A1 Mini con accessorio AMS

3.5 Caratterizzazione Materiale Conduttivo

Data l'incertezza sulle caratteristiche del materiale conduttivo, prima di poter realizzare dei sensori con esso è necessario comprenderne le proprietà fisiche ed il comportamento. Questo processo è fondamentale per poter successivamente progettare e realizzare diversi tipi di sensori.

In questa sezione vengono riportati i passaggi ed i risultati ricavati durante la caratterizzazione del materiale.

3.5.1 Prove sul filamento

Vengono, innanzitutto, effettuate delle prove sulla resistività del filamento prima che questo venga stampato. In tale modo si posso osservare possibili mutamenti nel comportamento del materiale stesso prima e dopo il processo di stampa.

Si procede prendendo in considerazione dei segmenti di filamento di diversa lunghezza, in modo tale da misurarne la resistenza ed osservarne l'andamento [20].

Le diverse misurazioni di resistenza vengono eseguite tramite un multimetro digitale da banco GW INSTEK.

Una volta collegate le estremità con i connettori del multimetro perpendicolari al segmento, si attende un intervallo di tempo affinché la misura si stabilizzi.

Questo fenomeno d'instabilità si può attribuire alla natura del materiale stesso, infatti, esso è un polimero. È possibile che esso si deformi anche alla sola pressione esercitata dal connettore, esponendo più o meno particelle conduttive al contatto con lo strumento, e di conseguenza variando la misurazione.

Le varie prove vengono effettuate ruotando il filamento dopo ogni misurazione.

Questo tipo di misura ha prodotto dati troppo scostanti tra di loro, di conseguenza si è modificato l'esperimento ricoprendo le estremità con una vernice a base di argento.

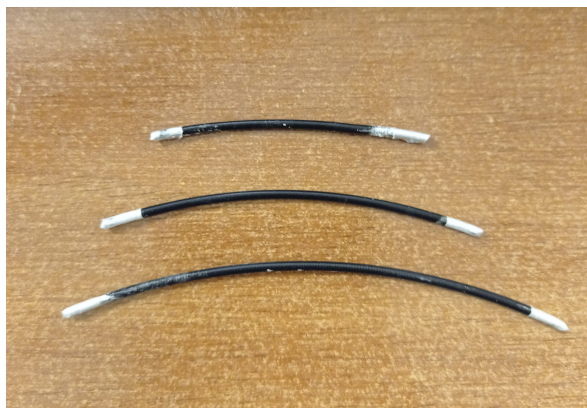


Figura 3.10: Segmenti Filamento

Questo espediente permette di promuovere la conducibilità del filamento stesso e ridurre l'oscillazione della misura.

Di seguito viene riportata tabella 3.1 con i rispettivi valori delle grandezze misurate in una serie di prove:

Tabella 3.1: Valori di resistenza per i segmenti di filamento

| l [mm] | R [K Ω] | ρ [Ωm] |
|----------|-------------------|-----------------------|
| 40 | 32.56 | 1.95 |
| 60 | 23.86 | 0.95 |
| 80 | 32.04 | 0.96 |

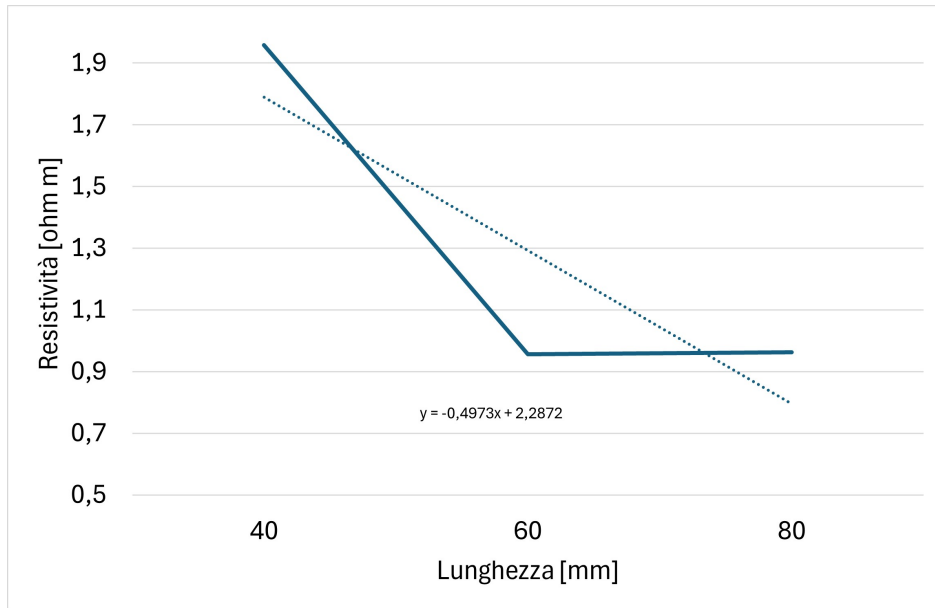


Figura 3.11: Grafico Resistività Filamento

A seguito delle misurazioni della resistenza dei vari segmenti si può calcolare la resistività del materiale secondo la seguente formula:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l} \quad (3.5)$$

La sezione S del filamento, in funzione del diametro, è pari a:

$$d = 1.75mm \rightarrow S = \frac{\pi d^2}{4} \simeq 2.4mm^2 \quad (3.6)$$

Grazie ai dati raccolti durante l'esperimento è stato costituito il grafico in fig. 3.11. Si può osservare che l'andamento della resistività non è costante; ciò si può attribuire in parte alle condizioni in cui la misurazione è stata condotta (applicazione della vernice conduttiva non omogenea ed irregolare, misurazione con multimetro da banco manuale), ed in parte alle proprietà del materiale stesso.

Nonostante ciò, se si approssimano i dati relativi alle resistenze dei vari segmenti, raccolti con una retta, essa risulta avere equazione pari a: $y = -0.26x + 30$.

Da qui si può dedurre che il materiale conduttivo, prima della stampa, ha una resistenza di contatto di circa $30 K\Omega$ ed una resistività media di $1.29 \Omega m$

3.5.2 Prove sul Materiale Stampato

Una serie di provini realizzati con il materiale conduttivo viene prodotta per svolgere alcuni test esplorativi sulla natura ed il comportamento elettrico di tale materiale una volta stampato.

Barre



Figura 3.12: Barre Stampate

Una serie di barre viene realizzata in modo tale da effettuare lo stesso studio compiuto sul filamento.

Le barre sono stampate mantenendo il 100% di riempimento ed una sola parete di perimetro.

Per conformità dell'esecuzione dell'esperimento e nella raccolta dei dati, le barre vengono realizzate con sezione quadrata di lato 1.4 mm. Si ottengono così dei provini con sezione simile ai segmenti di filamento utilizzati precedentemente.

Tabella 3.2: Valori di resistenza per le barre stampate

| l [mm] | R [K Ω] | ρ [Ωm] |
|----------|-------------------|-----------------------|
| 40 | 103.6 | 5.07 |
| 60 | 152.58 | 4.98 |
| 80 | 187.4 | 4.59 |

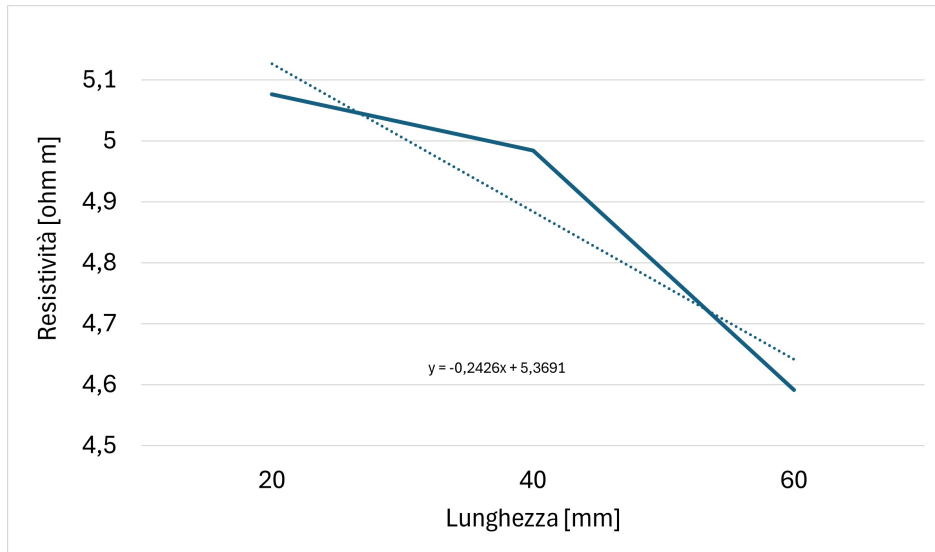


Figura 3.13: Grafico Resistività Filamento Stampato

La sezione S dei provini è pari a:

$$b = 1.4mm \rightarrow S = b^2 = 1.96mm^2 \quad (3.7)$$

In fig. 3.13 si può osservare l'andamento di resistenza per il materiale stampato. Anche in questo caso si vede come il comportamento della resistività non sia costante ma, a differenza del caso precedente è molto più stabile. Si potrebbe giustificare tale andamento con il fatto che il materiale, durante la stampa, viene depositato ordinatamente seguendo uno schema ben preciso; inoltre viene alterato anche l'ordine delle particelle conduttive all'interno della matrice stessa. Così facendo si impone al materiale una struttura più definita e di conseguenza un comportamento più lineare.

La retta che approssima meglio i dati relativi alle resistenze misurate ha equazione: $y = 41.9x + 64.06$

Da ciò si può dedurre che la resistenza di contatto sia circa $64 K\Omega$, mentre la resistività sia in media $\rho = 4.88 \Omega m$

Si nota, infine, come i valori del materiale stampato siano più elevati di quelli del filamento; sia la resistenza di contatto che la resistività raddoppiano all'incirca. Tale variazione non è inaspettata poiché il materiale subisce una trasformazione durante il processo di stampa.

Piastrine

In seguito alle prove per la resistenza, effettuate tramite l'utilizzo della vernice a base di argento, sono stati acquisiti dati affidabili. Si vuole ora verificare se è possibile ottenere gli stessi risultati mediante l'impiego di cavi di rame immersi nei provini.

La vernice, a base di argento, utilizzata risulta essere costosa e di scarsa reperibilità, quindi una soluzione mediante cavi di rame risulterebbe più economica e di più facile replicabilità.

Si procede realizzando delle piastrine di materiale conduttivo con all'interno, affogato, un cavo di rame ($d = 0.45$ [mm]). Il cavo di rame dovrebbe promuovere e stabilizzare la conduzione, come per la vernice di argento; per installare il cavo all'interno del componente ed ottenere una giunzione solida, le piastre vengono realizzate con riempimento al 100% e con una scanalatura all'interno per alloggiare il cavo, vedi fig 3.14 per le dimensioni (profondità 0.6 [mm]).

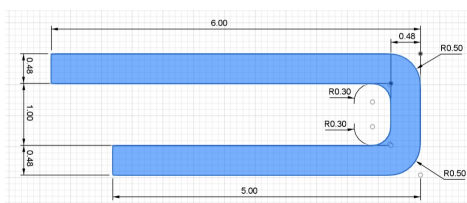


Figura 3.14: Scanalatura

Durante il processo di stampa viene introdotta una pausa che permette di inserire il cavo, che viene poi ricoperto dagli strati superiori, imprigionandolo.

Le piastre realizzate hanno le seguenti dimensioni e parametri:

- larghezza: 8 mm
- lunghezza: 60 mm
- altezza: 1.4 mm
- pareti di perimetro: 1
- gusci esterni (superiore/inferiore): 2

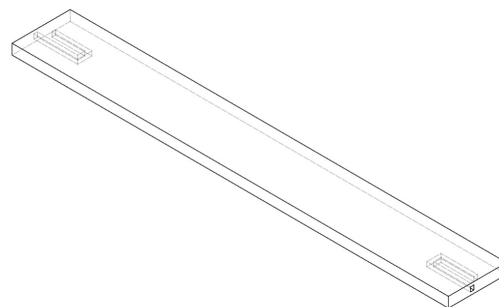


Figura 3.15: Piastra

Nonostante si sia immerso il cavo conduttore all'interno del materiale durante il processo di stampa, affinché venisse promossa la conduzione, i risultati ottenuti sono stati insoddisfacenti.

Anche in questo caso si riscontrano le stesse fluttuazioni osservate nell'esperimento precedente, prima dell'utilizzo della vernice conduttiva.

Probabilmente anche immergere il cavo di rame all'interno del componente, in fase di stampa, non è abbastanza per promuovere una conduzione più stabile tra le particelle conduttive ed il cavo.

3.5.3 Prove di tipo capacitivo

Data la volatilità del comportamento resistivo di questo materiale conduttivo, si procede esplorando le sue caratteristiche capacitive. La capacità, come ampiamente noto,

non è affetta dalla resistenza. Risulta quindi possibile sorpassare il comportamento sporadico dal punto di vista resistivo e testare una via diversa.

Circuito di misura con Arudino

Per prima cosa si costruisce un circuito di misura implementando una scheda Arduino per l'acquisizione delle misure, tale circuito è stato realizzato basandosi sulla guida [21].

La misura della capacità si basa sulla misura della costante temporale τ_C relativa al circuito considerato, tale costante è funzione sia della resistenza, sia della capacità secondo:

$$\tau_C = R \cdot C \quad (3.8)$$

Il micro-ctrllore Arduino si occupa, quindi, di misurare il tempo in cui il condensatore arriva ad una tensione di circa il 63% di quella di stimolo, percentuale a cui si dovrebbe trovare la tensione del condensatore una volta trascorsa una costante temporale τ_C , fig. 3.16 e restituisce il valore della capacità tramite porta seriale.

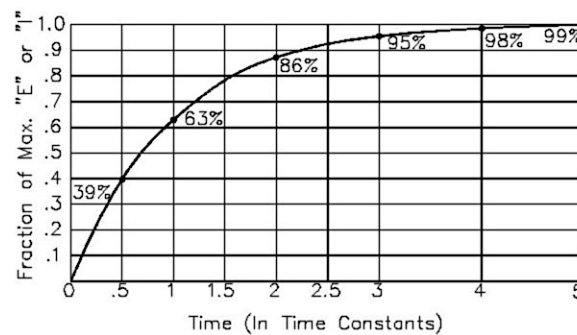


Figura 3.16: Costante Temporale, [21]

Conoscendo il valore della resistenza R1 (fig.3.17), possiamo calcolare la capacità del condensatore, mentre la resistenza R2 si occupa della scarica dello stesso.

- Scheda: Arduino UNO
- R1 = 10K Ω
- R2 = 330 Ω

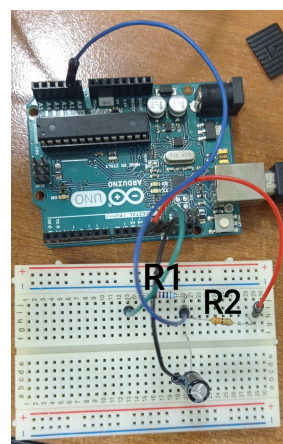


Figura 3.17: Circuito per Capacità

Il circuito è quindi sottoposto ad una fase di calibrazione e verifica, per accertarsi del suo corretto funzionamento.

Sono stati testati tre condensatori con capacità pari a: $10 \mu\text{F}$, $47 \mu\text{F}$, $100 \mu\text{F}$; ottenendo, come valori di ritorno: $10 \mu\text{F}$, $47 \mu\text{F}$, $109 \mu\text{F}$.

Si nota come per valori relativamente grandi di capacità, la misurazione è affetta da errore.

Si procede realizzando un semplice condensatore piano stampato, costituito da due armature quadrate in PLA conduttivo con interposto uno strato di semplice PLA, il quale svolge la funzione di dielettrico.

Prima della realizzazione è necessario dimensionare il condensatore; si utilizzano, per i valori delle costanti dielettriche quelli riportati da E. Huber ed altri [22], ovvero $k_{PLA} = 3.549$ e $k_{PLA\text{conduttivo}} = 6.414$.

Effettuando alcuni calcoli iniziali, si osserva come le capacità ottenibili sono dell'ordine dei pF.

Questo comporta una modifica del circuito di testing, infatti, basta modificare il programma eseguito da Arduino e collegare direttamente il condensatore da provare a due pin della scheda per effettuare misure di capacità così piccole.

Si vuole realizzare un condensatore di capacità 10 pF , con armature piane quadrate distanti 1 mm tra loro.

Con i dati precedentemente considerati si applicano le seguenti formule per il calcolo del lato delle armature:

$$C = \epsilon_0 k \frac{A}{d}, \quad A = l^2 \rightarrow l = 17.83\text{mm} \simeq 18\text{mm} \rightarrow C = 10.18\text{pF} \quad (3.9)$$

Dove ϵ_0 è la costante elettrica nel vuoto, pari a $8.854187 \cdot 10^{-12} \text{ [F/m]}$.

Si è voluto approssimare il risultato relativo al lato dell'armatura per facilitare la realizzazione; viene comunque riportato il valore relativo previsto per la capacità.

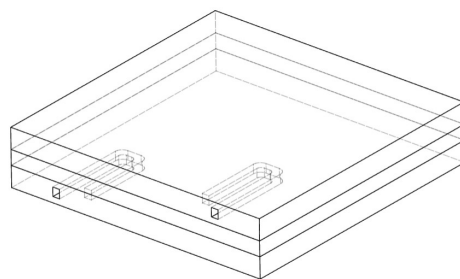


Figura 3.18: CAD Condensatore

Per facilitare il collegamento del condensatore stampato alla scheda, sono state ricavate delle scanalature, come per le piastrine, per alloggiare dei cavi di rame in ognuna delle armature.

Sono stati stampati 5 condensatori uguali ed è stata misurata la capacità tramite Arduino in 5 prove; di seguito vengono riportati i risultati ottenuti:

Tabella 3.3: Capacità Relative ai condensatori piani

| Capacità [pF] | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Media | k |
|---------------|------|------|------|------|------|-------|------|
| C1 | 8.87 | 8.56 | 9.0 | 8.69 | 8.91 | 8.81 | 3.07 |
| C2 | 9.27 | 9.32 | 9.23 | 9.27 | 9.23 | 9.26 | 3.23 |
| C3 | 9.18 | 9.23 | 9.13 | 9.23 | 9.13 | 9.18 | 3.2 |
| C4 | 9.23 | 9.18 | 9.04 | 9.13 | 9.09 | 9.13 | 3.18 |
| C5 | 9.04 | 9.09 | 9.0 | 9.04 | 9.09 | 9.05 | 3.16 |

In media si ottiene che i condensatori realizzati possiedono una capacità di circa 9.1 pF, ed il PLA utilizzato come materiale dielettrico ha una costante dielettrica (k) pari a circa 3.17. Il valore di k risulta vicino a quello di 3.2, generalmente utilizzato per le plastiche, e relativamente vicino al 3.549 calcolato da E. Huber; si consideri che il materiale in esame è diverso.

Il risultato di capacità ottenuto discosta lievemente dal valore calcolato, tuttavia rimane entro una tolleranza del 10% circa; si ricorda che è un condensatore sperimentale con capacità dell'ordine dei pF. Lo scostamento riscontrato è attribuibile al fatto che il processo di stampa non è perfetto; per quanto la stampante possa essere accurata, rimarranno sempre delle bolle d'aria all'interno del componente (le quali non vengono considerate nei calcoli). Inoltre, il materiale utilizzato non ha una composizione omogenea né all'inizio né alla fine del processo produttivo. In conclusione, il condensatore realizzato risulta soddisfare le aspettative iniziali e consente di proseguire con gli studi.

Dato il risultato ottenuto con questa prima prova, sono state condotte ulteriori ricerche nell'ambito dei condensatori stampati con tecniche additive.

Nebojsa I. ed altri [23] hanno condotto una serie di prove per verificare la fattibilità nella realizzazione di questi componenti utilizzando la stampa 3D come processo produttivo.

Utilizzando la procedura esposta da Nebojsa ed il suo team [23], vengono condotti gli stessi esperimenti per approfondire la caratterizzazione delle proprietà capacitive del materiale in esame.

Capacità in X

Prendendo spunto dall'esperienza di Nebojsa ed altri [23], viene condotta una prova stampando una serie di condensatori, variandone la dimensione lungo x. Così facendo si vuole studiare se tale variazione si ripercuote, e come, sulle proprietà capacitive del materiale.

Il provino costituito è una replica simile a quella impiegata negli studi di Nebojsa, di seguito vengono riportate le dimensioni e caratteristiche principali:

- lunghezza: 20 [mm]
- larghezza: 5.2, 10.4, 15.6, 20.8 [mm]
- distanza tra armature: 0.4 [mm]
- costante dielettrica $k = 3.17$ (ricavata precedentemente)

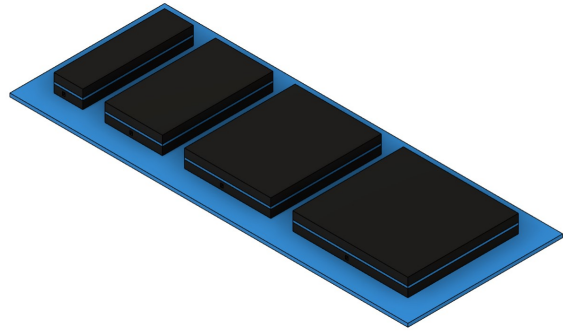


Figura 3.19: Provino per studio capacitivo lungo asse x.

Come per le prove precedenti, la misura è stata condotta tramite l'ausilio di una scheda Arduino UNO. I condensatori realizzati sono stati direttamente collegati alla scheda per effettuare le misurazioni.

Di seguito vengono riportati i risultati delle misurazioni:

Tabella 3.4: Dati relativi alle prove di capacità lungo l'asse x

| x [mm] | C [pF] | C media | k |
|--------|--------|---------|------|
| 5.2 | 7.29 | 7.24 | 3.14 |
| 10.4 | 14.58 | 13.56 | 2.94 |
| 15.6 | 21.87 | 19.95 | 2.88 |
| 20.8 | 29.16 | 24.85 | 2.99 |

Nella tabella 3.4 sono riportati rispettivamente: la dimensione lungo x, i valori di capacità calcolati, la media dei valori di capacità misurati ed il valore di k ricalcolato. Si osserva come le misure non seguano perfettamente l'andamento previsto; ciò deriva, in parte, dalle imperfezioni già citate del processo di stampa e dal fatto che la capacità è sempre dell'ordine dei pF.

Nondimeno i risultati ottenuti rispecchiano quanto già osservato e sono in linea con le aspettative di questa prova.

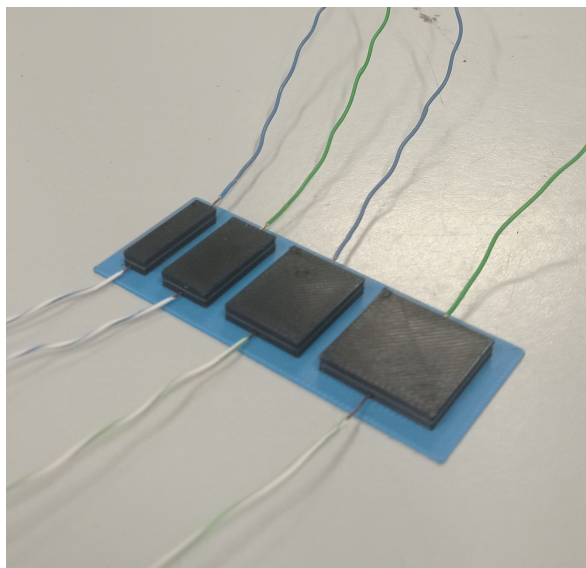


Figura 3.20: Prototipo realizzato per studio capacitivo lungo asse x

Capacità in Y

Come per l'asse X, viene testata la capacità variando le dimensioni sull'asse Y. Seguendo i passi fatti da Nebojsa ed altri [23], un'ulteriore serie di condensatori è stata realizzata.

- lunghezza: 16, 24, 32, 40 [mm]
- larghezza: 5.2 [mm]
- distanza tra armature: 0.4 [mm]
- costante dielettrica $k = 3.17$

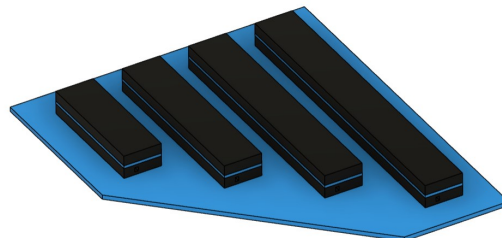


Figura 3.21: Provino per studio capacitivo lungo asse y.

In seguito alla misurazione della capacità dei condensatori per questa prova, vengono riportati i risultati nella seguente tabella:

| y [mm] | C [pF] | C media | k |
|--------|--------|---------|------|
| 16 | 5.83 | 5.82 | 3.16 |
| 24 | 8.75 | 8.62 | 3.12 |
| 32 | 11.66 | 11.4 | 3.1 |
| 40 | 14.58 | 14.35 | 3.11 |

Tabella 3.5: Dati relativi alle prove di capacità lungo l'asse y

In questo caso i risultati ottenuti sono in linea con i valori calcolati, al netto di alcuni scostamenti attribuibili a quanto detto in precedenza. La variazione dei valori

misurati da quelli calcolati rimane per tutte le prove entro il 3%.

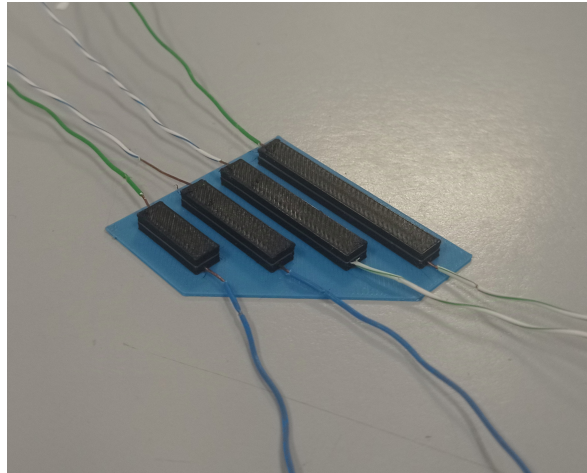


Figura 3.22: Prototipo realizzato per studio capacitivo lungo asse y

Capacità in Z

In fine si vuole testare la variazione di capacità in direzione z, ovvero variando il numero di strati costituenti le armature. Tale configurazione dovrebbe permettere di aumentare la capacità disponibile senza produrre delle armature di area troppo estesa. Il volume occupato dal condensatore aumenta, ovviamente, ma il design complessivo rimane comunque compatto.

Per questa prova i condensatori prodotti sono rappresentati in fig 3.23.

- lunghezza: 20 [mm]
- larghezza: 5.2 [mm]
- distanza tra armature: 0.4 [mm]
- n°strati: 4, 8, 12
- costante dielettrica $k = 3.17$

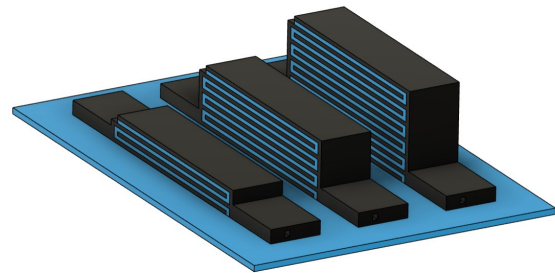


Figura 3.23: Provino per studio capacitivo lungo asse z.

Di seguito, ancora una volta, vengono riportati i risultati relativi alle capacità dei condensatori appena realizzati:

| n° strati | C [pF] | C media | k |
|-----------|--------|---------|-----|
| 4 | 14.58 | 13.38 | 2.9 |
| 8 | 26.84 | 27.22 | 2.5 |

Tabella 3.6: Dati relativi alle prove di capacità lungo l'asse z

I risultati relativi al condensatore a 12 strati non vengono riportati poiché uguali ai valori di quello a 4. Questa condizione suggerisce che, durante il processo di stampa si è verificata un'anomalia che ha prodotto un cortocircuito tra le lamine, invalidando il componente.

Si osserva, dai dati, che la capacità si discosta da quella prevista sempre di più all'aumentare degli strati. Questo si può attribuire alla costituzione del singolo condensatore stampato. Infatti, durante la stampa, è possibile che il materiale depositato non sia uniforme o che si verifichino piccoli difetti nella deposizione.

I dati riportano comunque che all'aumentare del numero di strati, si ha un relativo incremento della capacità, confermando le ipotesi precedentemente fatte.

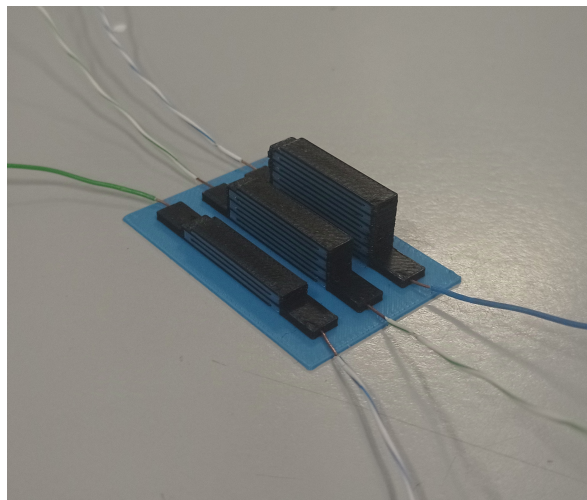


Figura 3.24: Prototipo realizzato per studio capacitivo lungo asse z

NB: Il valore k è stato mantenuto costante a 3.17 durante ogni esperimento. Il ricalcolo di esso è stato eseguito per verificare se subisse variazioni da considerare. Date piccole variazioni relative, attribuibili al processo di stampa, si considera k sempre costante e pari al valore precedentemente indicato.

Sensori

In questa sezione vengono riportati i vari sensori realizzati e le prove effettuate per studiare il comportamento dei diversi materiali e la fattibilità dell'implementazione delle proprietà di self-sensing.

Per meglio comprendere ed imparare in maniera pratica le proprietà ed il funzionamento dei diversi sensori, realizzati mediante manifattura additiva e con materiali diversi, vengono progettati prodotti e testati alcuni tipi sensori.

Questa parte dell'elaborato è di notevole interesse poiché si studia la fattibilità e l'affidabilità di diversi tipi di sensori, utilizzando un tipo di stampa relativamente semplice. Parlando in termini di applicazioni spaziali e sviluppo nello spazio, si procede a verificare se è possibile realizzare con tecnologie additive relativamente limitate, sensori semplici per diversi utilizzi.

Nello spazio, infatti, non si possiedono al momento stampanti con notevoli prestazioni; di contro la necessità di sensori più o meno complessi o comunque affidabili cresce costantemente.

In questa sezione si prova a realizzare alcuni tipi di sensori che trovano uso in molteplici settori, ed in campo spaziale, possono offrire un'alternativa concreta.

4.1 Sensore Resistivo con Fibra di Carbonio

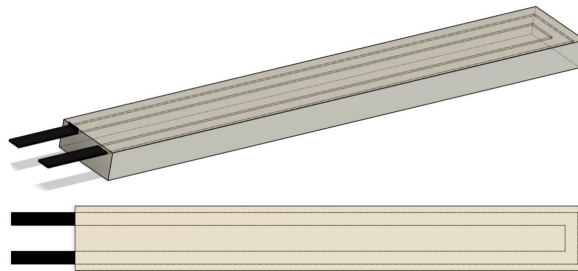


Figura 4.1: Design Sensore 1

Il primo sensore prodotto è uno di tipo piezoelettrico. Utilizzando la stampante **Mark-forged MK2**, il sensore è stato realizzato in Onyx con l'aggiunta di fibre di carbonio. Tramite queste fibre, disposte come in fig. 4.1, si ottiene la funzionalità di sensing. Viene sfruttata la proprietà della resistenza elettrica delle fibre, la quale varia se vengono sollecitate. A variare è l'area della sezione di fibre che altera il valore misurato di resistenza.

Prendendo in prestito il valore di resistività, per le fibre di carbonio, dalla presentazione [15] pari a $\rho = 17.62\mu\Omega m$, è possibile calcolare il valore di riferimento del sensore realizzato.

Il gruppo di fibre disposte nel componente, e responsabili della misura, sono contraddistinte dal colore nero nella fig. 4.1. La sezione vera e propria delle fibre ha come dimensioni: $b = 4 \text{ mm}$ (larghezza), considerando entrambe le piste e $h = 0.5$ (spessore).

$$A = b \cdot h = 2 \cdot 10^{-6} [m^2] \quad (4.1)$$

Avendo calcolato la lunghezza media delle fibre pari a $l = 0.364[m]$, si giunge al valore di resistenza:

$$R = \rho \frac{l}{A} = 3.2\Omega \quad (4.2)$$

4.2 Sensori Con Materiale Conduttivo

Prendendo in considerazione lo scopo di questo documento, ovvero studiare eventuali metodi di produzione di sensori e componenti con capacità di sensing per applicazioni spaziali, si procede nel seguente modo.

Una serie di sensori con il materiale conduttivo, precedentemente discusso durante la caratterizzazione, vengono prodotti e testati per raccogliere dati utili.

Si vuole accertare che la produzione sia fattibile, considerando le diverse sfide; e soprattutto che le misure rilevate con tali componenti sia affidabili.

Dato il comportamento, dal punto di vista resistivo, del materiale plastico conduttivo, utilizzato con la stampante Bambu Lab, si è deciso di utilizzarlo solo per applicazioni capacitive.

Vengono ora discussi i sensori capacitivi realizzati con questo materiale, ed i relativi dati riguardo le loro prestazioni nonché i risultati di alcune prove effettuate.

Si fa notare che i dati, prodotti dalle prove condotte, vengono raccolti utilizzando un multimetro LRC portatile. Si è scelto questo metodo di acquisizione in quanto risulta più comodo e veloce rispetto alla scheda Arduino.

La misurazione tramite Arduino è stata riportata come esempio di realizzazione e versatilità dei componenti realizzabili con le metodologie proposte.

Inoltre Arduino offre la possibilità di produrre interi sistemi specializzati ma che, al tempo stesso, possono essere facilmente riadattati per altri scopi o funzioni.

4.2.1 Sensore Capacitivo di Flessione

Un semplice sensore da realizzare è quello prodotto per la misurazione della flessione. Su di un substrato sottile di PLA generico vengono realizzate le due armature lamellari del condensatore, costituente il sensore.

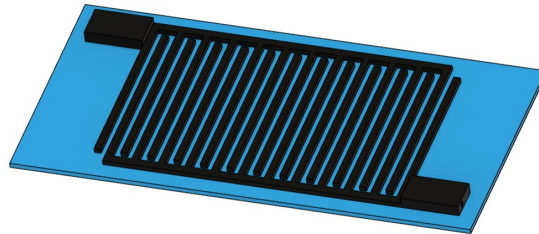


Figura 4.2: CAD del Sensore di flessione

Il concetto alla base del suo funzionamento si basa sul fatto che, se sottoposto ad una sollecitazione che comporta una flessione del sensore, le molteplici lamelle costituenti le armature del condensatore subiscono uno spostamento che, anche se minimo, provoca una variazione della capacità misurata.

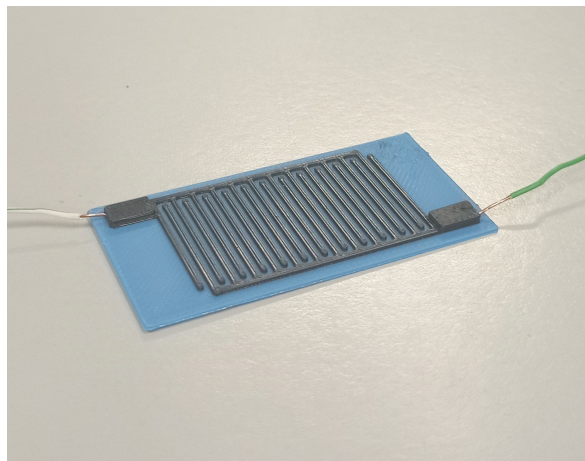


Figura 4.3: Sensore di flessione

Dato il fatto che come mezzo dielettrico si utilizza l'aria, per produrre un condensatore che abbia una capacità opportuna (alcune decine di pF), è necessario creare le "lamelle" delle armature con un'altezza considerevole rispetto alle altre dimensioni. Seguendo tale concetto le lamelle del condensatore, trasversali alla dimensione maggiore del sensore vengono incrementate in altezza. Così facendo l'area della singola lamella risulta maggiorata senza compromettere la flessibilità del sensore stesso.

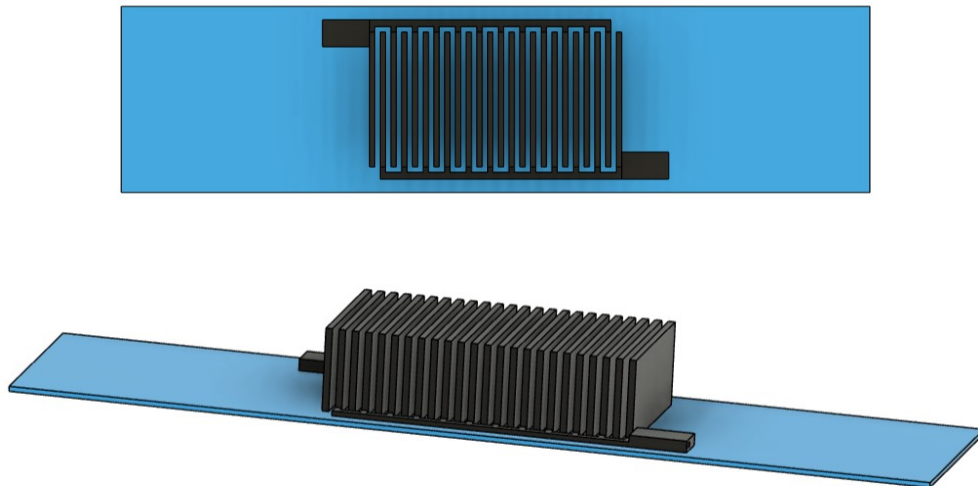


Figura 4.4: Sensore di flessione modificato

Test

Per testare il comportamento di tale sensore esso viene sottoposto ad una prova di flessione. Tale prova si esegue mediante l'impiego della macchina Instron 68SC-5, con la quale si sollecitano a flessione i diversi provini.



Figura 4.5: Setup prova di Flessione

Per il test si dispone la macchina con gli appositi supporti per eseguire la prova, vedi fig. 4.5. Si nota che l'attrezzo per imprimere il carico è stato fornito di una copertura in PLA per minimizzare la distorsione di capacità misurata, dovuta alla presenza del metallo in diretta prossimità del condensatore.

La prova si svolge nel seguente modo: dopo aver posizionato il provino e averlo collegato al multimetro per effettuare la misura, vedi fig. 4.6, lo stesso viene deformato seguendo il ciclo di spostamenti rappresentato in figura fig. 4.7.

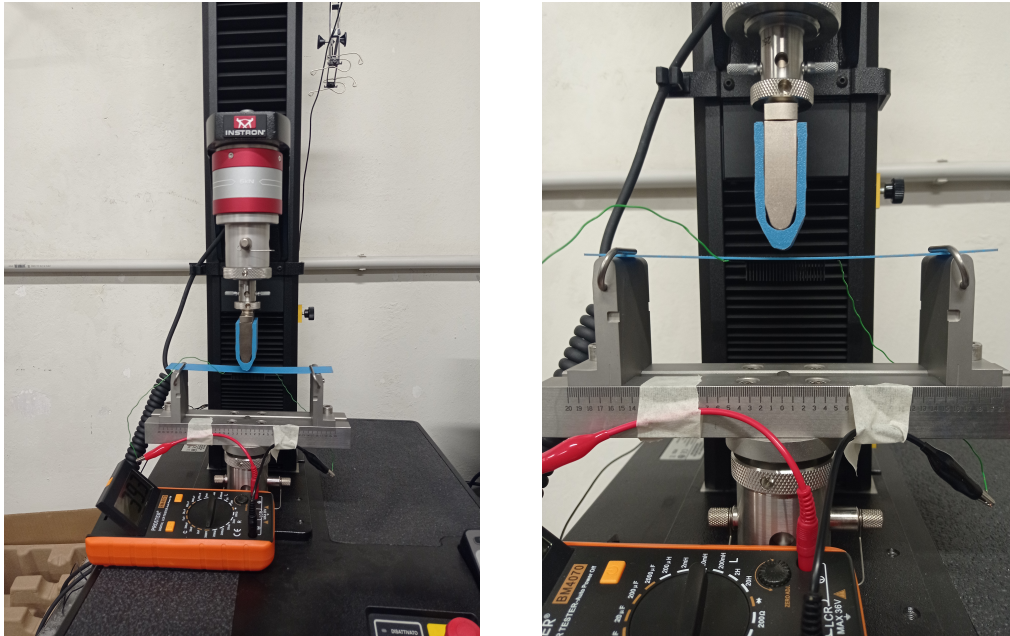


Figura 4.6: Prova Flessione

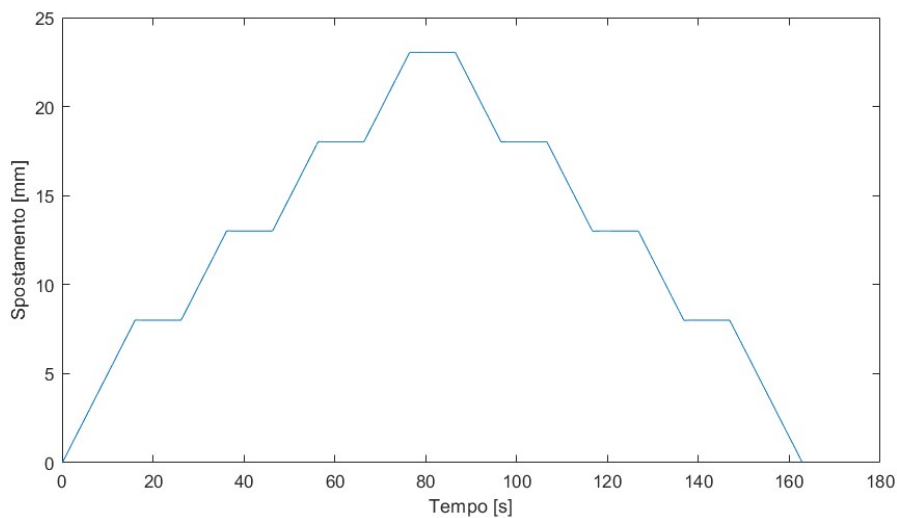


Figura 4.7: Ciclo di spostamento prova di flessione

Il ciclo di spostamenti utilizzato per le prove, e rappresentato in fig. 4.7 si compone di 4 rampe in cui si incrementa di 5 [mm] lo spostamento (8 [mm] per la prima). Lo 0 della prova si trova a 3 [mm] distanza dal provino. Ogni spostamento è separato da un periodo di attesa in cui lo spostamento non viene variato.

Una volta che lo spostamento relativo arriva a 20 [mm], la prova prosegue con una fase di ritorno che rispecchia la fase di andata fino a ritornare alla condizione di partenza.

Mediante il multimetro collegato al provino fig. 4.6, durante i periodi di attesa del ciclo (indicati nel grafico dalle parti piane), si effettua la lettura della misura di capacità relativa allo spostamento indotto, e quindi alla relativa flessione.

Di seguito vengono riportati i dati relativi a tre tipi di provini analizzati:

Provino "Basso"

Questo provino è realizzato senza aumentare l'altezza delle armature, ovvero lo spessore risulta essere di 0.6 [mm].

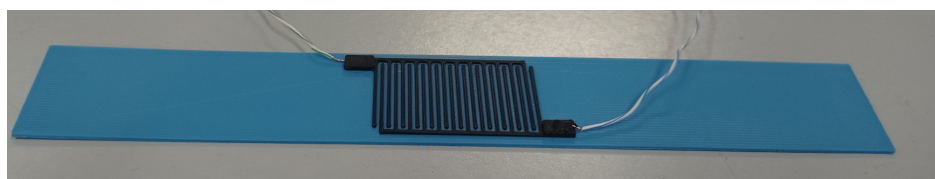


Figura 4.8: Sensore Flessione Basso

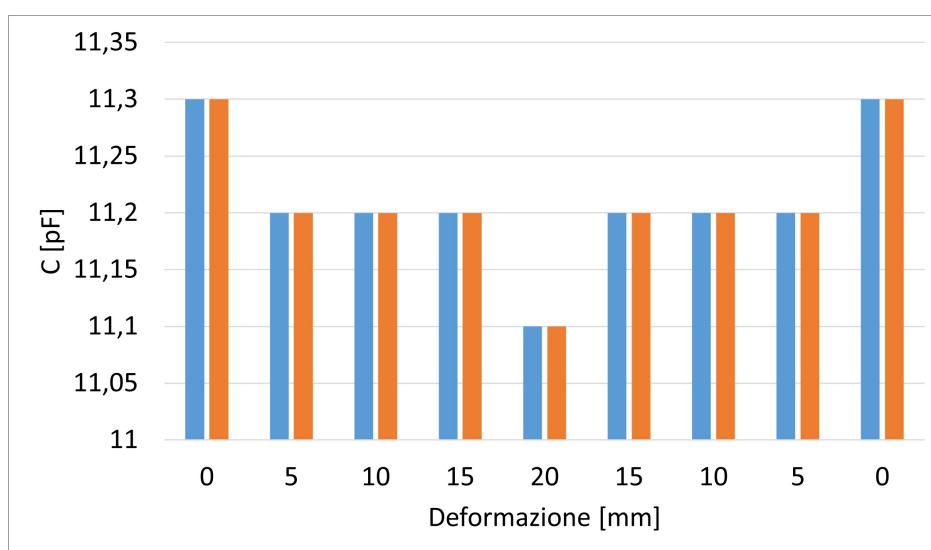


Figura 4.9: Dati Sensore Flessione Basso

Nel grafico in figura fig. 4.9 vengono riportati i dati relativi a due prove (blu e arancione), sull'asse x i valori di spostamento e sull'asse y i valori di capacità.

I risultati ottenuti riportano una minima variazione del valore di capacità (circa 0.2 [pF]) a seguito di di uno spostamento di 20 [mm].

Tale risultato era previsto poiché la minima distanza tra le armature del condensatore non viene pressoché alterata dalla deformazione. Nonostante questo alcune variazioni vengono rilevate.

Probabilmente, utilizzando uno strumento di misura con una soglia di rilevamento più piccola si potrebbe apprezzare maggiormente il comportamento di questo sensore.

Provino "Medio"

Come citato precedentemente, per aumentare il valore di capacità a riposo del condensatore e la variazione durante la deformazione, è stata incrementata l'altezza delle armature a 5 [mm].

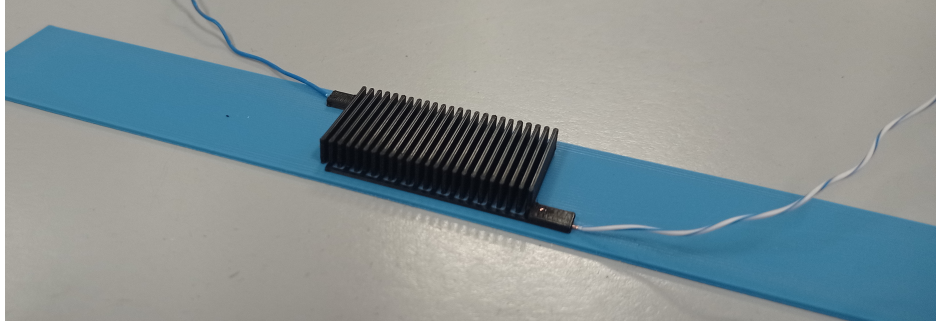


Figura 4.10: Sensore Flessione Medio

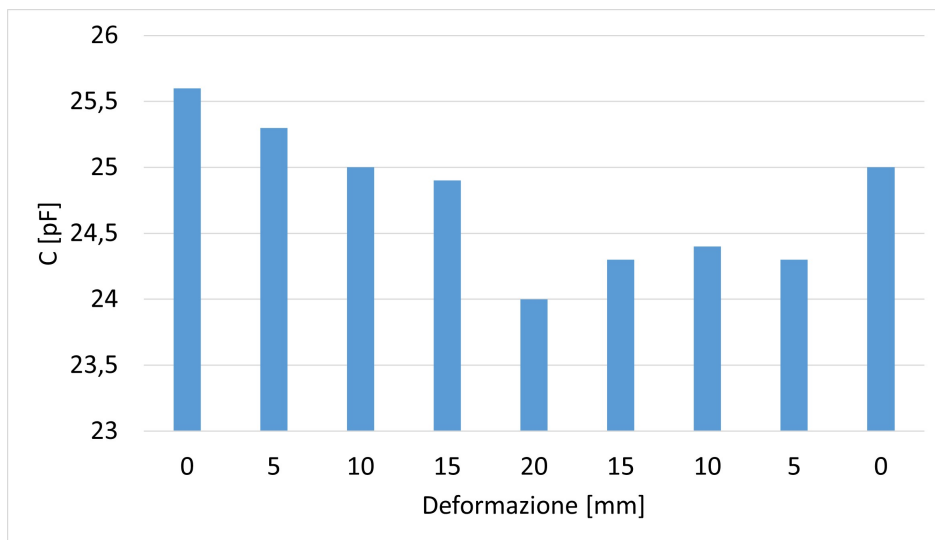


Figura 4.11: Dati Sensore Flessione Medio provino 1

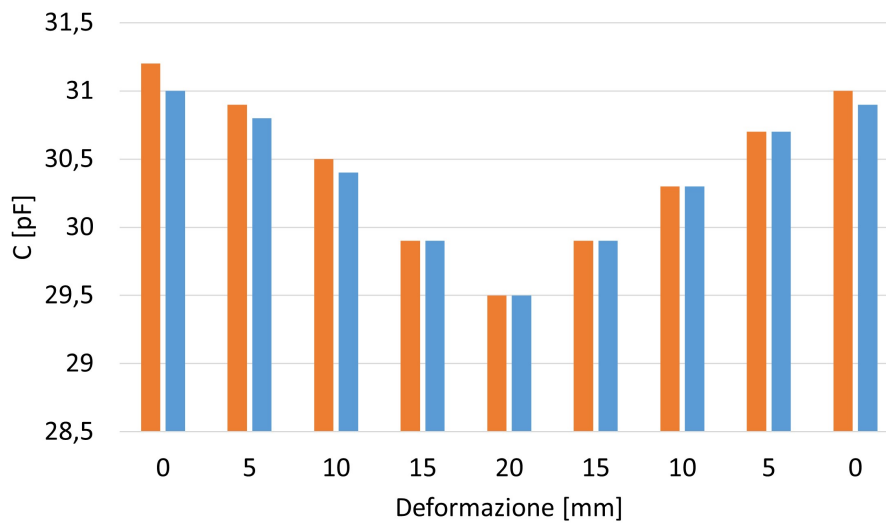


Figura 4.12: Dati Sensore Flessione Medio provino 2

Per questa misura di sensore sono stati realizzati due provini identici. Sono stati sottoposti alla medesima prova ed i risultati ottenuti si possono osservare nei grafici in fig. 4.11, 4.12.

Per il provino 2 sono state effettuate due prove per verificare che il comportamento non mutasse a seguito di ripetizioni successive.

Si può notare come, per il primo provino, la capacità a riposo sia di 25.6 [pF]. L'andamento della capacità misurata risulta seguire le condizioni di deformazione a cui il sensore viene sottoposto.

Si nota come al ritorno i valori non siano esattamente gli stessi rispetto all'andata; tale fenomeno si può attribuire al metodo di misura ed acquisizione utilizzato e alle condizioni dell'esperimento.

Anche per il secondo provino si rileva una capacità a riposo di circa 31 [pF], questo valore differenzia da quello del primo provino per via del fatto che sono stati stampati separati, quindi imperfezioni o differenze tra i due non sono da escludere.

I risultati relativi al secondo provino mostrano che, anche se con alcuni minimi scostamenti, il comportamento del sensore sottoposto a più cicli di sollecitazione risulta circa costante.

Si nota come la variazione di capacità sia di circa 0.5 [pF] ogni 5 [mm].

Provino "Alto"

Come ultimo provino, per il testing della risposta a flessione, si utilizza un condensatore con un'altezza delle armature di 10 [mm].

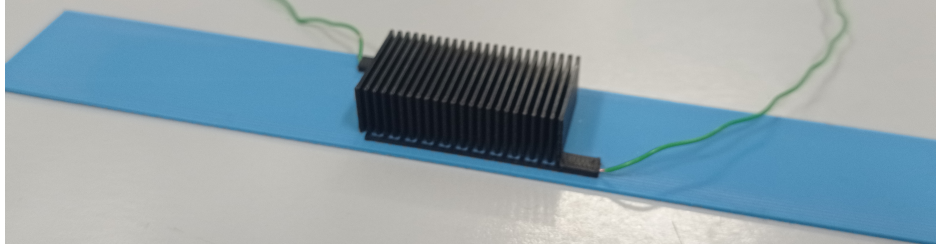


Figura 4.13: Sensore Flessione Alto

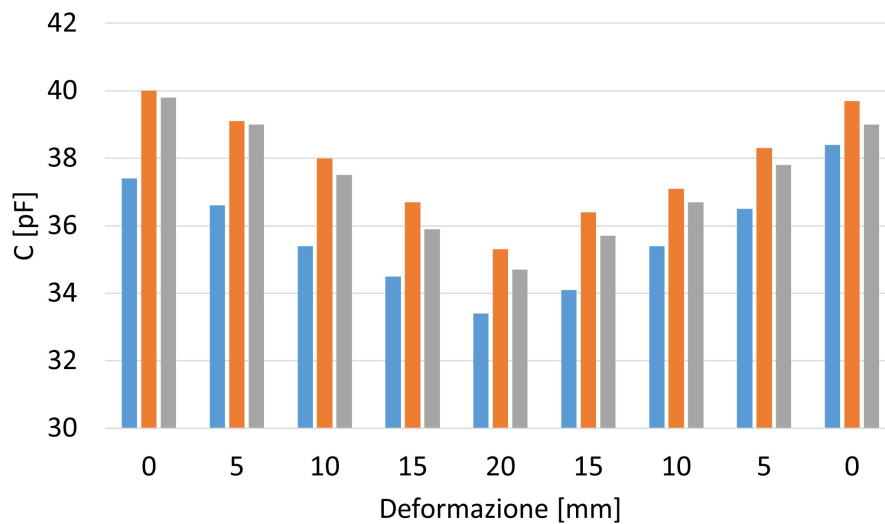


Figura 4.14: Dati Sensore Flessione Alto

Le prove effettuate per questo provino sono state 3, infatti si è voluto accertare l'andamento della misurazione poiché, con tale sensore, si può meglio apprezzare la variazione di deformazione.

Partendo da una capacità di circa 40 [pF], a riposo, ogni spostamento di 5 [mm] provoca una variazione di circa 1 [pF] o poco più.

Questi risultati confermano l'assunzione fatta in precedenza, ovvero l'aumento di area delle armature provoca un aumento di capacità misurabile; ed inoltre un aumento nell'incidenza della deformazione sulla misura.

A seguito di questi esperimenti, risulta evidente che il sensing della flessione mediante tale desing di sensori è possibile anche se con alcune limitazioni.

4.2.2 Sensore Capacitivo di Posizione

Si vuole realizzare un sensore di posizione che sfrutti la variazione di capacità misurata tra due armature per misurare lo spostamento relativo tra le armature stesse.

Il design del sensore viene riportato in fig. 4.16, si tratta di un semplice condensatore piano con le due armature realizzate in modo che possano sovrapporsi scorrendo lungo l'asse longitudinale.

La geometria della armature presenta dei vuoti (9 con dimensioni 4 x 36 [mm]) che verranno discussi in seguito. Per il collegamento allo strumento di misura, sono stati inseriti, in fase di stampa, dei cavi di rame con la stessa tecnica spiegata nelle sezioni precedenti.

Di seguito viene riportata la geometria utilizzata per realizzare il sensore:



Figura 4.15: Dimensioni Sensore Posizione



Figura 4.16: CAD del Sensore di Posizione

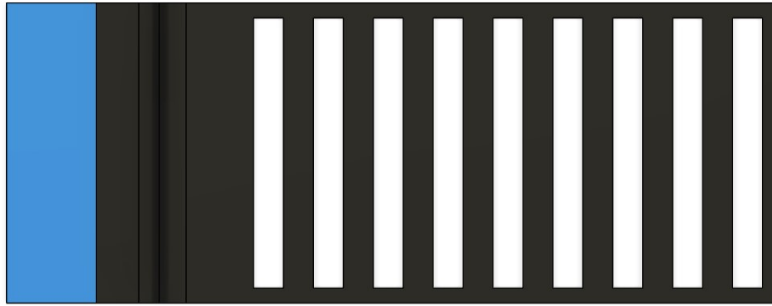


Figura 4.17: Vista supplementare del design

Scopo di questa prova è osservare meglio il comportamento capacitivo al variare dello spostamento relativo delle armature, e verificare se questo possa essere trasposto nel design di un sensore che si basa su questo principio.

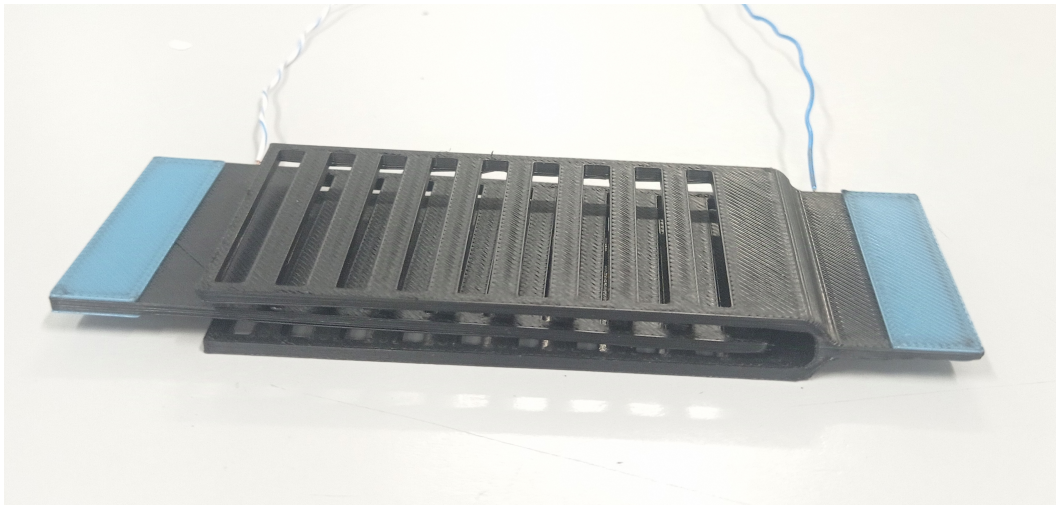


Figura 4.18: Sensore di Posizione

Test

Anche in questo caso il sensore viene collegato al multimetro LRC per raccoglierne i dati.

Il test a cui si sottopone questo sensore si avvale dell'impiego del macchinario Instron 68SC-5 fig. 4.19. La prova consiste nel avvicinare o allontanare le due armature del condensatore utilizzando la macchina, in grado di compiere spostamenti con alta precisione.



Figura 4.19: Setup Prova di Posizione

Per semplicità, nella realizzazione della prova, si inizia mantenendo le armature del sensore sovrapposte per una lunghezza di 2 [mm]. Successivamente si inizia a spostare una delle armature con una progressione di 0.25 [mm/s], fino ad arrivare ad una lunghezza di 72 [mm]. Nel mentre si raccolgono i valori di capacità ogni 2 [mm]; successivamente viene elaborato il grafico in figura fig. 4.20.

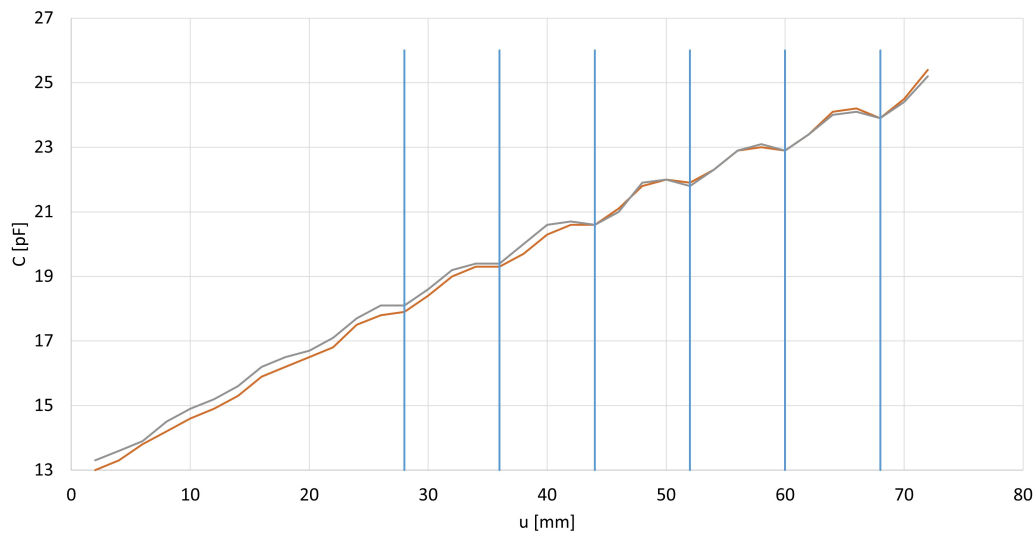


Figura 4.20: Dati Sensore di Posizione

Grazie al grafico riportato in figura fig. 4.20, si può osservare l'andamento della capacità del sensore al variare della posizione.

Per valori di sovrapposizioni piccoli (sotto i 30 [mm] circa), si osserva un comportamento lineare. Tale andamento è in linea con le aspettative poiché, all'aumentare della lunghezza per la quale le due armature vengono sovrapposte, aumenta l'area effettiva del condensatore e di conseguenza la capacità misurata.

Tuttavia, superata questa prima soglia si osserva che periodicamente la capacità smette di aumentare con lo spostamento e anzi diminuisce leggermente. Questo fenomeno deriva dalla geometria con cui le armature del condensatore sono state realizzate.

Infatti, sono state inserite delle asole all'interno delle armature. Queste asole inseriscono dei vuoti nell'area delle armature, così facendo si verificano delle oscillazioni nella misura di capacità man mano che le armature si spostano tra di loro.

Le asole inserite sono larghe 4 [mm], e si nota come l'intervallo di "oscillazione" abbia una lunghezza di 8 [mm].

Tale caratteristica è stata inserita per aumentare la variazione di capacità al variare della posizione relativa delle armature, in modo tale da incrementare la percezione della variazione di posizione rilevabile dal sensore.

In questo modo si può utilizzare il sensore per effettuare un controllo più localizzato sulla posizione. La possibilità di modificare la geometria delle asole e le loro posizioni permette di adattare la risposta del sensore alle necessità del proprio progetto.

4.2.3 Sensore "Touch-Screen"

Ora si vuole incrementare il livello di complessità e, a tal scopo, si prova a ricreare un componente sensibile al contatto. In questa sezione viene esposto il processo per la realizzazione di una piastra con all'interno molteplici sensori che le permetterebbero di individuare un punto di contatto con un corpo esterno, e localizzarlo con relativa precisione sulla sua superficie.

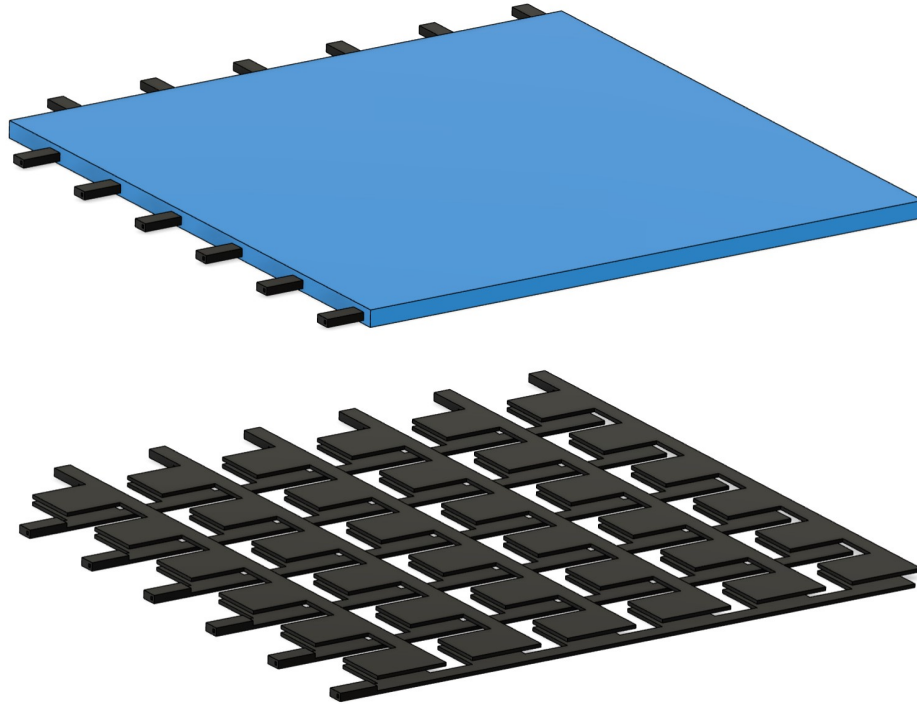


Figura 4.21: CAD del Sensore Touch (sopra), visualizzazione della disposizione delle armature interne (sotto)

Questo sensore si basa sul principio di funzionamento dei moderni schermi touch. Una serie di condensatori, formano una griglia, la quale viene costantemente controllata per verificare dove avvenga il contatto sullo schermo.

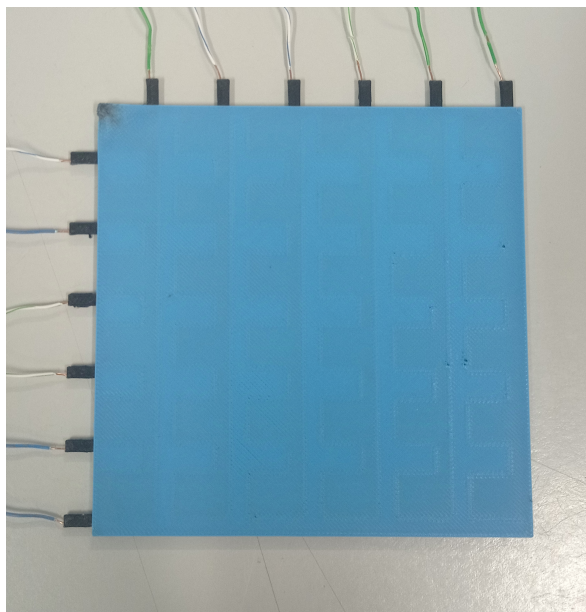


Figura 4.22: Sensore Touch

Il design mostrato in fig. 4.21 propone la creazione della griglia dividendo sia l'armatura positiva sia la negativa in 6 parti ciascuna. Ogni gruppo vede al suo interno 6 quadrati che rappresentano le armature dei sei condensatori relativi per il gruppo in esame.

L'idea era quella di poter alimentare e misurare singolarmente ogni condensatore della griglia, alimentando un gruppo positivo ed un gruppo negativo in sequenza fino a completare la griglia.

Una volta realizzata la piastra e collegata ad Arduino per la lettura, si è notato che il contatto non veniva rilevato. Avendo costruito le armature del condensatore ricoperte da due strati di PLA, risulta che tale copertura è abbastanza da isolare i condensatori ed impedire al contatto di interferire con il campo elettrico del condensatore ed alterarne la capacità.

Per cercare di risolvere questo problema, il design della piastra è stato modificato eliminando gli strati aggiuntivi che ricoprivano le armature.

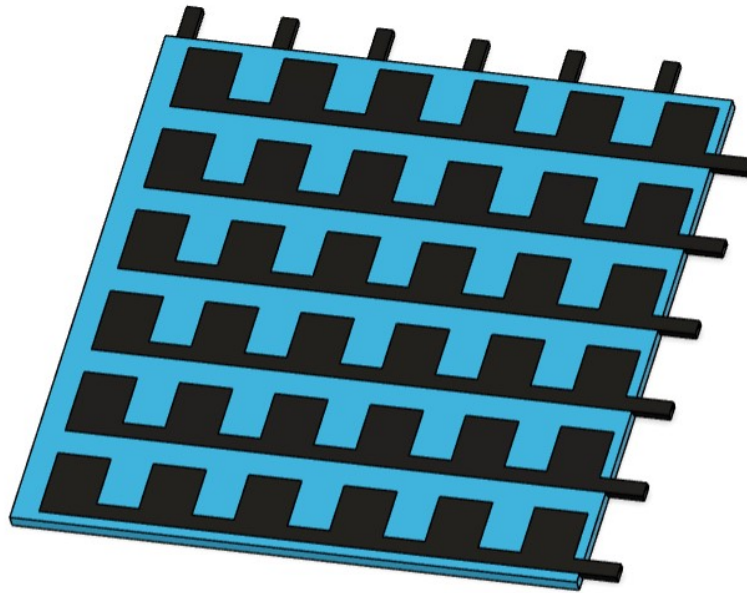


Figura 4.23: Sensore Touch seconda Iterazione

Il contatto diretto con le armature dovrebbe promuovere la variazione di capacità misurata.

Nonostante la modifica effettuata, dopo alcuni test di prova, collegando il prototipo ad un Arduino e sfruttando un codice che implementasse il tipo di controllo precedentemente spiegato, è stata riscontrata l'infattibilità di questo approccio.

Infatti, nonostante da codice venisse sollecitato ed interpellato un condensatore per volta, la costituzione delle armature provocava un'interferenza tra i condensatori ed un relativo errore nella misura.

A seguito di questi risultati, ispirandosi agli studi compiuti da Gary Barrett e Ryomei Omote riportati nell'articolo [26], ed al lavoro svolto da Ik-Seok Yang e Oh-Kyong Kwon [25], il design della piastra è stato nuovamente modificato.

Prendendo anche in considerazione l'esperienza raccolta con i due prototipi precedenti, il design viene modificato nel seguente modo.

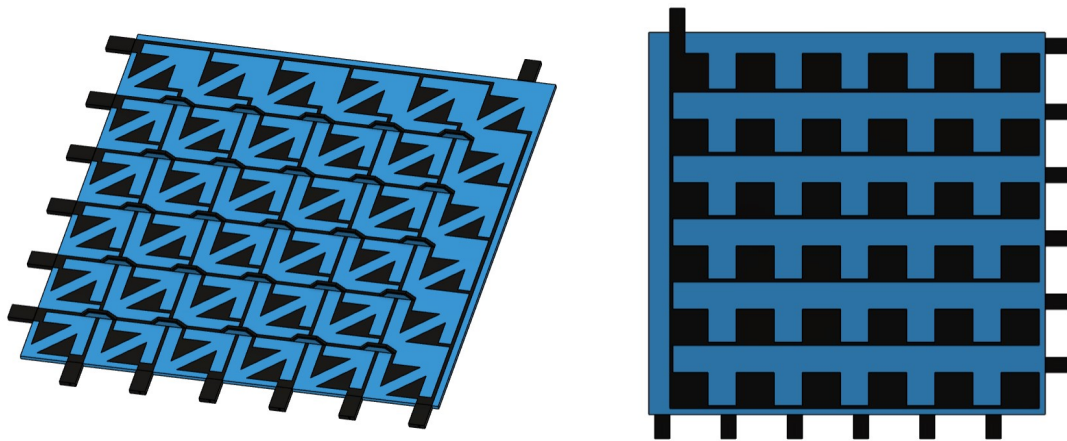


Figura 4.24: Sensore Touch V2

L'armatura negativa (fig. 4.24 a destra) viene messa in comune per tutti i condensatori. Successivamente, le armature positive vengono divise in due gruppi principali, ovvero i due assi x e y (fig. 4.24 a sinistra).

I due assi vengono evidenziati nella fig. 4.25, asse x in rosso e asse y in verde; ognuno di essi è composto da 6 diverse armature

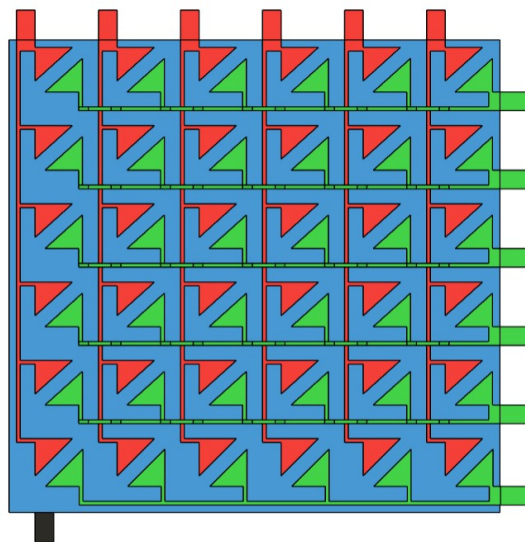


Figura 4.25: Sensore Touch con Assi Evidenziati

Test

Per testare il corretto funzionamento della piastra "touch" prodotta, la stessa viene collegata ad una scheda Arduino Mega, in modo tale da usufruire di 12 pin analogici per i collegamenti.

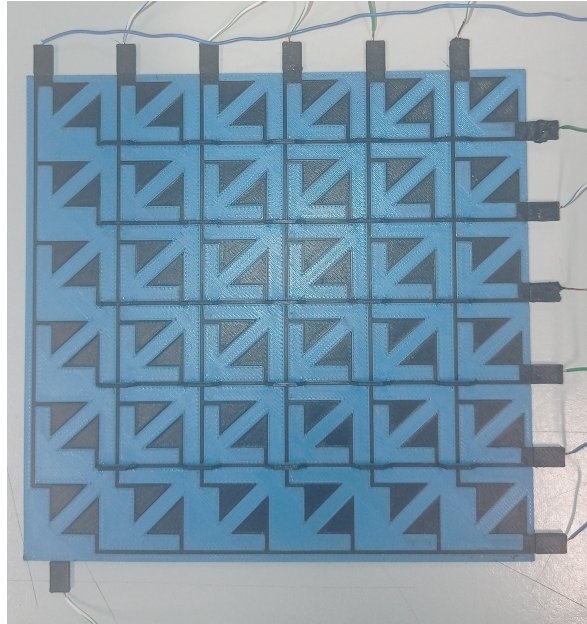


Figura 4.26: Sensore Touch

Tramite un codice apposito (vedi appendice A) i diversi gruppi di condensatori vengono controllati costantemente dalla scheda. Il programma si occupa, all'accensione, di campionare le diverse capacità dei gruppi di condensatori e le memorizza come valori di riferimento. Il campionamento si basa semplicemente sul memorizzare il valore minimo di capacità misurata nel corso di un numero definito di prove.

Infatti, quando avviene il contatto con le dita, la capacità complessiva (armatura + essere umano) si abbassa. Quindi memorizzare il valore di capacità minima dovrebbe migliorare la precisione dell'intero sistema

Subito dopo inizia il monitoraggio continuo dei gruppi di condensatori sui due assi. Per ogni gruppo (asse x e asse y), Arduino effettua una comparazione tra il valore memorizzato e quello misurato sul momento. Se viene rilevato un valore più basso di quello memorizzato (ergo avvenuto contatto), viene memorizzata la posizione del condensatore e continua il controllo completando i due assi.

Alla fine del ciclo, Arduino comunica tramite porta seriale restituendo 36 valori; tutti 0 tranne quelli corrispondenti alle posizioni dei condensatori "toccati", salvate durante il controllo.

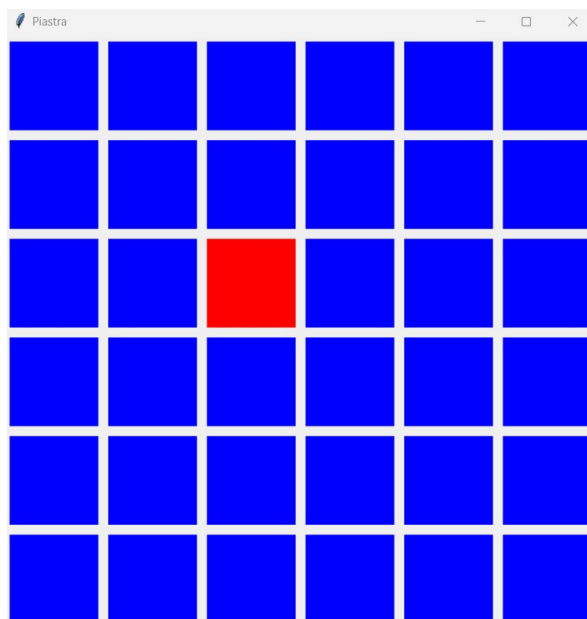


Figura 4.28: Rappresentazione virtuale della piastra toccata (posizione C3)

Per meglio riportare i risultati relativi al test di questo sensore viene prodotto un grafico che riposta i valori relativi per la capacità delle diverse armature, identificate come canali.

Le capacità vengono misurate tramite Arduino Mega e sono normalizzate rispetto al valore di riferimento precedentemente misurato nella fase di calibrazione.

Il codice si occupa, successivamente di leggere e distanziare le misurazioni in relazione a quale armatura esse si riferiscono e creare il grafico in fig. 4.29.

Di seguito viene riportato il grafico relativo ai dati raccolti sollecitando in successione i condensatori nelle posizioni riportate in tabella 4.1.

Tabella 4.1: Posizioni toccate durante il test del sensore

| n | YX | n | YX |
|-----|----|-----|-------|
| 1 | A1 | 11 | E4 |
| 2 | A3 | 12 | B2 |
| 3 | A4 | 13 | C3 |
| 4 | A6 | 14 | D4 |
| 5 | B1 | 15 | E5 |
| 6 | D1 | 16 | F6 |
| 7 | E1 | 17 | F4 |
| 8 | F1 | 18 | D2 |
| 9 | F3 | 19 | B5 |
| 10 | F5 | 20 | C6 C1 |

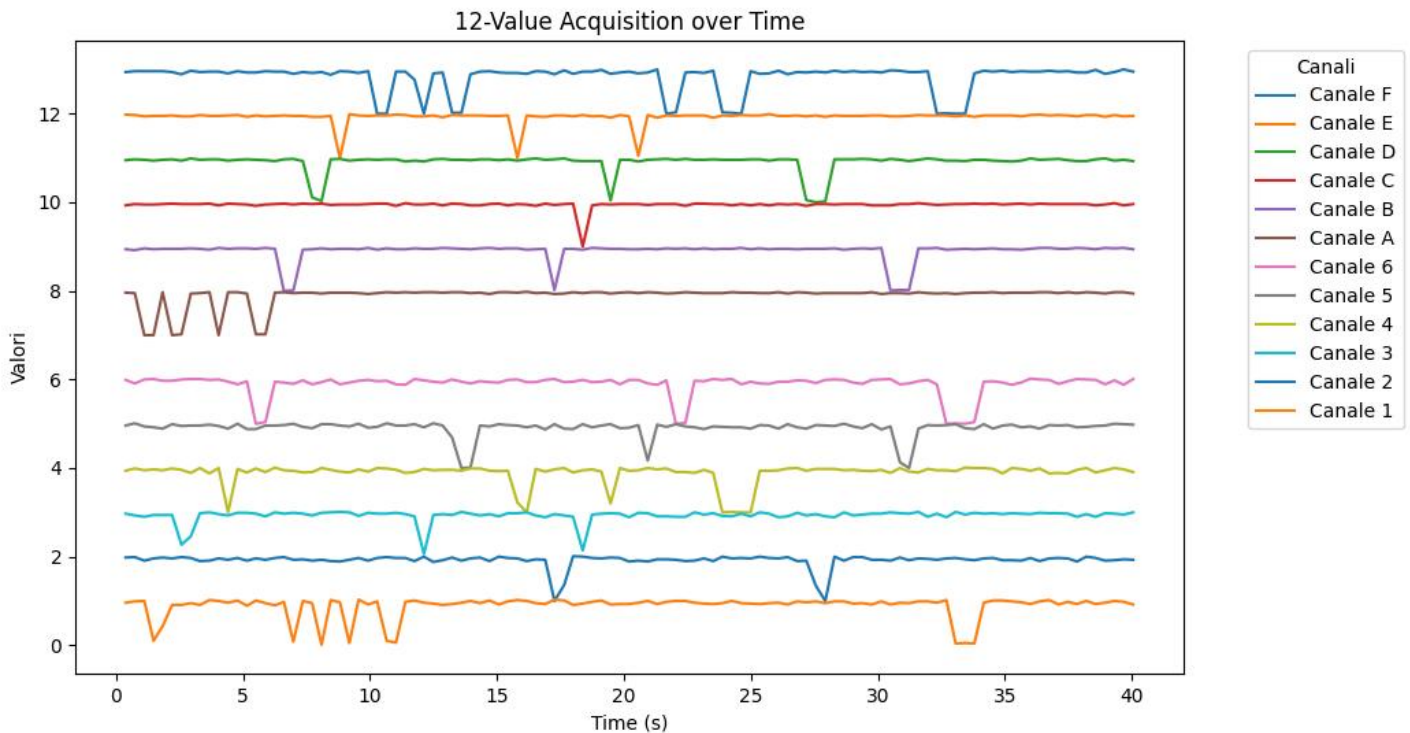


Figura 4.29: Dati raccolti durante la prova relativi ai diversi canali/armature

A seguito di alcuni test, si accerta che il prototipo così realizzato si comporta come previsto.

Nell'arco dei circa 40 secondi di durata della prova, le variazioni osservate nel grafico rispecchiano la successione di condensatori proposta in tabella 4.1.

Seguendo la lista in tabella 4.1 ed osservando il grafico in fig. 4.29 con i dati raccolti, si può notare come ogni scostamento provocato sul segnale di ogni armatura corrisponda alle posizioni sollecitate; bisogna ovviamente prendere in considerazione le coppie di canali (x: numeri e y: lettere) che presentano nel medesimo istante uno scostamento dal loro valore di riferimento.

Anche nell'ultimo caso, in cui si sollecitano due condensatori simultaneamente, il contatto multiplo viene registrato correttamente.

Si nota, inoltre, come il picco a scendere provocato dal tocco abbia una forma più o meno a "punta", questo poiché è influenzato dal tempo per il quale il contatto si prolunga; più repentino è il tocco e meno piatto sarà il picco.

Modificando alcuni parametri all'interno del codice è stato possibile anche velocizzare la raccolta dati, da parte di Arduino, con un notevole miglioramento del tempo di risposta.

Si nota inoltre come il tocco di due o più dita venga rilevato con relativa precisione, a patto che esse rimangano su di un solo asse. Se si verificano più tocchi su più di un asse, si creano dei tocchi fantasma. Questo risulta essere un difetto derivante dal

design del sistema di Sensing.

Successivamente alle prove effettuate, il design della piastra è stato nuovamente modificato per facilitare il collegamento con l'apparato elettronico, responsabile della lettura ed elaborazione dati.

Sono stati sostituiti i collegamenti per i fili con dei condotti conduttivi, che riportano i diversi collegamenti in un'unica posizione, fig. 4.30.

Il collegamento dei cavi, alla piastra, avviene secondo una forma di "saldatura". Si riscalda il cavo da inserire e la zona di PLA conduttivo corrispondente. Una volta che il materiale è sufficientemente malleabile si immerge il cavo e si lascia raffreddare.

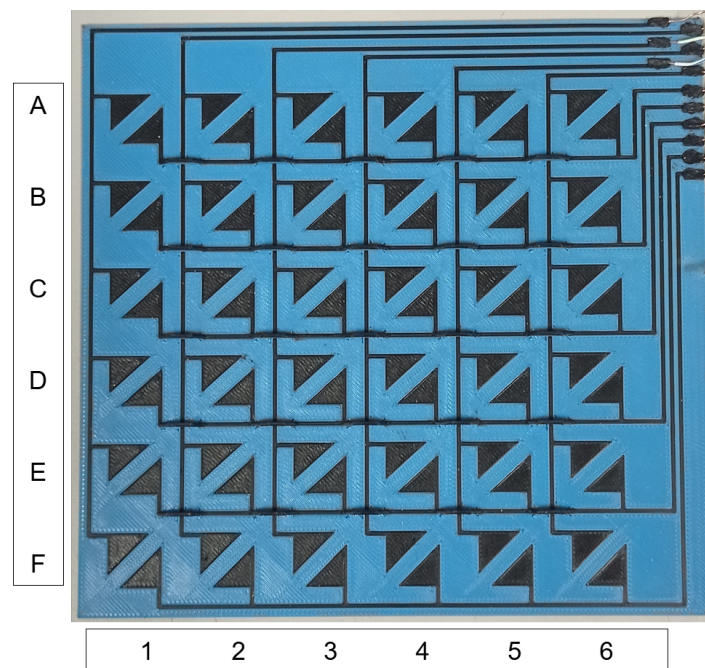


Figura 4.30: Design finale per il Sensore Touch

Questa metodologia di collegamento è stata scelta, in questa fase finale di prototipazione, poiché ritenuta più comoda e veloce. Inoltre risulta più efficiente, in eventuali casi di guasti o rapide manutenzioni.

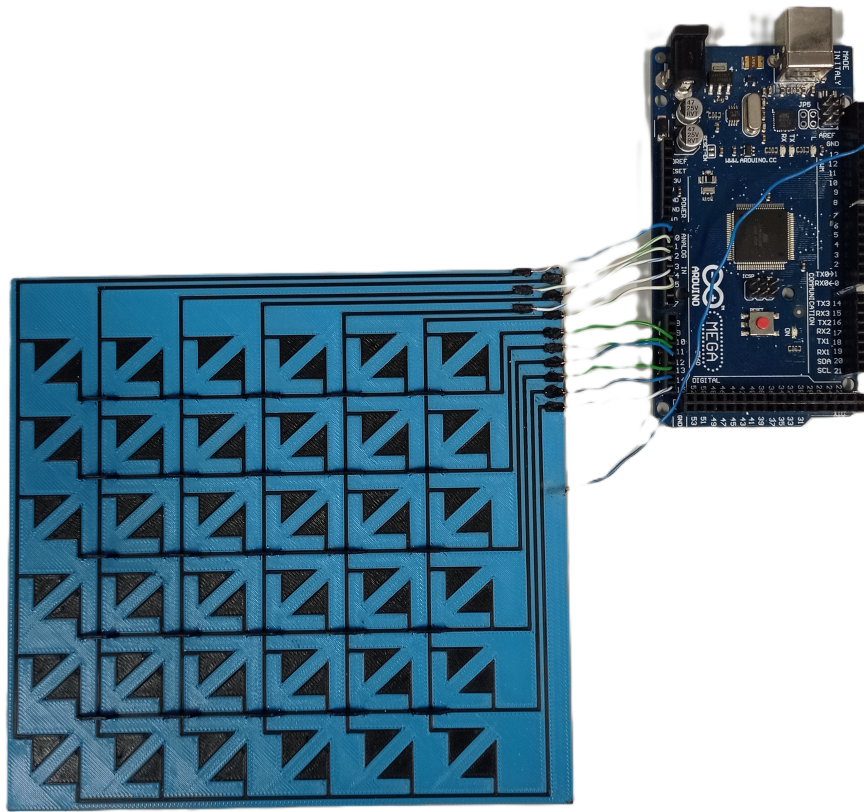


Figura 4.31: Collegamento piastra con Arduino

4.2.4 Sensore Forza

Si vuole realizzare adesso un componente in grado di tradurre la variazione di capacità in una misura di Forza impressa sul sensore.

Per fare ciò si utilizza sempre l'espedito di variare la capacità di un condensatore, il quale costituisce il sensore. Questa variazione di capacità è ottenuta grazie alla variazione di distanza tra le armature, provocata dall'applicazione di una forza che altera la geometria del sensore stesso.

Design

Per implementare il sensing di una forza, viene realizzato un sensore con una geometria in grado di tradurre l'applicazione della sollecitazione in una variazione di spostamento. Al fine di misurare forze di un certo valore, il design (riportato in fig. 4.32) del sensore deve essere in grado di associare ad una forza, anche piccola, una deformazione apprezzabile.

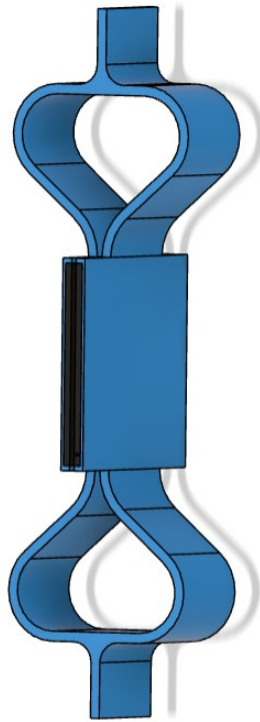


Figura 4.32: Design Sensore di Forza

Per tale motivo le armature del condensatore vengono inglobate nella struttura a forma di clessidra. Tale geometria dovrebbe promuovere la variazione di distanza tra le armature, e quindi la capacità del sensore, mentre viene sollecitato nella direzione trasversale alle armature.

Le armature realizzate, in questo sensore, hanno dimensioni $40 \times 40 \times 1.4$ [mm]. L'area complessiva delle armature così prodotte risulta essere: $A_0 = 1.6 \cdot 10^{-3} [m^2]$.

La distanza, a riposo, tra le armature è pari a 1 [mm] circa ed è occupata da aria. In questa configurazione il condensatore non sollecitato dovrebbe possedere una capacità di circa 14.2 [pF].

FEM

Prima di realizzare e testare sperimentalmente il sensore ideato, si sottopone il design ad una fase di verifica FEM.

Utilizzando un semplice software per la simulazione viene importata la geometria del sensore; i dati del materiale utilizzati nel programma vengono riportati nella tabella 4.2.

Tabella 4.2: Dati materiale per simulazione FEM

| E [GPa] | ρ [g/cm^3] | Y [MPa] |
|---------|---------------------|---------|
| 3 | 1.24 | 47 |

Le condizioni di carico utilizzate sono: un vincolo che imiti il supporto vincolante a cui il sensore è collegato (vedi fig. 4.36), ed una forza applicata durante la prova.

Durante le simulazioni vengono utilizzati diversi valori di forza per simulare il comportamento del sensore durante l'applicazione di un carico crescente. Questi valori sono riportati insieme a quelli relativi allo spostamento e alla capacità previsti. Per calcolare la capacità prevista per il sensore si utilizza la seguente equazione (eq. 4.3)

$$C(u) = \frac{\epsilon_0 A}{(1 + u)/1000} \quad (4.3)$$

Dove u indica lo spostamento relativo tra le armature del sensore sollecitato, in millimetri ed 1 è la distanza iniziale tra le armature. Di seguito si riportano i risultati delle simulazioni in termini di forza utilizzata e spostamento relativo:

Tabella 4.3: Risultati Simulazione FEM

| F [N] | u_x [mm] | C [pF] |
|-------|------------|--------|
| 5 | 0.8459 | 7.7 |
| 10 | 1.692 | 5.3 |
| 20 | 3.384 | 3.2 |
| 30 | 5.075 | 2.3 |

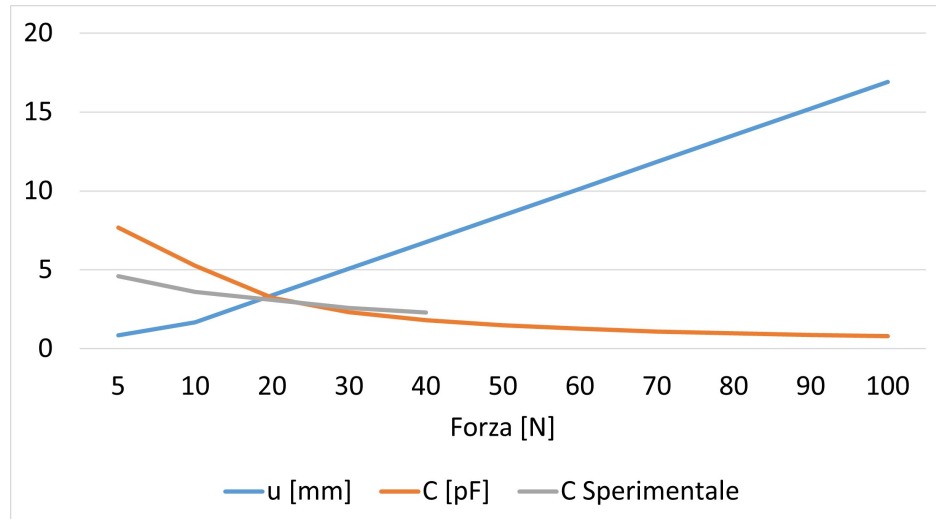


Figura 4.33: Grafico dei dati relativi a spostamenti e capacità calcolate per l'analisi FEM e i risultati sperimentali

I valori di capacità così calcolati sono ricavati non tenendo in considerazione imperfezioni della stampa, effetti di bordo del condensatore, possibili alterazioni della misura derivanti dal metodo di acquisizione.

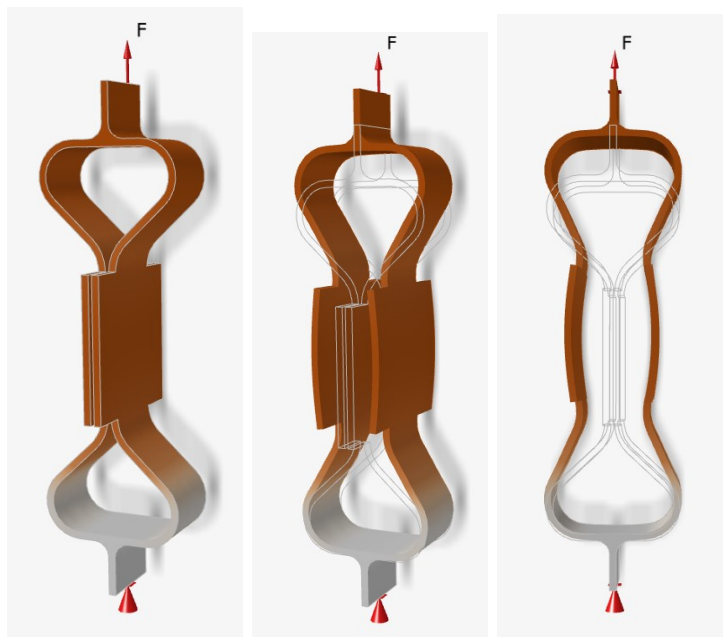


Figura 4.34: Visualizzazione Deformazione Prova FEM

Nella figura fig. 4.34 si possono osservare i diversi stadi di deformazione a cui il sensore va incontro durante la deformazione.

Come previsto, la sollecitazione deforma il sensore provocando un allontanamento delle armature. Nella figura questa deformazione è accentuata rispetto alla realtà per meglio rappresentare il modo di deformazione.

Test

Una volta condotte le simulazioni e confermata la geometria del sensore, si procede a realizzare e testare lo stesso.

Il sensore viene stampato mantenendo le armature parallele al piano di stampa, fig. 4.35. In questo modo risulta più semplice inserire i cavi per i successivi collegamenti, ed il materiale di scarto, dovuto al cambio tra un filamento e l'altro, viene tenuto al minimo.

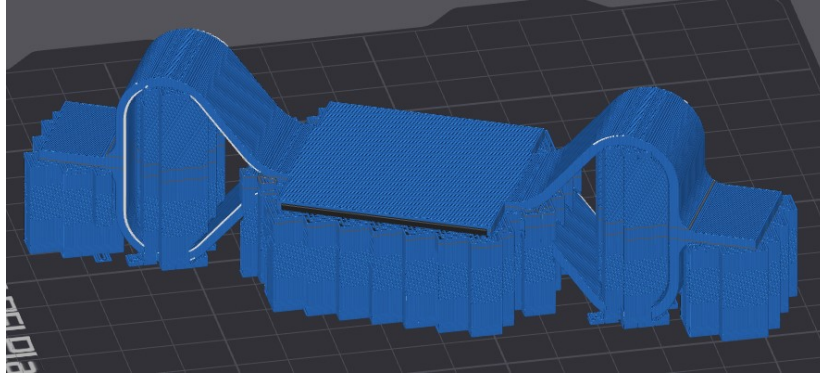


Figura 4.35: Rappresentazione della stratificazione prodotta dallo slicer

Tuttavia, stampare il componente in questo modo, non è favorevole allo stato di sollecitazione a cui verrà sottoposto. Orientare gli strati in modo tale che essi siano paralleli alla direzione di applicazione della sollecitazione (in altre parole tagliare per lungo il componente), risulterebbe in una soluzione più resistente.

Prendendo in considerazione questa criticità ed i risultati ottenuti dalle simulazioni, è stato deciso comunque di stampare il sensore nel modo descritto in precedenza; così facendo viene risparmiato tempo e materiale.

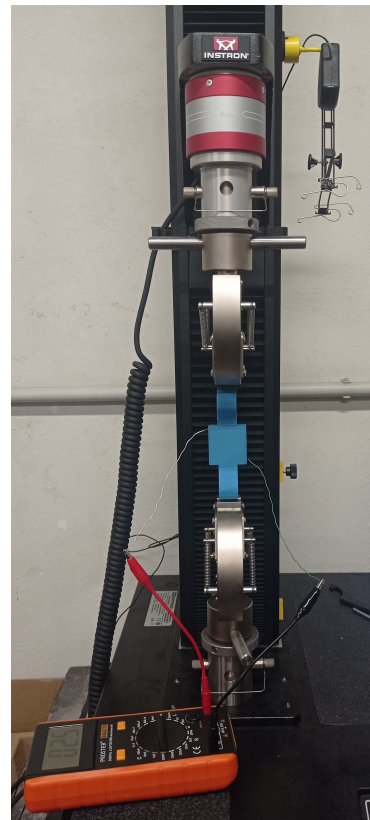


Figura 4.36: Setup Prova del Sensore di Forza

La prova si svolge nel seguente modo: una volta inserito il sensore nella macchina e bloccato nei supporti fig. 4.36, si procede imponendo una serie di spostamenti interposti da periodi di attesa per leggere la misura.

La prova viene effettuata 3 volte per verificare che il comportamento del sensore si mantenga stabile in condizioni di sollecitazioni cicliche.



Figura 4.37: Prova Sensore di Forza

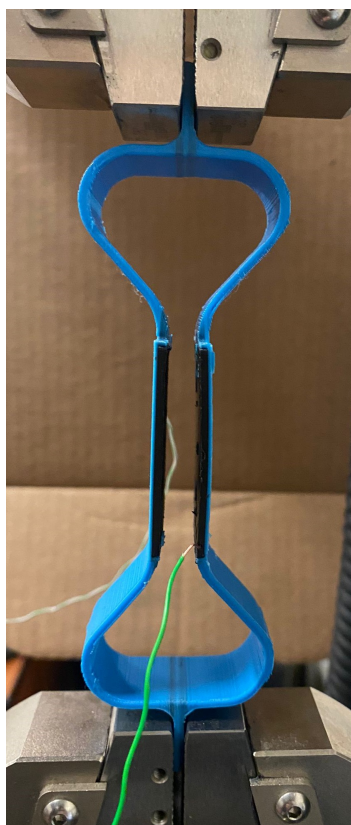


Figura 4.38: Deformazione Sensore di Forza

Una volta concluse le prove, vengono riportati i risultati ottenuti nel grafico in fig. 4.39 di seguito.

Tabella 4.4: Dati raccolti per le 3 prove del sensore di forza

| u [mm] | F1 [N] | F2 | F3 | F media | C [pF] |
|--------|--------|------|------|---------|--------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4.6 |
| 1 | 7.2 | 7.3 | 7.1 | 7.2 | 3.6 |
| 2 | 15.0 | 14.5 | 14.3 | 14.6 | 3.1 |
| 3 | 23.6 | 22.9 | 22.6 | 23.0 | 2.6 |
| 4 | 33.1 | 32.5 | 32.3 | 32.6 | 2.3 |

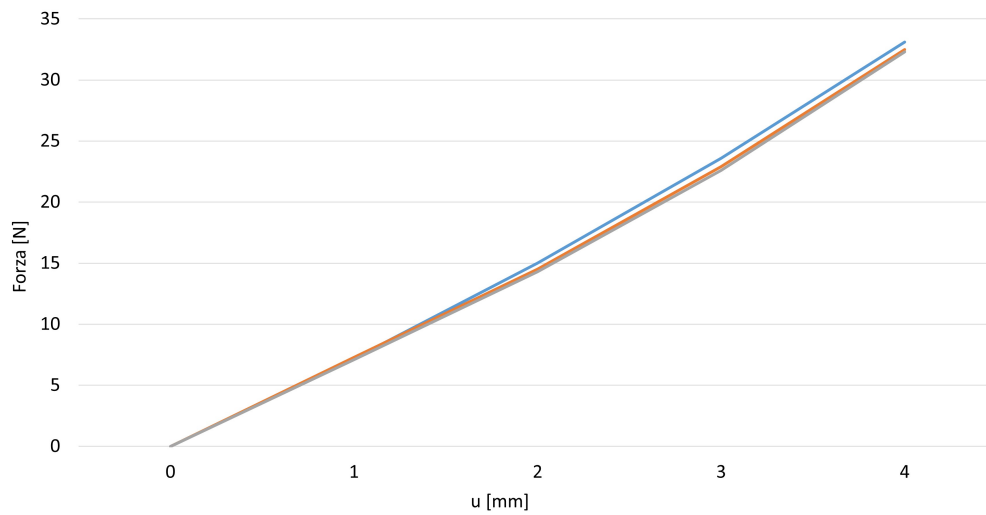


Figura 4.39: Grafico Forza / Spostamento misurata durante la prova

Vengono riportati inoltre i valori di capacità misurati, relativi alle forze applicate durante la prova.

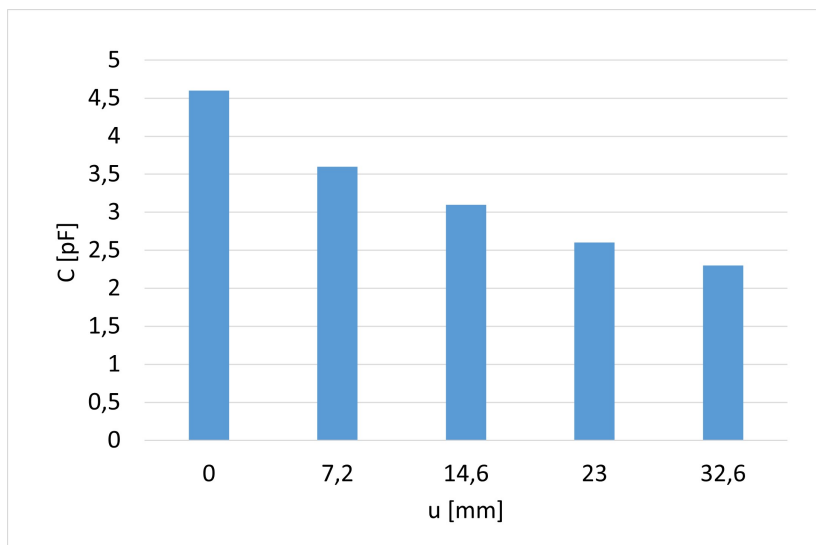


Figura 4.40: Capacità misurata durante la prova

Come si può notare, osservando i grafici in fig. 4.39 e 4.40, il comportamento del sensore non è perfettamente lineare. Sia per la forza che per la capacità, si osserva un lieve scostamento dalla linearità.

Tale fenomeno si può attribuire alla geometria del sensore stesso, e allo stato di sollecitazione. Man mano che la forza applicata sul sensore aumenta, la deformazione del sensore stesso cresce. Questo provoca il mutamento degli angoli interposti tra la perpendicolare alle armature e gli elementi di collegamento alle stesse. La variazione della geometria provoca una variazione nel modo di deformarsi del sensore e la relativa variazione osservata nei dati.

Tuttavia si nota come, confrontando i dati raccolti per via sperimentale con quelli ricavati dalla simulazione, incrementando il valore di forza applicata i risultati sperimentali si avvicinano a quelli calcolati (fig. 4.33).

Questa caratteristica suggerisce che le eventuali distorsioni presenti all'inizio della prova risultano sempre meno influenti all'aumentare della sollecitazione.

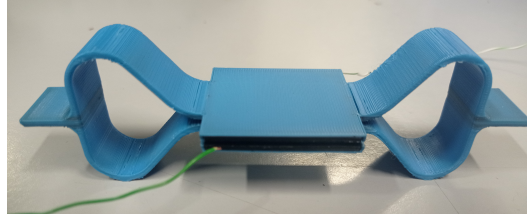
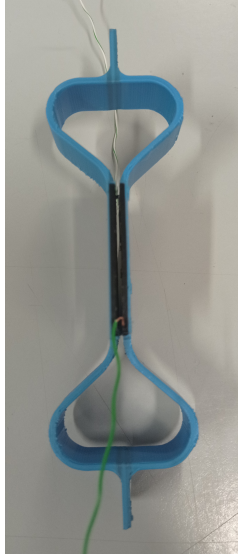


Figura 4.41: Sensore di Forza

Come ultimo punto viene discusso il Gauge Factor (GF) del sensore; riferendosi ai valori ricavati dagli esperimenti fatti il GF è stato calcolato utilizzando la seguente eq. 3.2.

$$GF = \frac{\frac{\Delta C}{C_0}}{\frac{\Delta u}{u_0}} \quad (4.4)$$

Considerando che:

$$\Delta C = C - C_0 = 4.6 - 2.3 = 2.3[pF] \quad (4.5)$$

e che $\Delta u = 4[mm]$, avendo u_0 pari a 100 [mm].

Si ottiene di conseguenza un valore di GF pari a 12.5.

Conclusioni

5.1 Materiale Conduttivo

Alla luce degli studi effettuati, si riconosce la possibilità di produrre, mediante la stampa 3D componenti con capacità di Sensing. L'impiego di plastiche conduttive permette la realizzazione di particolari con sensori, principalmente di tipo capacitivo.

Lo sviluppo in tale ambito ingegneristico è solo agli inizi, ma i risultati ottenuti nell'arco di questa esperienza forniscono una base di partenza per studi futuri.

Per il momento, le plastiche conduttive stampate si dimostrano largamente utili per applicazioni capacitive, data l'imprevedibilità del comportamento resistivo. Tuttavia, futuri studi potrebbero permettere di, a seguito della modifica della struttura del materiale grezzo o del processo a cui viene sottoposto durante la stampa, di impiegare anche queste proprietà per applicazioni di Sensing e non solo.

5.2 Sensori

I diversi sensori realizzati durante questa esperienza hanno confermato la possibilità di produrre componenti, capaci di sensing, con metodi di stampa 3D anche nello spazio. Infatti, le tecnologie utilizzate per portare a termine gli studi riportati, sono molto vicine al livello di quelle disponibili, ad oggi, nello spazio.

L'uso di semplici stampanti e materiali relativamente disponibili, non impone più alcune delle limitazioni che si osservavano in precedenza.

5.2.1 Sensore Flessione

I sensori di flessione riportati in questo documento, per quanto siano elementari, dimostrano la possibilità di produrre sensori per il rilevamento di deformazioni.

Ovviamente sono necessari alcuni sviluppi in termini di precisione della misura e range di deformazione misurabile; infine si potrebbe esplorare la possibilità di miniaturizzare il sensore a patto di migliorare l'apparato di controllo che effettua la misura.

5.2.2 Sensore Posizione

Il sensore di posizione discusso ha fornito risultati promettenti, nonostante abbia un design minimale.

L'obiettivo di imprimere ad una geometria facilmente stampabile e, di conseguenza, producibile in poco tempo, una capacità di sensing in grado di rilevare la posizione relativa è stato raggiunto.

Anche in questo caso ulteriori studi ed approfondimenti possono migliorare i risultati ottenuti.

5.2.3 Sensore Touch

Per quanto riguarda il sensore touch, si è riusciti a realizzare un semplice prototipo in grado di rilevare in modo relativamente preciso il contatto.

Migliorando il sistema di acquisizione, nello specifico l'apparato che si occupa di misurare e controllare la capacità delle singole armature, sarebbe possibile incrementare ulteriormente le performance di questo sensore.

Oltre a rilevare il contatto umano, è possibile rilevare il contatto con ogni tipo di oggetto costituito con un materiale in grado di disturbare il campo elettrico prodotto dai singoli condensatori.

Inoltre, è possibile modificare il design della piastra secondo le esigenze del progetto in cui si vuole implementare tale sensore. Si potrebbero anche esplorare soluzioni flessibili, utilizzando altri materiali.

5.2.4 Sensore Forza

Il sensore di forza prodotto e testato, ha permesso di raccogliere dati anche per questo tipo di applicazione. Sebbene si basi sempre sullo sfruttamento della variazione della capacità variando la distanza relativa tra le armature; offre comunque una semplice soluzione per incorporare tale capacità di sensing.

Anche in questo caso è possibile migliorare o modificare completamente la geometria del sensore esposto in questo studio, per meglio adattarlo alle esigenze del proprio progetto.

La possibilità di modificare i design proposti secondi i fini delle applicazioni richieste risulta essere sempre valida. Tale aspetto è uno dei più importanti in ambito di stampa 3D per applicazioni Aerospaziali e non solo, per tutti i settori industriali ed ingegneristici.

In futuro si possono portare avanti ulteriori studi per la miniaturizzazione di questi sensori, provando anche altri materiali.

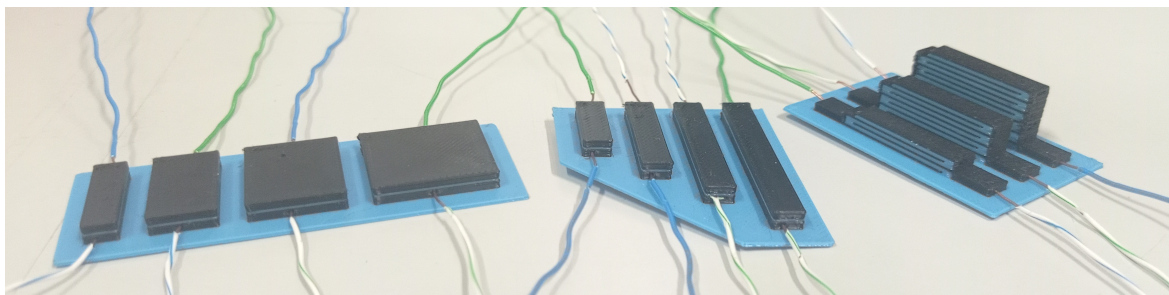


Figura 5.1: Provini per la Caratterizzazione del materiale conduttivo

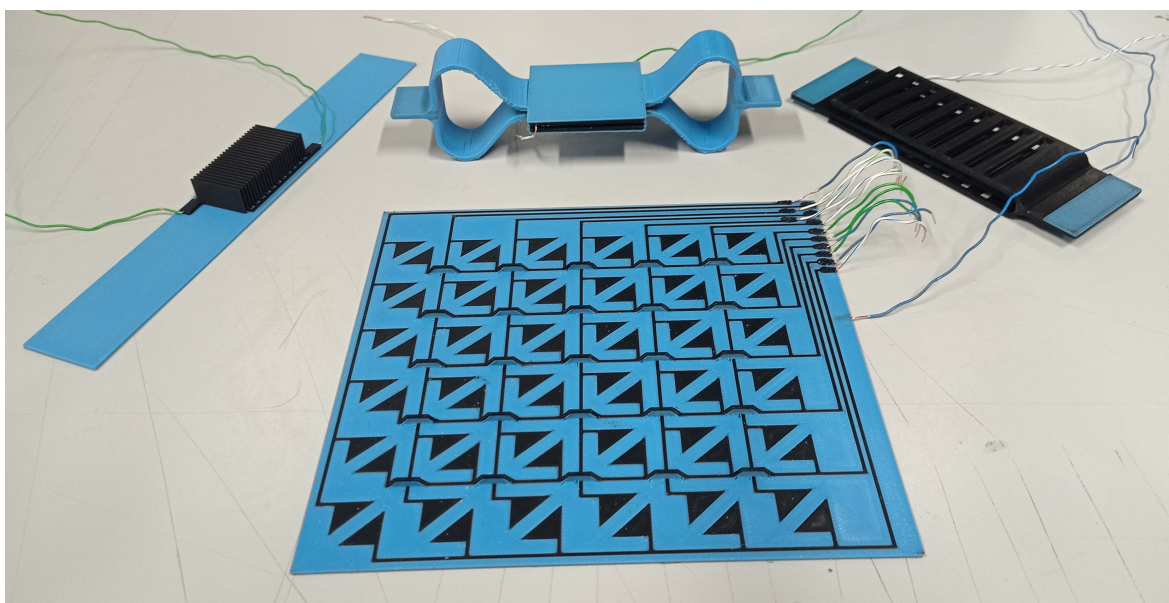


Figura 5.2: Sensori realizzati

Programma Arduino

```
// definizione dei pin per l'asse x
int xPin[] = {A0, A1, A2, A3, A4, A5};
// definizione dei pin per l'asse y
int yPin[] = {A10, A11, A12, A13, A14, A15};
int OUT_PIN = 13;
// creazione di due array per immagazzinare i valori di riferimento
// delle capacita per i due assi
float capacitanceX0[ sizeof(xPin)/sizeof(int) ] = {};
float capacitanceY0[ sizeof(yPin)/sizeof(int) ] = {};
// creazione array per immagazzinare le posizioni dell'armature toccate
int x[ sizeof(xPin)/sizeof(int) ] = {};
int y[ sizeof(yPin)/sizeof(int) ] = {};
// numero di ripetizioni in fase di calibrazione
int repetitions = 10;
// numero di misurazioni da scartare all'inizio del ciclo
int skip = 2;
// valori di calibrazione per la misura di capacita
// per ogni pin dei due assi
const float IN_STRAY_CAP_TO_GNDX[] = ...
{24.72, 26.1, 27.03, 25.57, 25.92, 26.1};
const float IN_STRAY_CAP_TO_GNDY[] = ...
{31.14, 28.64, 28.64, 28.22, 30.65, 29.29};
const float R_PULLUP = 34.8;
const int MAX_ADC_VALUE = 1023;

void setup() {
    // impostazione del pin di stimolo
    pinMode(OUT_PIN, OUTPUT);
    // inizializzazione comunicazione seriale
    Serial.begin(115200);
    // richiamo della funzione per la calibrazione della misura
    calibration();
}

void loop() {
    // prima viene misurato l'asse x
    for (int i = 0; i < sizeof(xPin) / sizeof(int); i++) {
        // si seleziona come input il pin dell'asse x in esame
        pinMode(xPin[i], INPUT);
        // si stimola l'apparato
        digitalWrite(OUT_PIN, HIGH);
        delay(10);
    }
}
```

```

// si effettua la misura
int val = analogRead(xPin[i]);
digitalWrite(OUT_PIN, LOW);
delay(10);
if (val < 1000) {
// si scarica il sistema
pinMode(xPin[i], OUTPUT);
// la misurazione viene convertita nel valore
// di capacita corrispondente
float C = (float)val * IN_STRAY_CAP_TO_GNDX[i] / ...
(float)(MAX_ADC_VALUE - val);
// se il valore misurato e' inferiore al 50% di quello
// di riferimento si memorizza la posizione nell'array opportuno
if (C >= capacitancex0[i] * 0.50) {
x[i] = 0;
} else {
x[i] = 1;
}
}
delay(10);
}
// si ripete la misura allo stesso modo per l'asse y
for (int j = 0; j < sizeof(yPin) / sizeof(int); j++) {
pinMode(yPin[j], INPUT);
digitalWrite(OUT_PIN, HIGH);
delay(10);
int val = analogRead(yPin[j]);
digitalWrite(OUT_PIN, LOW);
delay(10);
if (val < 1000) {
pinMode(yPin[j], OUTPUT);
float C = (float)val * IN_STRAY_CAP_TO_GNDY[j] / ...
(float)(MAX_ADC_VALUE - val);
if (C >= capacitancey0[j] * 0.50) {
y[j] = 0;
} else {
y[j] = 1;
}
}
}
delay(10);
}
// alla fine della misura si stampa a seriale 6 serie da 6 valori
// rappresentanti i condensatori;
// 0 identifica non toccato, 1 toccato
for (int j = 0; j < sizeof(y) / sizeof(int); j++){
if (y[j]== 1){

```

```

    for (int i = 0; i < sizeof(x) / sizeof(int); i++){
        if (x[i] == 1){
            Serial.print("1-");
        }else{
            Serial.print("0-");
        }
    }
    if(j != sizeof(y) / sizeof(int)-1){
        Serial.print("; -");
    }
}else{
    for (int k = 0; k < sizeof(x) / sizeof(int); k++){
        Serial.print("0-");
    }
    if(j != sizeof(y) / sizeof(int)-1){
        Serial.print("; -");
    }
}
}
Serial.println();
delay(10);
}

```

```

void calibration() {
// la fase di calibrazione viene ripetuta un numero definito di volte
    for (int k = 0; k < repetitions + skip; k++) {
// si effettua la misura per i due assi
        for (int i = 0; i < sizeof(xPin) / sizeof(int); i++) {
            pinMode(xPin[i], INPUT);
            digitalWrite(OUT_PIN, HIGH);
            delay(10);
            int val = analogRead(xPin[i]);
            digitalWrite(OUT_PIN, LOW);
            delay(10);
            if (val < 1000) {
                pinMode(xPin[i], OUTPUT);
                float C = (float)val * IN_STRAY_CAP_TO_GNDX[i] / ...
                (float)(MAX_ADC.VALUE - val);
                if (k == skip-1) {
                    capacitancex0[i] = C;
                } else if (k > skip-1) {
                    // se la misura e' valida ed e' minore del
                    // valore di riferimento si sostituisce allo stesso
                    if (C <= capacitancex0[i]){
                        capacitancex0[i] = C;
                    }
                }
            }
        }
    }
}

```



```

    }
  }
  delay(10);
}
// stesso processo ripetuto per l'asse y
for (int j = 0; j < sizeof(yPin) / sizeof(int); j++) {
  pinMode(yPin[j], INPUT);
  digitalWrite(OUT_PIN, HIGH);
  delay(10);
  int val = analogRead(yPin[j]);
  digitalWrite(OUT_PIN, LOW);
  delay(10);
  if (val < 1000) {
    pinMode(yPin[j], OUTPUT);
    float C = (float)val * IN_STRAY_CAP_TO_GNDY[j] / ...
    (float)(MAX_ADC_VALUE - val);
    if (k == skip-1) {
      capacitancey0[j] = C;
    } else if (k > skip-1) {
      if (C <= capacitancey0[j]){
        capacitancey0[j] = C;
      }
    }
  }
  delay(10);
}
delay(10);
}
}
}

```

Programma Python

```
# vengono importate le librerie necessarie
import serial
import numpy as np
import tkinter as tk
#inizializzazione comunicazione seriale
serialObj = serial.Serial('COM7', baudrate=115200)
#creazione array per immagazzianre i valori di stato dei condensatori
capacitance = np.empty([6, 6], dtype=float)

#inizializzazione dell'interfaccia grafica
root = tk.Tk()
window_width, window_height = 600, 600
root.title("Piastra")
screen_width = root.winfo_screenwidth()
screen_height = root.winfo_screenheight()
position_top = int(screen_height / 2 - window_height / 2)
position_right = int(screen_width / 2 - window_width / 2)
root.geometry(f'{{window_width}}x{{window_height}}+...
{{position_right}}+{{position_top}}')

labels = [[None for _ in range(6)] for _ in range(6)]

#funzione per la determinazione dl colore della cella in base
#allo stato del condensatore
def selectColor(state):
    if state == 0:
        return 'blue'
    else:
        return 'red'

#funzione di aggiornamento della griglia in base ai dati letti
def updateGrid():
    rows, cols = 6, 6
    for i in range(rows):
        for j in range(cols):
            color = selectColor(capacitance[i, j])
            labels[i][j].config(background=color)

#controllo dei dati in arrivo sulla porta seriale e
#smistamento degli stessi
def checkSerial():
    arduinoData = serialObj.readline().decode('ascii').rstrip("\r\n")
```

```

groups = arduinoData.split(';;-')

capacitance = np.empty([6, 6])

for k in range(6):
    capacitance[k] = np.array([float(value) for ...
                               value in groups[k].split()])

return capacitance

#aggiornamento della finestra grafica per riportare
#i dati aggiornati nell'interfaccia
def refresh():
    global capacitance
    capacitance = checkSerial()
    updateGrid()
    root.after(50, refresh)

#creazione della griglia in base ai dati letti
def createGrid():
    rows, cols = 6, 6
    for i in range(rows):
        for j in range(cols):
            label = tk.Label(root, background=selectColor ...
                              (capacitance[i, j]), width=8, height=4)
            label.grid(row=i, column=j, sticky='nsew', padx=5, pady=5)
            labels[i][j] = label

    for i in range(rows):
        root.rowconfigure(i, weight=1)
    for j in range(cols):
        root.columnconfigure(j, weight=1)

createGrid()

refresh()

root.mainloop()

```

Bibliografia

- [1] *Sviluppo di Materiali Self-Sensing Attraverso Tecniche di Manifattura Additiva, Mini Luca, 2023.*
- [2] *Salonitis, K., Pandremenos, J., Paralikas, J. et al. Multifunctional materials: engineering applications and processing challenges. Int J Adv Manuf Technol 49, 803–826 (2010), URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2428-6>.*
- [3] *Chen, C., Wang, X., Wang, Y., Yang, D., Yao, F., Zhang, W., Wang, B., Sewvandi, G. A., Yang, D., Hu, D., Additive Manufacturing of Piezoelectric Materials. Adv. Funct. Mater. 2020, 30, 2005141, URL: <https://doi.org/10.1002/adfm.202005141>.*
- [4] *Chung, D.D.L. A critical review of piezoresistivity and its application in electrical-resistance-based strain sensing. J Mater Sci 55, 15367–15396 (2020), URL: <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05099-z>.*
- [5] *Rivadeneira, Almudena, and Juan Antonio López-Villanueva. 2020. "Recent Advances in Printed Capacitive Sensors" Micromachines 11, no. 4: 367, URL: <https://doi.org/10.3390/mi11040367>.*
- [6] *Bodkhe, S., Ermanni, P., 3D Printing of Multifunctional Materials for Sensing and Actuation: Merging Piezoelectricity with Shape memory, European Polymer Journal (2020), URL: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.109738>.*
- [7] *Yu, K., Xin, A., Du, H. et al. Additive manufacturing of self-healing elastomers. NPG Asia Mater 11, 7 (2019), URL: <https://doi.org/10.1038/s41427-019-0109-y>.*
- [8] *[Xiaoyu Sui, Julia R. Downing, Mark C. Hersam, Junhong Chen, Additive manufacturing and applications of nanomaterial-based sensors, Materials Today, Volume 48, 2021, Pages 135-154, ISSN 1369-7021, URL: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.02.001>.*
- [9] *Ajit Sir, Smart materials and smart systems for the future, Canadian Military Journal (2000), URL: https://www.academia.edu/1118149/Smart_materials_and_smart_systems_for_the_future?auto=citations&from=cover_page.*
- [10] *X. Aeby, R. v. Dommelen and D. Briand, "Fully FDM 3D Printed Flexible Capacitive and Resistive Transducers," 2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXXIII), Berlin, Germany, 2019, pp. 2440-2443, doi: 10.1109/TRANSDUCERS.2019.8808268, URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8808268>.*
- [11] *[Fabrication and Analysis of a Composite 3D Printed Capacitive Force Sensor, Matt Saari, Bin Xia, Bryan Cox, Paul S. Krueger, Adam L. Cohen, and Edmond Richer, URL: https://www.researchgate.net/publication/308087786_*

Fabrication_and_Analysis_of_a_Composite_3D_Printed_Capacitive_Force_Sensor.

- [12] Bikas, H., Stavropoulos, P. & Chryssolouris, G. *Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review*. *Int J Adv Manuf Technol* 83, 389–405 (2016), URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7576-2>.
- [13] Min Kyoung Kim, D.D.L. Chung, *Inductance-based and inductance-capacitance based structural self-sensing of shape-changing deformation in aluminum*, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 365, 2024, 114926, ISSN 0924-4247, URL: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114926>.
- [14] Amir A. Zadpoor, *Additive Manufacturing Laboratory, Department of Biomechanical Engineering, Faculty of Mechanical, Maritime, and Materials Engineering, Delft University of Technology (TU Delft), Mekelweg 2, Delft 2628 CD, The Netherlands.*, URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2016/mh/c6mh00065g>.
- [15] *Presentazione: Analysis and Desing of Sensing Structure Throught Refined Kinematic Models*, Enrico Zappino, Erasmo Carrera, *Desing Modelling and Experiments of Advanced Structures and Systems, International Conference DeMEASS 2020*.
- [16] B. Shih, J. Mayeda, Z. Huo, C. Christianson and M. T. Tolley, "3D printed resistive soft sensors," *2018 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, Livorno, Italy, 2018, pp. 152-157, doi: 10.1109/ROBOSOFT.2018.8404912, URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8404912>.
- [17] H. Liu, H. Zhang, W. Han, H. Lin, R. Li, J. Zhu, W. Huang, *3D Printed Flexible Strain Sensors: From Printing to Devices and Signals*. *Adv. Mater.* 2021, 33, 2004782, URL: <https://doi.org/10.1002/adma.202004782>.
- [18] M. Schouten, R. Sanders and G. Krijnen, "3D printed flexible capacitive force sensor with a simple micro-controller based readout," *2017 IEEE SENSORS*, Glasgow, UK, 2017, pp. 1-3, doi: 10.1109/ICSENS.2017.8233949., URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8233949>.
- [19] Loh, L.Y.W., Gupta, U., Wang, Y., Foo, C.C., Zhu, J. and Lu, W.F. (2021), *3D Printed Metamaterial Capacitive Sensing Array for Universal Jamming Gripper and Human Joint Wearables*. *Adv. Eng. Mater.*, 23: 2001082, URL: <https://doi.org/10.1002/adem.202001082>.
- [20] Riaan Stopforth, *Conductive polylactic acid filaments for 3D printed sensors: Experimental electrical and thermal characterization*, *Scientific African*, Volume 14, 2021, e01040, ISSN 2468-2276, URL: <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e01040>.
- [21] *Capacitance Meter Example, docs Arduino, Tutorial 2024*, URL: <https://docs.arduino.cc/tutorials/generic/capacitance-meter/>.

- [22] E. Huber, M. Mirzaee, J. Bjorgaard, M. Hoyack, S. Noghianian and I. Chang, "Dielectric property measurement of PLA," *2016 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT)*, Grand Forks, ND, USA, 2016, pp. 0788-0792, doi: 10.1109/EIT.2016.7535340, URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7535340>.
- [23] Nebojsa I. Jaksic, Pratik D. Desai, *Characterization of 3D-printed capacitors created by fused filament fabrication using electrically-conductive filament*, *Procedia Manufacturing*, Volume 38, 2019, Pages 33-41, ISSN 2351-9789, URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.005>.
- [24] Yan Zhang, Tengxiao Ji, Shihui Hou, Lifang Zhang, Yunhui Shi, Jingxin Zhao, Xinhua Xu, *All-printed solid-state substrate-versatile and high-performance micro-supercapacitors for in situ fabricated transferable and wearable energy storage via multi-material 3D printing*, *Journal of Power Sources*, Volume 403, 2018, Pages 109-117, ISSN 0378-7753, URL: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.09.096>.
- [25] I. -s. Yang and O. -k. Kwon, "A touch controller using differential sensing method for on-cell capacitive touch screen panel systems," in *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 57, no. 3, pp. 1027-1032, August 2011, doi: 10.1109/T-CE.2011.6018851, URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6018851>.
- [26] Barrett, G. and Omote, R. (2010), *Projected-Capacitive Touch Technology*. *Information Display*, 26: 16-21, URL: <https://doi.org/10.1002/j.2637-496X.2010.tb00229.x>.
- [27] B I Shklovskii and A L Éfros, *Percolation theory and conductivity of strongly inhomogeneous media*, *Soviet Physics Uspekhi*, 1975, volume 18, numero 11, pagina 845, URL: <https://dx.doi.org/10.1070/PU1975v018n11ABEH005233>.
- [28] Kirkpatrick, Scott, *Percolation and Conduction*, *American Physical Society*, 1973, volume 45, numero 4, pagine 574-588, URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.45.574>.
- [29] V.I Roldughin, V.V Vysotskii, *Percolation properties of metal-filled polymer films, structure and mechanisms of conductivity*, *Progress in Organic Coatings*, Volume 39, Issues 2-4, 2000, Pages 81-100, ISSN 0300-9440, URL: [https://doi.org/10.1016/S0300-9440\(00\)00140-5](https://doi.org/10.1016/S0300-9440(00)00140-5)