

UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA BIOMEDICA**

**SENSORI DI DEFORMAZIONE PER APPLICAZIONI  
BIOMEDICALI: DESIGN, STAMPA E CARATTERIZZAZIONE DI  
ESTENSIMETRI REALIZZATI TRAMITE AEROSOL JET PRINTING**

**Relatore: Prof. Claudio Narduzzi**

**Laureando: Matteo Marchioro**

**Correlatore: Prof.ssa Sarah Tonello**

**ANNO ACCADEMICO 2023 - 2024**

**Data di laurea 12 Marzo 2024**





*Ai miei genitori, che hanno reso tutto questo possibile.*

*Ai miei amici, fonte costante di sicurezza e supporto.*

*Un ringraziamento speciale alla prof.ssa Sarah Tonello per la passione e gentilezza dimostrata durante il suo lavoro, e agli ingg. Edoardo Cantù e Tiziano Fapanni, per la loro dedizione a questo progetto e per aver riacceso una scintilla persa negli anni.*



# INDICE

INTRODUZIONE .....	8
CAPITOLO 1: I SENSORI DI DEFORMAZIONE .....	10
1.1 Estensimetri metallici .....	10
1.2 Ponte di Wheatstone .....	11
1.3 Problematiche tecniche .....	14
CAPITOLO 2: APPLICAZIONI BIOMEDICALI DEI SENSORI DI DEFORMAZIONE .....	15
2.1 Dispositivi medici .....	15
2.2 Sensori di deformazione come dispositivi medici indossabili .....	16
2.2.1 Sensori per il monitoraggio di segnali fisiologici .....	16
2.2.2 Sensori per lo studio di movimenti e gesti .....	18
2.3 Sensori di deformazione come supporto a dispositivi medici .....	19
2.3.1 Estensimetri nelle apparecchiature di diagnostica non invasive ....	19
2.3.2 Estensimetri nella chirurgia robotica da remoto .....	20
2.3.3 Estensimetri nelle pompe medicali .....	21
CAPITOLO 3: STAMPA E CARATTERIZZAZIONE DI ESTENSIMETRI E TRIMMER .....	22
3.1 Metodo di stampa: Aerosol Jet Printing .....	22
3.2 Materiali .....	26
3.3 Realizzazione delle geometrie .....	27
3.3.1 Geometria degli estensimetri .....	27
3.3.2 Geometria dei trimmer .....	28
3.3.3 Geometria dei ponti di Wheatstone .....	30
3.4 Protocollo di stampa e di sinterizzazione .....	31
3.5 Metodi di caratterizzazione: descrizione dei protocolli utilizzati .....	34
CAPITOLO 4: RISULTATI E DISCUSSIONE .....	38
4.1 Analisi morfologica .....	38
4.1.1 Larghezza e spessore degli estensimetri .....	38
4.1.2 Larghezza e spessore dei trimmer .....	40

4.2 Analisi elettrica .....	44
4.2.1 Compensazione della tensione di offset .....	44
4.2.2 Effetti della deformazione sui trimmer .....	47
4.2.3 Effetti dell'autoriscaldamento .....	49
CONCLUSIONI .....	52
BIBLIOGRAFIA .....	53
SITOGRAFIA .....	54

## INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, l'elettronica stampata ha attratto un crescente interesse sia nel mercato che nella ricerca, grazie ai suoi molteplici vantaggi rispetto ai tradizionali metodi di produzione elettronica; in particolare, la tecnologia di Aerosol Jet Printing (AJP) ha dimostrato nel tempo di poter ridurre il peso e le dimensioni dei circuiti elettronici, migliorare l'affidabilità e ridurre i costi e gli sprechi rispetto all'elettronica convenzionale. I tratti distintivi di questa tecnologia risiedono principalmente nella sua capacità di stampare a dimensioni nell'ordine dei micrometri e nella sua non limitazione ai piani bidimensionali, essendo quindi in grado di adattarsi ad una vasta gamma di contesti e settori.

Trovano ampio impiego nella elettronica stampata gli estensimetri, strumenti utilizzati per misurare deformazioni e sforzi meccanici in svariati settori, dall'ingegneria all'elettronica; non è da sottovalutare la loro importanza anche nel campo medico, dove vengono impiegati per misurare la deformazione dei tessuti biologici, monitorare lo stress muscolare e valutare la biomeccanica degli arti artificiali. Queste applicazioni biomediche sono essenziali per la produzione di sensori specifici, quanto per lo sviluppo di dispositivi medici avanzati.

La stampa di estensimetri può essere soggetta a diversi problemi che richiedono particolare attenzione durante il processo; tra questi ci sono i difetti di stampa, che possono compromettere la precisione e l'affidabilità dell'estensimetro, e la corretta realizzazione delle geometrie, che è fondamentale per garantire le prestazioni desiderate. Inoltre, l'effetto Joule e la tensione di offset rappresentano sfide significative, in quanto possono influenzare la misurazione della deformazione e compromettere l'accuratezza dei risultati. Affrontare queste problematiche richiede un'attenta progettazione e lo studio di soluzioni o metodi di compensazione per garantire la qualità e l'affidabilità dell'estensimetro stampato.

Questo elaborato si propone di offrire una trattazione dettagliata sui principi fondamentali degli estensimetri e sulla tecnologia di stampa tramite Aerosol Jet Printing, con l'obiettivo di fornire una comprensione più approfondita del loro funzionamento. Si intende esaminare i vari contesti in cui questi sensori trovano applicazione, ponendo un'attenzione particolare all'utilizzo nel settore medico. Verrà quindi introdotta una definizione chiara di dispositivo medico e poi, attraverso l'analisi di una serie di casi pratici, verranno illustrati i modi in cui gli estensimetri vengono utilizzati nella progettazione e nell'implementazione di tali dispositivi.



Il focus si sposterà quindi sulla progettazione di ponti di Wheatstone estensimetrici, seguita da uno studio approfondito da diverse prospettive per risolvere le sfide tecniche precedentemente descritte e le problematiche incontrate durante l'implementazione pratica. Verranno quindi esaminati meticolosamente i principi che guidano la progettazione e verranno descritte in dettaglio le metodologie di caratterizzazione impiegate; questo sarà seguito da un'analisi esaustiva dei risultati ottenuti. Un'attenzione particolare sarà riservata allo sviluppo di un circuito progettato specificamente per compensare la tensione di offset, noto come trimmer.

# Capitolo 1

## I SENSORI DI DEFORMAZIONE

### 1.1 Estensimetri metallici

Gli estensimetri sono strumenti di misura la cui estensione o compressione si riflette nella variazione della propria resistenza; applicati su di un corpo sono in grado di rilevare eventuali deformazioni dimensionali dello stesso causate da sollecitazioni di natura meccanica o termica. Da ciò risulta un'eccezionale capacità di adattamento ai più disparati campi di applicazione, dalla valutazione dello stato di stress e di carico di strutture come ponti e dighe, al monitoraggio della pressione arteriosa di un paziente.

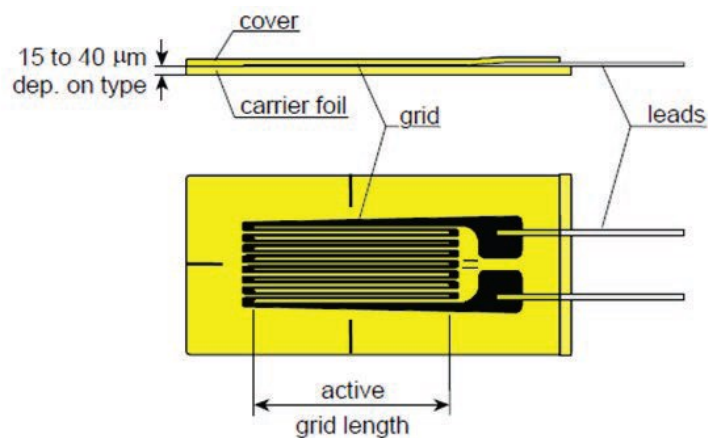


Figura 1: elementi fondamentali di un estensimetro

I componenti principali di un estensimetro sono:

- *cover*: copertura protettiva che ha lo scopo di isolare l'estensimetro dall'ambiente esterno, in particolare da temperatura, agenti chimici e meccanici, senza intaccarne il corretto funzionamento. In base alle condizioni di lavoro può quindi essere di diversi materiali, come resine silconiche o gomme nitriliche;
- *grid*: serpentina a deposito metallico, il sensore di deformazione, il conduttore che reagisce alla deformazione cambiando la propria resistenza
- *carrier foil*: supporto di base in film isolante;
- *leads*: cablaggio per la connessione con il calcolatore.

Il funzionamento di questi sensori di deformazione è basato sulla seconda legge di Ohm [1], nella quale  $R$  rappresenta la resistenza elettrica in  $[\Omega]$ ,  $\rho$  la resistività elettrica in  $[\Omega\text{m}]$ ,  $L$  la lunghezza in  $[\text{m}]$  e  $S$  la superficie in  $[\text{m}^2]$ .

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad [1]$$

Questa variazione di resistenza va attribuita a due cause:

- la deformazione del conduttore sfruttata nei trasduttori a filo o a lamina metallica;
- il mutamento della resistenza specifica del materiale del conduttore causata da variazione della struttura interna del materiale stesso.

Questo fenomeno è descritto dalla relazione [2], nella quale:

- il termine  $d$  che precede una variabile indica la variazione infinitesima della stessa;
- $\varepsilon$ , il fattore di deformazione (o "strain"), è uguale al rapporto  $dL/L$  e costituisce l'indice di deformazione specifica di un corpo lungo una direzione; nonostante sia adimensionale viene solitamente misurato in  $[\mu\varepsilon]$ , "microstrain", dato che  $dL$  assume spesso valori negli ordini dei  $[\mu m]$ ;
- $\nu$ , il coefficiente di Poisson, è una misura della deformabilità di un materiale. È definito come il rapporto tra la variazione relativa di larghezza (o diametro) di un corpo sottoposto ad una forza longitudinale e la variazione relativa di lunghezza causata dalla stessa forza.

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon (1 + 2\nu) + \frac{d\rho}{\rho} \quad [2]$$

Un fattore che viene poi ricavato è il gauge factor (indicato con "GF" o "k"), chiamato anche fattore di trasduzione, grandezza fondamentale di un estensimetro dato che ne esprime la sensibilità; è adimensionale ed è definito dalla relazione [3]:

$$GF = \frac{dR/R}{dL/L} = \frac{dR/R}{\varepsilon} = 1 + 2\nu + \frac{d\rho}{\rho} \quad [3]$$

Nella quale:

- $1 + 2\nu$  rappresenta la variazione o il guadagno legato al cambio di geometria;
- $\frac{d\rho}{\rho}$  rappresenta la variazione o il guadagno legato al cambio di resistività.

## 1.2 Ponte di Wheatstone

Il condizionamento del segnale nel caso di deformazioni meccaniche o termiche avviene spesso attraverso il ponte di Wheatstone, un particolare circuito elettrico in grado di commutare la deformazione subita dalla griglia dell'estensimetro in segnale elettrico misurabile, determinandone quindi le variazioni relative di resistenza. In condizioni ideali può essere

progettato per avere una sensibilità estremamente alta, consentendo misurazioni di variazioni di resistenza negli ordini di decimi di [mΩ]; tuttavia, la sensibilità pratica di un ponte di Wheatstone dipenderà dalla precisione dei componenti utilizzati, dalla stabilità termica del circuito e dalle caratteristiche del rumore elettrico.

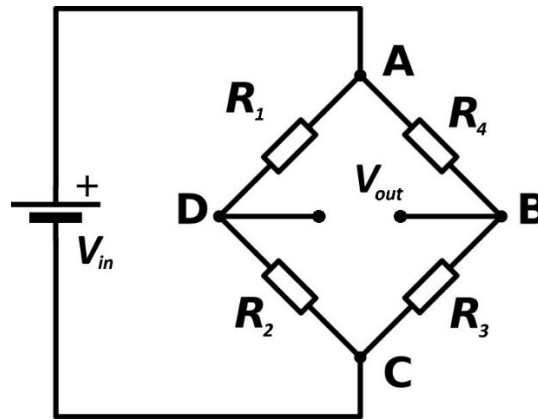


Figura 2: ponte di Wheatstone

Dalla Figura 2 si può notare che i due punti d'angolo (A e C) sono collegati alla tensione di alimentazione  $V_{in}$ , si suddivide sui due semi-ponti ( $R_1 - R_2$ ) e ( $R_3 - R_4$ ) in rapporto all'entità delle resistenze usate; gli altri due nodi (B e D) invece sono indicativi della tensione di uscita  $V_{out}$ , la quale sarà pari alla differenza tra le due tensioni parziali  $V_1$  e  $V_4$  calcolabili a loro volta tramite la formula del partitore di tensione:

$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{in} \quad [4]$$

$$V_4 = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_{in} \quad [5]$$

$$V_{out} = \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) V_{in} = V_1 - V_4 \quad [6]$$

Il ponte si dice "bilanciato" quando  $V_{out} = 0$ ; questo avviene in due condizioni:

- quando tutte le resistenze del ponte sono uguali:  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ ;
- quando tutti i rapporti di resistenza delle due metà del ponte sono uguali:  $\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_1}{R_2}$ .

Si definisce quindi sbilanciamento del ponte il rapporto  $\frac{V_{out}}{V_{in}}$ , che è ovviamente nullo se il ponte è bilanciato; è invece diverso da 0 nel caso in cui tutte le resistenze variano rispettivamente di  $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$ , causando la nascita di una tensione di uscita  $V_{out} \neq 0$ , il cui valore per piccole deformazioni (campo elastico) può essere calcolato con la formula:

$$V_{out} = V_{in} \left( \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \right) * \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad [7]$$

Usando un ponte bilanciato la relazione [7] può essere riscritta in una forma semplificata:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{4} * \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad [8]$$

Infine, ricordando il concetto di gauge factor della relazione [3], possiamo nuovamente semplificare la formula ottenendo:

$$V_{out} = GF * \frac{V_{in}}{4} * (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) = GF * \frac{V_{in}}{4} * \varepsilon_{tot} \quad [9]$$

Quest'ultima mette in evidenza la proprietà del ponte di Wheatstone secondo la quale le deformazioni relative ad estensimetri posti su lati adiacenti del ponte si sottraggono, mentre quelle relative ad estensimetri posti su lati opposti si sommano. Grazie a questa proprietà è possibile combinare le deformazioni dei singoli estensimetri al fine di aumentare la precisione della misurazione.

A seconda del tipo di misurazione da effettuare, possono essere impiegati da uno a quattro estensimetri nel ponte, le quali posizioni e orientazioni producono effetti differenti. Questo porta alla nascita di molteplici configurazioni, ognuna delle quali si adatta meglio a determinate situazioni; esse vengono classificate principalmente rispetto al numero di sensori di deformazione impiegati:

- “quarter bridge”, con un solo estensimetro;
- “half bridge”, con due estensimetri sullo stesso semi-ponte;
- “double quarter” o “diagonal bridge”, con due estensimetri su semi-ponti differenti, in posizioni opposte l'una rispetto all'altra;
- “full bridge”, con quattro estensimetri totali.

Ogni configurazione ha i suoi vantaggi e i suoi svantaggi, ma in generale un numero minore di estensimetri utilizzati corrisponde ad un minor costo e ad una più facile installazione, mentre un numero maggiore permette misurazioni diverse e la compensazione di effetti causati dalla temperatura e dalle tensioni di modo comune.

Infine, l'angolo di applicazione dei sensori consente la focalizzazione della misura su assi differenti, potendo quindi suddividere la deformazione nelle sue componenti di tensione/compressione, flessione e torsione.

### 1.3 Problematiche tecniche

L'utilizzo di ponti di Wheatstone e di estensimetri metallici è ampiamente diffuso data la loro precisione e adattabilità; questo approccio non è tuttavia privo di sfide, e due delle problematiche principali che emergono durante l'impiego di tali dispositivi richiedono particolare attenzione e soluzioni specifiche.

Il primo ostacolo è rappresentato dall'effetto Joule e dall'auto riscaldamento degli estensimetri metallici. Quando la corrente elettrica attraversa gli estensimetri, si genera calore a causa della resistenza del materiale, noto come effetto Joule; questo può portare ad un aumento della temperatura degli estensimetri, influenzando la loro resistenza e, di conseguenza, le misurazioni. È essenziale monitorare e compensare gli effetti dell'auto riscaldamento per garantire la precisione delle misurazioni, soprattutto in applicazioni dove la temperatura può variare significativamente.

Un'altra sfida importante è la necessità di compensare l'offset di tensione, fenomeno che si verifica quando la differenza di potenziale misurata non è zero anche in assenza di forze esterne applicate. L'offset di tensione può derivare da varie fonti, come difetti nei componenti del circuito, variazioni nella resistenza dei conduttori o cambiamenti nella temperatura ambiente. Per garantire misurazioni accurate e affidabili è fondamentale cercare di ridurre l'errore prodotto da questo fattore attraverso l'applicazione di algoritmi di correzione software o tramite l'implementazione di circuiti appositi. In particolare, parte di questo elaborato si concentrerà sulla presentazione della progettazione e dell'analisi di un dispositivo specifico volto alla compensazione di questo problema di offset: il trimmer.

## Capitolo 2

### APPLICAZIONI BIOMEDICALI DEI SENSORI DI DEFORMAZIONE

Le applicazioni dei sensori di deformazione sono estremamente diverse e trovano impiego in numerosi campi, tra cui la ricerca industriale per il monitoraggio di processi di produzione e la sicurezza strutturale, così come nel settore biomedico per il monitoraggio delle prestazioni di dispositivi medici e l'analisi biomeccanica. Per comprendere appieno queste applicazioni, è fondamentale stabilire una chiara definizione di dispositivo medico; questo capitolo inizierà infatti con una panoramica delle categorie e delle caratteristiche distintive dei principali dispositivi biomedici. Successivamente, verranno approfondite le principali categorie in cui i sensori di deformazione sono impiegati, analizzandone le potenziali applicazioni.

#### 2.1 Dispositivi medici

Un dispositivo medico è un'applicazione tecnologica progettata per diagnosticare, trattare o monitorare condizioni mediche e biologiche; questi dispositivi sono fondamentali per l'avanzamento della medicina e della ricerca biomedica, fornendo strumenti per la diagnosi precoce, la terapia personalizzata e il monitoraggio continuo delle condizioni del paziente. Essi possono essere suddivisi in diverse categorie in base alla loro funzione e al contesto di utilizzo:

- gli strumenti diagnostici, come tomografi a risonanza magnetica (MRI), tomografi computerizzati (CT), ecografi e apparecchiature per la diagnostica per immagini. Questi dispositivi forniscono immagini dettagliate dei tessuti interni del corpo, consentendo la visualizzazione di anomalie strutturali e la guida per interventi chirurgici e terapie;
- i dispositivi terapeutici, utilizzati per il trattamento di malattie e condizioni mediche. Questi possono essere dispositivi impiantabili, come pacemaker cardiaci, protesi articolari e dispositivi per la stimolazione nervosa, o dispositivi esterni, come pompe per infusione di farmaci, laser terapeutici e apparecchiature per la terapia fisica;
- i dispositivi di monitoraggio, come saturimetri e monitor cardiaci. Questi sono progettati per monitorare continuamente le funzioni vitali del paziente, come la frequenza cardiaca, la pressione arteriosa, la saturazione di ossigeno nel sangue e altri parametri fisiologici;
- i dispositivi biomedici utilizzati per scopi specifici, come strumenti chirurgici, dispositivi per la gestione del dolore, dispositivi per la somministrazione di farmaci e dispositivi per la terapia riabilitativa. Queste categorie di strumenti riflettono la diversità delle applicazioni e delle tecnologie impiegate nel campo biomedicale, svolgendo un ruolo

cruciale nel migliorare la qualità della vita dei pazienti e nel promuovere il progresso della medicina.

In ambito medico gli estensimetri giocano un ruolo cruciale nel garantire una valutazione biomeccanica accurata e una terapia ottimizzata, contribuendo al miglioramento complessivo della pratica medica e al benessere dei pazienti. Essi trovano impiego in due principali contesti: come dispositivi medici autonomi o come componenti integrati in dispositivi medici più complessi.

## **2.2 Sensori di deformazione come dispositivi medici indossabili**

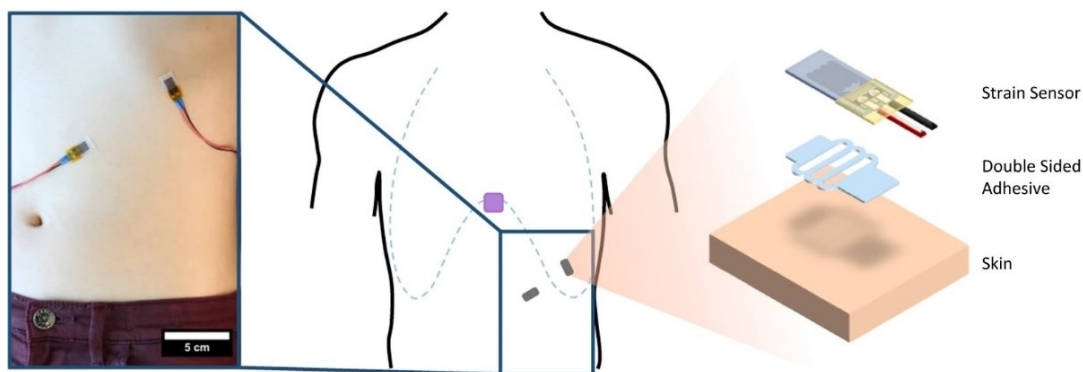
La prima categoria su cui questo elaborato vuole porre attenzione è quella dei sensori di deformazione indossabili: questi dispositivi, integrati in abbigliamento o in accessori da indossare, consentono il monitoraggio continuo e non invasivo sia di parametri biomeccanici come la deformazione muscolare, l'allineamento articolare e la postura corporea, che di parametri fisiologici, come attività cardiaca e respiratoria. Grazie alla loro sensibilità e precisione, questa classe di dispositivi offre un'importante fonte di dati per la valutazione della salute umana in contesti sia quotidiani e sportivi, sia clinici e riabilitativi; di seguito, alcuni esempi riguardanti l'ampia varietà dei campi di applicazione.

### **2.2.1 Sensori per il monitoraggio dei segnali fisiologici**

I sensori di stress indossabili flessibili permettono la valutazione e la retroazione istantanea e prolungata dei dati fisiologici individuali, riducendo l'onere derivante da strumentazione ingombrante, soprattutto tramite l'applicazione di tecnologie wireless, eliminando pure la scomodità prodotta dalla presenza di cavi. Questi dispositivi sono in grado di percepire, acquisire e trasmettere ininterrottamente segnali fisiologici, quali il battito cardiaco e la pressione sanguigna, senza essere influenzati dal resto delle attività quotidiane del paziente.

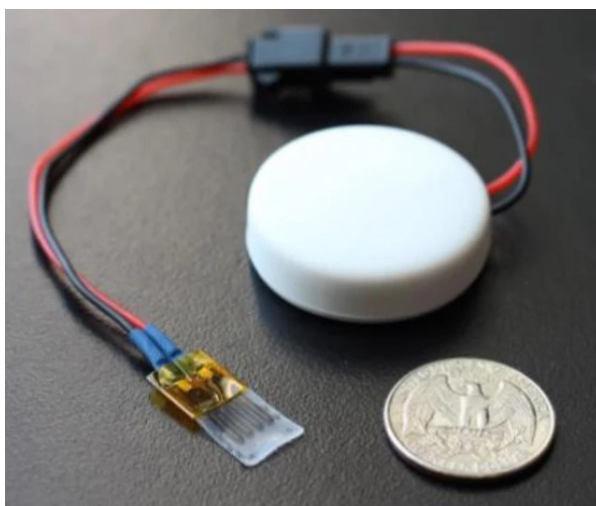
La Figura 3 presenta un sensore usa e getta, di forma simile a quella di un cerotto, in grado di misurare sia la frequenza respiratoria che il volume semplicemente tramite la deformazione locale della gabbia toracica e dell'addome durante la respirazione.





*Figura 3: dispositivo per la misura di volume e frequenza respiratoria*

Questo dispositivo di forma e dimensioni simili a quelle di un semplice cerotto risulta altamente adattabile ad una vasta gamma di condizioni ambulatoriali, essendo in grado di svolgere le funzioni di uno spirometro professionale nonostante la differenza di ingombro. Può inoltre essere integrato con unità Bluetooth wireless (Figura 4), e quindi essere utile nel monitorare i pazienti affetti da malattie respiratorie croniche in contesti quotidiani.



*Figura 4: dispositivo collegato ad un'unità Bluetooth*

La Figura 5 mostra il sensore cardiaco indossabile denominato “WiSP”, progettato per essere ultrasottile (~1 mm di spessore medio), altamente flessibile, economico, usa e getta, leggero (1.2 g), resistente all'acqua, morbido al tatto e composto da materiali biocompatibili, consentendo un accoppiamento intimo con la pelle. Uno studio condotto su pazienti con fibrillazione atriale ha dimostrato come WiSP sia in grado di misurare efficacemente i segnali cardiaci con risultati pari ad un Holter cardiaco, mantenendo però un più alto livello di comfort nel monitoraggio dei segnali cardiaci durante l'attività quotidiana, lo sforzo e il sonno.



*Figura 5: sensore cardiaco indossabile WiSP*

### **2.2.2 Sensori per lo studio di movimento e gesti**

L'analisi del movimento e del carico delle giunture del corpo riveste importanza fondamentale per valutare la salute muscoloscheletrica, prevenire lesioni, ottimizzare le prestazioni fisiche e guidare la progettazione di dispositivi ortopedici personalizzati. Lo studio tramite sensori fornisce informazioni dettagliate sulla funzionalità articolare e muscolare, consentendo di identificare anomalie biomeccaniche, inefficienze nei movimenti e fattori di rischio per lesioni.

Il movimento corporeo va oltre il mero spostamento degli arti e delle giunture, coinvolgendo anche l'attivazione della muscolatura associata ai processi comunicativi. L'analisi e il riconoscimento delle espressioni facciali e dei gesti costituiscono un campo di ricerca di notevole interesse scientifico, con applicazioni nel campo dell'intrattenimento e della comunicazione, nonché nel fornire soluzioni innovative per affrontare le sfide legate alle disabilità, attraverso lo sviluppo di sistemi personalizzati di assistenza e interazione.

Sia i movimenti corporei più basilari che le espressioni facciali possono essere classificati come tipologie di deformazioni, le quali possono essere oggetto di analisi mediante l'utilizzo di estensimetri.

Nella Figura 6 viene proposto un sistema per il riconoscimento dei gesti della mano, fondato su sensori di deformazione a basso consumo energetico, integrati su un bracciale da polso in cotone traspirante. L'approccio proposto si contraddistingue per la sua semplicità d'uso, in quanto richiede unicamente l'indosso del bracciale per avviare il monitoraggio dei movimenti. Il design del bracciale, costituito da un unico pezzo confortevole con l'elettronica integrata, si rivela particolarmente pratico.



*Figura 6: bracciale per il riconoscimento di gesti della mano*

Il dispositivo è stato testato su tre soggetti diversi, ognuno dei quali ha eseguito 8 gesti (estensione e flessione della mano, chiusura a pugno e apertura di ogni dito preso singolarmente) per 5 volte, raccogliendo in totale 120 tentativi; per convalidare le prestazioni del sistema, l'esperimento è stato condotto affiancato da una tecnologia ottica commerciale (Leap Motion). Si è concluso che questo sensore è in grado di ottenere prestazioni paragonabili a quelle delle tecnologie ottiche o elettromiografiche, risultando però più economico, confortevole e semplice da applicare. Inoltre, non presenta le problematiche tipiche delle telecamere, come la risoluzione e il campo visivo limitato, né complicazioni legate al contatto con il sudore.

### **2.3 Sensori di deformazione come supporto a dispositivi medici**

La tecnologia degli estensimetri trova impiego in una vasta gamma di dispositivi medici, sia critici che non critici, e nelle relative applicazioni; questo spazia dalla chirurgia robotica di alta precisione alle bilance per la distribuzione del peso dei pazienti, dalle pompe medicali per la misurazione della pressione e del flusso sanguigno. Nei paragrafi successivi verranno forniti alcuni esempi rappresentativi delle molteplici applicazioni di successo della tecnologia degli estensimetri integrati a dispositivi medici.

#### **2.3.1 Estensimetri nelle apparecchiature di diagnostica non invasive**

Le apparecchiature medicali non invasive di diagnostica sono strumenti diagnostici (descritti nel paragrafo 2.1) in grado di valutare le condizioni mediche di un paziente senza la necessità di procedure invasive, come incisioni chirurgiche o prelievi di sangue.

Le apparecchiature per la tomografia computerizzata richiedono un'elevata ripetibilità nel posizionamento del tavolo, una distribuzione uniforme del peso del paziente e un movimento preciso del dispositivo di scansione di immagini. Questa precisione è fondamentale per ottenere immagini di rilevazione ad alta accuratezza, minimizzando gli spostamenti eccessivi del paziente durante la scansione nel tubo. In questo contesto, l'integrazione di un sottoinsieme multiassiale

strumentato con estensimetri si è dimostrata efficace nel garantire un movimento regolare e costante del tavolo, oltre a una distribuzione ottimale del peso del paziente.

Le apparecchiature per mammografia (un esempio nella Figura 7) rappresentano uno strumento fondamentale nella diagnosi dei tumori al seno e delle relative patologie, frequentemente utilizzate dalla comunità medica. Durante l'acquisizione delle immagini, è essenziale monitorare l'intensità della forza esercitata sul paziente dalla macchina stessa. Per affrontare questa necessità, si è adottata una soluzione che prevede l'utilizzo di sensori di forza bi e triassiali basati su estensimetri; questi consentono di ottenere una risoluzione ottimale delle immagini e di garantire il massimo comfort al paziente durante l'esame mammografico.

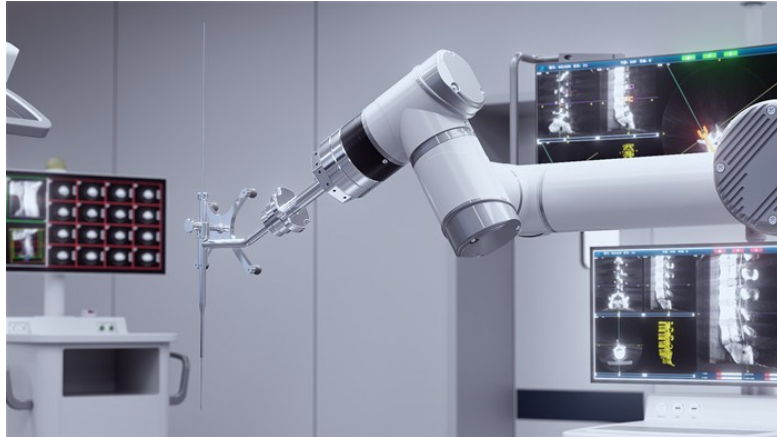


*Figura 7: dispositivo per mammografia*

### **2.3.2 Estensimetri nella chirurgia robotica da remoto**

Una tendenza recente nell'ambito della comunità medica è l'adozione di metodologie robotiche per la chirurgia remota (un esempio nella Figura 8): in questo tipo di applicazione, il chirurgo opera da remoto sul paziente, mantenendo comunque gli stessi elevati standard di precisione e accuratezza delle procedure chirurgiche tradizionali in loco. Nell'ambito della chirurgia ortopedica, in particolare, è essenziale misurare con precisione la forza di rotazione del trapano durante l'intervento, oltre che la profondità di foratura nell'osso lungo gli assi X, Y e Z, mantenendo simultaneamente ripetibile e precisa la posizione della punta dell'utensile. Per soddisfare i rigorosi requisiti di questa applicazione (che richiedono una precisione fino ai centesimi di millimetro) è stato impiegato un insieme di sottoinsiemi di sensori multiassiali basati

su estensimetri, in grado di misurare le forze sia in trazione che in compressione durante l'azione di penetrazione ed estrazione dell'utensile chirurgico.



*Figura 8: robot per la chirurgia ortopedica da remoto*

### **2.3.3 Estensimetri nelle pompe medicali**

Le pompe medicali rappresentano dispositivi cruciali utilizzati nell'ambito sanitario per somministrare farmaci, fluidi e soluzioni terapeutiche ai pazienti; progettate per garantire dosaggi accurati e controllati, contribuiscono al benessere e al recupero dei pazienti in varie situazioni cliniche, dall'ambulatorio alla terapia intensiva.

Tra le pompe mediche più celebri, spicca senza dubbio quella destinata all'erogazione di insulina, progettata per aiutare le persone affette da diabete nel gestire il livello di glucosio nel sangue, simulando il rilascio naturale di insulina da parte del pancreas. La pompa è concepita per un utilizzo continuativo sul corpo del paziente al fine di somministrare insulina in modo graduale, in risposta ai dati monitorati in tempo reale del glucosio nel sangue. La sua struttura deve risultare compatta, robusta e leggera per poter affrontare gli urti e le vibrazioni causati dalle normali attività quotidiane del paziente. Per soddisfare tali requisiti, è stato sviluppato un sensore ad estensimetri sub-miniaturizzato, ora divenuto uno standard industriale per numerosi produttori leader di pompe per insulina nel mondo.

## Capitolo 3

### STAMPA E CARATTERIZZAZIONE DI ESTENSIMETRI E TRIMMER

In questo capitolo si propone di esaminare in dettaglio il processo completo relativo alla stampa dei sensori e alla loro successiva analisi. Verrà quindi esaminato in dettaglio la metodologia di stampa, includendo la descrizione delle tecniche utilizzate; verrà illustrato il processo di idealizzazione delle geometrie dei vari dispositivi; saranno approfondite le procedure di caratterizzazione, comprendenti l'analisi delle proprietà morfologiche ed elettriche. Infine, saranno esaminati dettagliatamente tutti i materiali e gli strumenti impiegati.

#### 3.1 Metodo di stampa: Aerosol Jet Printing

L'aerosol jet printing (AJP) è una tecnologia di stampa contactless sviluppata e brevettata da Optomec durante il progetto DARPA con il governo degli Stati Uniti d'America, che fa parte della famiglia del material jetting a scrittura diretta. Questa tecnica offre una versatile capacità di modellazione digitale ad alta risoluzione, ampiamente rilevante per sistemi elettronici flessibili e rigidi e si basa sulla nebulizzazione dell'inchiostro posizionato all'interno di un opportuno contenitore mediante ultrasuoni (1.6-2.4 MHz), o sulla nebulizzazione pneumatica, "flussando" cioè un gas vettore nel contenitore ad alta velocità consentendo il passaggio del flusso risultante per un'apertura di dimensioni micrometriche così da generare l'aerosol.

L'AJP, schematicamente rappresentato in Figura 9, basa il suo funzionamento sull'atomizzazione di una soluzione liquida, l'inchiostro, contenente il materiale funzionale che, tramite un flusso di gas vettore, genera un getto concentrato per realizzare il pattern desiderato, sia esso un sensore, un circuito o delle interconnessioni, su un substrato posizionato su una piattaforma riscaldabile.

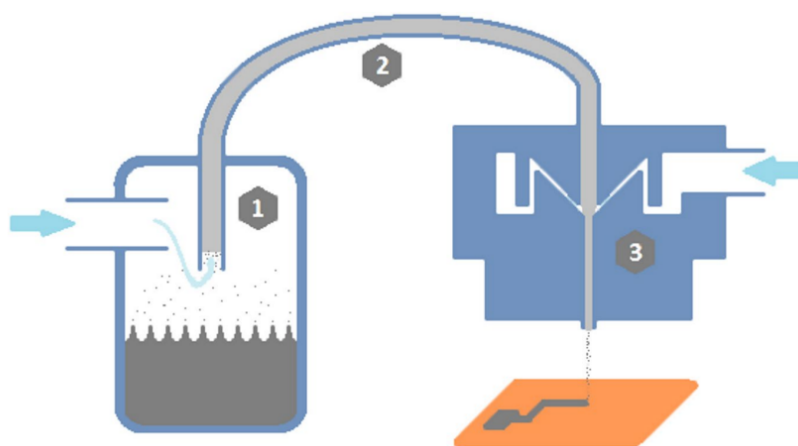


Figura 9: schematizzazione del processo di stampa

Un gas di trasporto, o gas vettore, è responsabile della generazione delle “goccioline” da depositare. Mentre le gocce di dimensioni superiori a 5  $\mu\text{m}$  ritornano nel serbatoio dell’inchiostro per effetto della forza di gravità, quelle più fini (di dimensioni quindi inferiori a 5  $\mu\text{m}$ ) vengono spinte dal flusso di gas verso l’ugello. Durante il transito, due meccanismi possono portare a perdite: la sedimentazione gravitazionale e l’impatto sulle pareti del tubo per la diffusione. Le goccioline sono infine dirette verso il substrato in un getto d’urto. Ecco perché, prima di raggiungere quest’ultimo, un secondo flusso di gas, definito gas guaina, circonda e comprime il flusso di aerosol mentre passa attraverso l’ugello. Ciò determina la focalizzazione del flusso generato, riducendo così lo “spray-over” (fenomeno che si riferisce alla dispersione e alla deposizione di inchiostro o materiali oltre la zona desiderata durante il processo di stampa).

Questa tecnologia è stata appositamente sviluppata per elaborare qualsiasi tipologia di substrato, sia esso rigido o flessibile, planare o 3D/superfici complesse. Ciò è possibile poiché l’aerosol generato mantiene la focalizzazione e quindi la risoluzione geometrica fino a circa 10 mm di distanza dal substrato. Con l’AJP è possibile ottenere risoluzioni geometriche fino a 40  $\mu\text{m}$ , potendo far affidamento ad un sistema di allineamento ad elevata precisione che consente la realizzazione di strutture multilayer e multimateriale. Infine, l’ampio range di viscosità permette versatilità nella progettazione e nella scelta dei materiali da impiegare nel processo produttivo.

Come tutte le tecnologie di elettronica stampata, l’aspetto nevralgico risiede nella viscosità del materiale che si intende andare a depositare. Nel caso dell’AJP, è opportuno fare una distinzione fra due differenti meccanismi di atomizzazione disponibili: l’atomizzazione pneumatica e l’atomizzazione a ultrasuoni.

L’atomizzazione pneumatica è composta da quattro fasi:

1. Un flusso di gas vettore viene convogliato ad alta velocità nel contenitore nel quale è stato collocato l’inchiostro. In questo caso il materiale avrà una viscosità compresa nell’intervallo 1-1000 cP (centiPoise), e un quantitativo minimo di circa 25 ml. Per l’effetto Venturi (che descrive il fenomeno in cui la velocità di un fluido aumenta mentre la pressione diminuisce quando attraversa una sezione di condotto con una gola più stretta), il gas, flussando, forza l’inchiostro a passare ad alta velocità per un minuscolo ugello divergente, consentendo la formazione delle goccioline che costituiscono l’aerosol;
2. Tramite differenze di pressione che vengono opportunamente regolate in fase di setup del processo, l’aerosol generato viene fatto passare per il cosiddetto “impattatore

- virtuale”, strumento meccanico che regola la dimensione delle particelle, in modo tale che la distribuzione delle particelle che raggiungono l’ugello sia omogenea;
3. Il flusso ottenuto raggiunge la testa di stampa dove incontra il flusso a cilindro di gas guaina che ha il compito di circondare le particelle generate. In questo modo, si andranno a prevenire possibili impatti e coaguli indesiderati sulle pareti dell’ugello di stampa;
  4. Il flusso risultante viene focalizzato sul substrato collocato su un piatto mobile e riscaldabile.

Nel caso invece dell’atomizzazione ad ultrasuoni, schematicamente rappresentata in Figura 10, circa 1-2 ml di inchiostro, con una viscosità compresa fra 1-5 cP, vengono inseriti in un flacone caratterizzato da una membrana sottile. L’intero flacone è collocato in un mezzo di trasferimento, solitamente acqua, dove oscillando ad alta frequenza crea un’onda che si propaga attraverso il mezzo di trasferimento fino a un flacone sospeso sopra il trasduttore. Il circuito del mezzo di trasferimento è chiuso e termocontrollato. Nei pressi del contenitore è situato un trasduttore piezoelettrico che viene messo in vibrazione applicando una corrente elettrica. Così facendo vengono generate delle onde meccaniche che si propagano nel mezzo acquoso e facilitano la frammentazione dell’inchiostro, quindi la sua atomizzazione. Infatti, in questo flacone, si forma un’onda stazionaria sulla superficie del flacone e la sovrapposizione di onde consecutive, porta alla formazione di grandi picchi che a loro volta provocano l’espulsione di piccole goccioline dall’inchiostro.

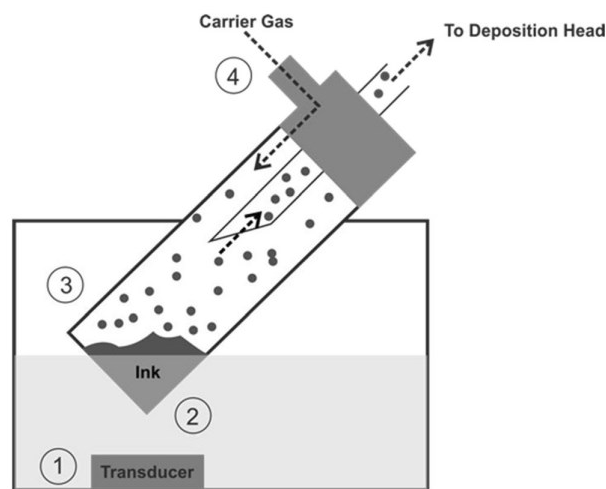


Figura 10: schematizzazione della atomizzazione ad ultrasuoni

Successivamente, in maniera analoga all’atomizzazione pneumatica, un gas vettore è responsabile di trasporto e focalizzazione delle particelle ottenute verso il substrato, tramite



applicazione di una pressione positiva. Questa tipologia di atomizzazione consente di ottenere aerosol a bassa dispersione e con dimensioni delle goccioline comprese tra i 2 e i 5  $\mu\text{m}$ .

La stampa AJP, con la sua elevata risoluzione e la vasta gamma di materiali stampabili, ha permesso di realizzare tracce conduttrici ed interconnessioni, sia planari che 3D, transistor a film sottile (TFT), condensatori o resistori su diversi substrati, polimeri flessibili e oggetti tridimensionali esistenti o fabbricati utilizzando tecnologie additive.

Questa tecnologia è vantaggiosa soprattutto per prototipi avanzati o produzioni in piccoli lotti grazie alla velocità di processo, pari a circa 12 m/min e quindi non eccessivamente elevata se rapportata ad altre tecnologie per la produzione di massa, come il caso di gravure printing, offset lithography e flexographic printing. D'altro canto, questa tecnologia presenta la possibilità di essere configurata in modalità multiugello, così da aumentare la capacità produttiva. Inoltre, AJP consente di stampare feature geometriche con un ridotto consumo di materiale e non richiede maschere od operazioni di pre-processing essendo una tecnologia digitale.

L'approccio pneumatico consente invece l'atomizzazione di materiali con una viscosità fino a 1000 cP sacrificando l'uniformità dell'aerosol prodotto e richiede inoltre passaggi di raffinamento del flusso aggiuntivi prima della deposizione.

Questa tecnologia ha inoltre un'ampia gamma di scelte in quanto a materiali da stampare. I più noti sono materiali biologici, dielettrici, polimeri, materiali conduttori, nanotubi di carbonio e adesivi. Data la loro buona conducibilità e all'ampia disponibilità di nanopolveri con diametri inferiori a 0,2  $\mu\text{m}$ , le polveri di argento, oro e rame sono i migliori materiali conduttivi per questo tipo di elettronica stampata.

Grazie ai suoi vantaggi precedentemente esplorati, prima tra tutti la sua versatilità, l'AJP ha trovato innumerevoli campi di applicazione come illustrato in Figura 11. Fra questi campi di applicazione c'è la fabbricazione di componenti elettronici passivi quali interconnessioni, condensatori, induttori o antenne. Inoltre, l'AJP viene anche usata per la produzione di componenti elettronici attivi, tra cui transistor e switch, e sensori, come fotorilevatori, sensori capacitivi, chimici e, ovviamente, estensimetri.

Infine, sfruttando il fatto di non essere limitati a stampare su superfici piane, l'AJP viene spesso utilizzata per la realizzazione di strutture tridimensionali, trovando spazio di applicazione anche in biologia. In particolare, la ricerca si è concentrata sulla stampa di molecole biologiche, quali proteine, enzimi e filamenti di DNA.

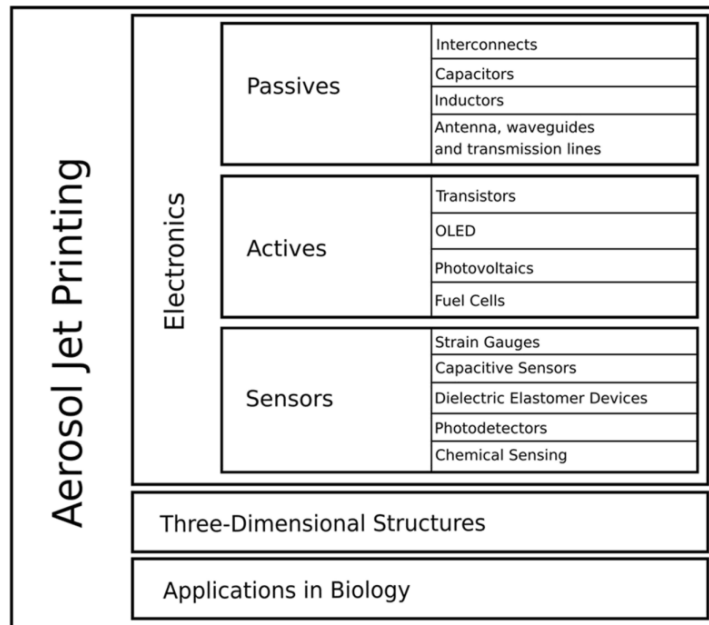


Figura 11: campi di applicazione dell'AJP

### 3.2 Materiali

Durante il processo di stampa e di caratterizzazione svolto in questa tesi, sono stati impiegati una varietà di composti e materiali, ciascuno scelto in base alle specifiche dell'applicazione e alle proprietà richieste per il componente o il dispositivo in fase di sviluppo.

Come principale substrato per la stampa è stato scelto il Kapton, una pellicola composta principalmente da poliammide aromatica, ampiamente utilizzato in una vasta gamma di applicazioni che richiedono una combinazione di resistenza alle alte temperature, flessibilità e affidabilità. Grazie alla sua eccezionale stabilità termica, il Kapton può infatti sopportare temperature estreme, che vanno da  $-269^{\circ}\text{C}$  a oltre  $400^{\circ}\text{C}$ , senza subire deformazioni o deterioramento delle proprietà meccaniche. Questa caratteristica lo rende ideale per applicazioni in ambienti ad alta temperatura, come nell'industria aerospaziale, automobilistica ed elettronica. Inoltre, il Kapton offre una resistenza chimica superiore a solventi, oli e agenti atmosferici, garantendo una lunga durata e una protezione affidabile per i componenti elettronici e i circuiti stampati. La sua flessibilità permette anche la sua utilizzazione in applicazioni che richiedono conformabilità e adattabilità a superfici irregolari. Ogni foglio di Kapton è stato pulito accuratamente con etanolo prima dell'utilizzo.

Il secondo substrato di stampa utilizzato è stato l'ABS (acrilonitrile-butadiene-stirene), un polimero termoplastico ampiamente utilizzato data la sua notevole resistenza agli urti e alla trazione, oltre che una buona durezza e tenacità. Inoltre, l'ABS ha una stabilità termica elevata e

una resistenza chimica significativa, che lo rendono adatto per l'esposizione a varie condizioni ambientali e agenti chimici.

Per la stampa è stato impiegato il Genesink Smart Aero S-CS61308, un inchiostro conduttivo a base di argento che presenta le seguenti proprietà:

- elevata conduttività elettrica;
- ridotte temperature di sinterizzazione;
- inchiostro non CMR (non classificato come cancerogeno, mutageno o tossico);
- compatibile con vari processi di indurimento, inclusi quelli a infrarossi, a bassa pressione e termici;
- buona adesione su vari substrati flessibili come PC, PET e Kapton.

Infine, per il collegamento tra elettronica stampata e cavi è stato impiegato il CircuitWorks CW2400, un materiale epossidico in argento bi-componente altamente conduttivo, caratterizzato da una rapida polimerizzazione, alta resistenza di incollaggio e compatibilità con un'ampia gamma di materiali.

### **3.3 Realizzazione delle geometrie**

La prima fase dello studio ha coinvolto la formulazione teorica dei trimmer per la compensazione della tensione di offset, come precedentemente menzionato nel paragrafo 1.3. Successivamente, è stata eseguita la progettazione di un ponte di Wheatstone in configurazione full-bridge, seguita dall'applicazione dei trimmer a ciascun estensimetro del ponte. Infine, l'intero processo è stato tradotto sull'ambiente AutoCAD, un software di progettazione digitale.

#### **3.3.1 Geometria degli estensimetri**

Come sensori di deformazione si è optato per l'impiego della tipica configurazione dell'estensimetro a foglio a griglia metallica (già mostrato nella Figura 1), composto da un singolo filamento di materiale che assume la forma di una serpentina, con 20 torsioni che creano una griglia composta da 21 linee parallele totali. Il risultato finale misura 16.82 mm in altezza e 6.82 mm in larghezza.

### 3.3.2 Geometria dei trimmer

L'idea iniziale per affrontare il problema dell'offset consisteva nella progettazione di un circuito supplementare da inserire in serie con un estensimetro, il quale doveva soddisfare una serie di requisiti specifici:

- mantenere la capacità di misura dell'estensimetro il più possibile invariata;
- presentare una geometria semplice al fine di semplificare l'analisi teorica e la comprensione pratica;
- essere facilmente modificabile direttamente sul campo da chiunque, senza richiedere competenze tecniche avanzate;
- consentire la regolazione controllata della resistenza del sensore, seguendo un andamento predeterminato da una legge nota o creata su misura.

Il risultato ottenuto consiste in un rettangolo costituito da una successione di quadrati, in cui ogni lato è rappresentato da resistenze di valore  $R$ . L'obiettivo consiste nel determinare la resistenza totale del rettangolo, procedendo sequenzialmente lungo i suoi lati e analizzando l'effetto sull'impedenza in risposta all'aggiunta incrementale di quadrati.

Per il primo lato si ottiene quindi:

$$R_{eq0} = R \quad [10]$$

La Figura 12 mostra il primo quadrato, da cui si ricava la relazione [11]:

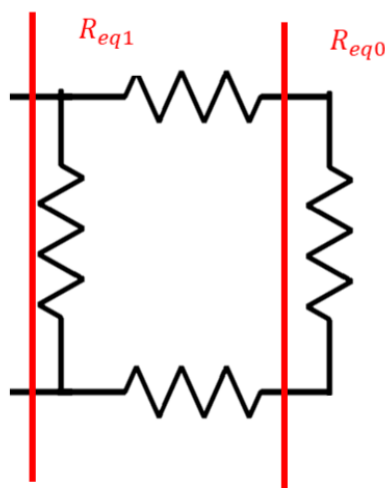


Figura 12: primo quadrato del trimmer

$$R_{eq1} = R \parallel (2R + R) = R \parallel (2R + R_{eq0}) \quad [11]$$

Completando il trimmer con un numero  $N$  di quadrati (un esempio nella Figura 13) e iterando la relazione [11], si ottiene:

$$R_{eqN} = R \parallel (2R + R_{eq(N-1)}) \quad [12]$$

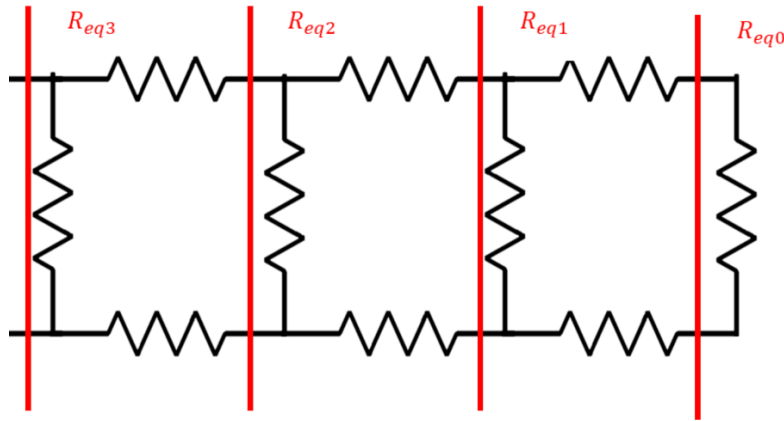


Figura 13: geometria del trimmer

Le resistenze rispetto ai primi quattro valori di  $N$  sono illustrate nella Tabella 1:

$N$	4	3	2	1	0
$R$	$\frac{153}{209} R$	$\frac{41}{56} R$	$\frac{11}{15} R$	$\frac{3}{4} R$	$R$
	$\approx 0.7321 R$	$\approx 0.7321 R$	$\approx 0.7333 R$	$0.7500 R$	$R$

Tabella 1: resistenza del trimmer rispetto a  $N$

È stato inoltre osservato che all'aumentare del numero  $N$  la resistenza converge ad un valore preciso:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} R_{eqN} = R (\sqrt{3} - 1) \quad [13]$$

Una volta ottenuta una struttura conosciuta e la sua resistenza totale, si è analizzato il modo per modificare quest'ultima in modo controllato. La soluzione più semplice si è rivelata essere il taglio sequenziale delle resistenze verticali; viene quindi introdotta la variabile  $m$  per indicare il numero di tagli, con  $m \leq N$ . Dopo ogni taglio, come evidenziato nella Figura 14, si ottiene facilmente la seguente relazione:

$$R_{Neq} = 2mR + R_{eq(N-m)} \quad [14]$$

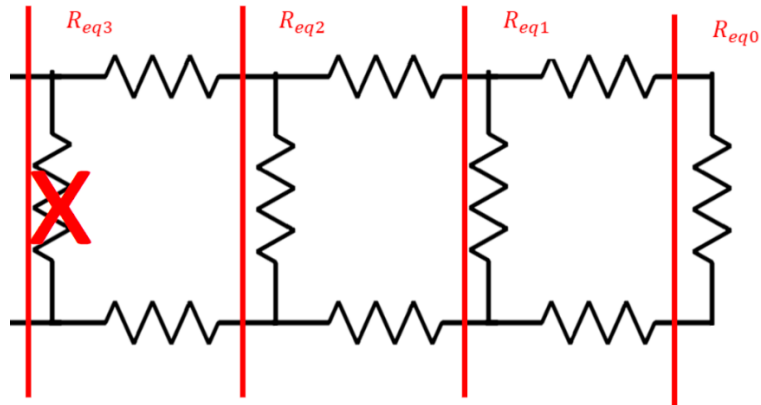


Figura 14: trimmer con un taglio

I valori delle resistenze rispetto ai tagli di un trimmer con  $N = 4$  sono illustrate nella Tabella 2:

$m (N = 4)$	0	1	2	3	4
$R$	$\frac{153}{209} R$	$\frac{153}{56} R$	$\frac{71}{15} R$	$\frac{27}{4} R$	$9 R$
	$\approx 0.7321 R$	$\approx 2.7321 R$	$\approx 4.7333 R$	$6.7500 R$	$9 R$

Tabella 2: resistenza del trimmer rispetto a  $m$

Il prodotto finale è un trimmer di dimensioni 1.79 mm per 16.11 mm per la stampa su Kapton, 1 mm per 9 mm per la stampa su ABS; composto da un totale di nove quadrati, consente quindi la possibilità di effettuare altrettanti tagli; un decimo taglio comporterebbe l'apertura del circuito, rendendo il trimmer e tutto ciò ad esso collegato inutilizzabile. Secondo le precedenti relazioni, inoltre, si è stimata  $R$  pari circa a 1.66  $\Omega$ .

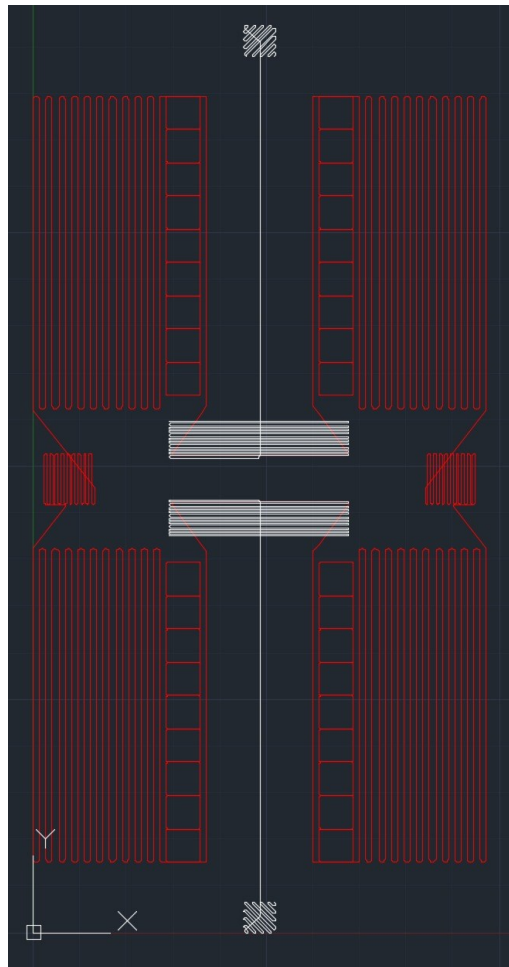


Figura 15: geometria del trimmer su AutoCAD

### 3.3.3 Geometria dei ponti di Wheatstone

Per i ponti di Wheatstone è stata adottata una configurazione "full bridge", comprendente quattro estensimetri, ciascuno dei quali collegato in serie ad un trimmer. Inoltre,

tra ogni estensimetro è stata inserita una piazzola piena (2.70 mm di lato per quelle quadrate, 1.94 mm per 9.59 mm per quelle rettangolari) per agevolare le successive analisi; in particolare, le due piazzole rettangolari sono state connesse ad una piazzola quadrata esterna ciascuna, di lato 1.70 mm, sempre per praticità. Le dimensioni finali risultano 24.32 mm di larghezza per 41.08 mm di altezza.



*Figura 16: geometria del ponte su AutoCAD*

### **3.4 Protocollo di stampa e di sinterizzazione**

Terminata la fase di progettazione delle geometrie si è dato inizio al processo di stampa; per questo lavoro di tesi è stato impiegato il modello di stampante Optomec Aerosol Jet AJ300, visibile nella Figura 17.



*Figura 17: stampante Aerosol Jet AJ300*

Dopo aver configurato la stampante per l'atomizzazione pneumatica con i parametri (DA VERIFICARE) riportati nella Tabella 3, è stato posizionato e fissato sul piatto di stampa dedicato il substrato; per quest'ultimo è stata scelta la pellicola di Kapton, descritta nel paragrafo 3.2 e, come anticipato, ogni foglio è stato attentamente pulito con etanolo. Successivamente, gli inchiostri sono stati versati nei contenitori appropriati e, dopo una rapida calibratura della telecamera interna, il processo di stampa è stato avviato.

Velocità di stampa	3 mm/s
Sheath gas flow	120 sccm
Atomizer gas flow	880 sccm
Exhaust gas flow	850 sccm
Distanza dal substrato	4 mm

*Tabella 3: parametri di stampa*

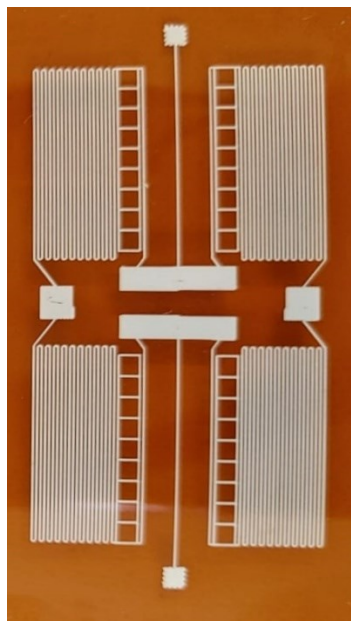
Subito dopo la stampa i campioni sono stati sinterizzati con il forno statico Thermo Scientific Heraeus VT6060P 400C mostrato nell'immagine in Figura 18. Il processo di sinterizzazione è durato un'ora a una temperatura costante di 150°C.





*Figura 18: forno statico Thermo Scientific Heraeus VT6060P 400C*

Il risultato finale, stampato e sinterizzato, è riportato nella Figura 19.



*Figura 19: ponte stampato su Kapton*

Sono stati inoltre stampati singoli trimmer su sottili lastre rettangolari di ABS per consentire una diversa modalità di analisi. Sono stati prodotti tre trimmer per ogni campione, di cui due orientati nella direzione longitudinale e uno in quella trasversale, posizionati tutti sullo stesso estremo. Il processo di stampa e trattamento rimane identico a quello precedentemente descritto.

### 3.5 Metodi di caratterizzazione: descrizione dei protocolli utilizzati

Una volta ottenuti i campioni, essi sono stati soggetti a caratterizzazione sia dal punto di vista morfologico che elettrico. Le misure morfologiche comprendono valutazioni di spessore e larghezza, atte a stimare la sezione delle tracce conduttive realizzate; successivamente, combinando queste misurazioni con i dati di resistenza ottenuti, è possibile ottenere una stima delle resistività sperimentali dei campioni, confrontandole con i valori di riferimento forniti nei datasheet degli inchiostri dai rispettivi produttori. Questo procedimento è utile anche per valutare l'effettiva qualità di stampa, attraverso la verifica di uniformità dello spessore del materiale e di linearità dei profili geometrici.

La caratterizzazione morfologica è stata eseguita solo sul primo campione prodotto, ossia su tre ponti stampati sullo stesso foglio di Kapton.

Le misurazioni dello spessore delle tracce sono state condotte tramite il profilometro ottico Filmetrics Profilm 3D, mostrato nella Figura 20. Questo strumento si basa sulla moderna interferometria a luce bianca (WLI), un metodo ottico senza contatto per la misurazione dell'altezza della superficie su strutture tridimensionali. È in grado di misurare profili e rugosità superficiali fino a  $0,05\ \mu\text{m}$ , operando nell'intervallo di  $50\ \text{nm}$ - $10\ \text{mm}$  con substrati e materiali caratterizzati da una riflettanza compresa tra  $0,05$  e  $100\%$ . Il sistema implementa una fotocamera da  $5\ \text{MP}$ , il modello Nikon CF IC Epi Plan 20x, con campo visivo di  $1,0 \times 0,85\ \text{mm}$ .

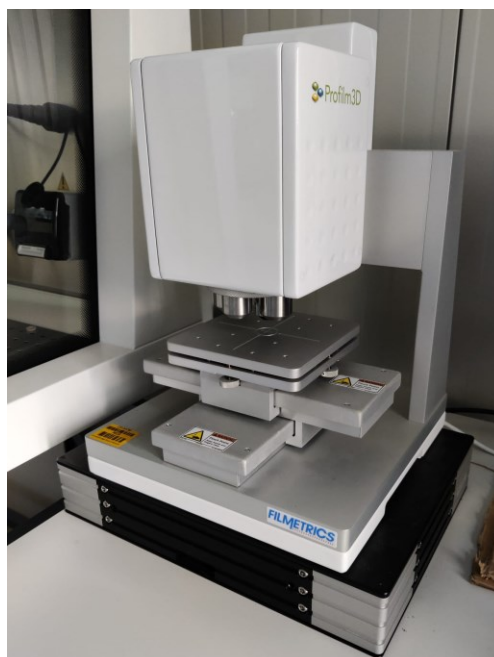


Figura 20: profilometro Filmetrics Profilm 3D

Per ciascun quarto di ponte sono state condotte due misurazioni: una relativa a una porzione dell'estensimetro e una relativa a una porzione del trimmer; ciò ha comportato un totale di 24 misurazioni complessive.

Le misurazioni di larghezza sono state condotte utilizzando il microscopio ottico Orma Scientific NB50T, appositamente calibrato, completo del suo software dedicato e della fotocamera modello Orma Scientific HDMI 27 MDH5, impiegata per acquisire le immagini e valutare le caratteristiche degli elementi stampati. Analogamente a quanto eseguito al profilometro, sono state eseguite in totale 24 misurazioni, seguendo lo stesso schema.

La caratterizzazione elettrica è stata frammentata in diverse fasi distinte al fine di ottenere una valutazione dettagliata delle prestazioni del sensore. Queste fasi includono la misurazione della variazione della tensione di offset, che rappresenta la discrepanza dalla tensione di riferimento quando il sensore è in uno stato non deformato, insieme alla misurazione della temperatura per valutare l'effetto delle variazioni termiche sulle prestazioni del sensore. Inoltre, è stata analizzata la variazione di resistenza del trimmer in risposta a uno sforzo controllato, permettendo di comprendere la relazione tra la deformazione applicata e la risposta elettrica del dispositivo.

Il multimetro digitale da banco Keysight 34465A (visibile nella Figura 21) è stato il principale strumento utilizzato, adottando diverse configurazioni in relazione alle varie misurazioni effettuate durante il processo sperimentale.



*Figura 21: multimetro digitale Keysight 34465A*

La misurazione della tensione di offset dei ponti (come mostrato nello schema in Figura 22) è stata eseguita fissando opportunamente i ponti su una base di cartoncino solido per prevenire eventuali deformazioni indesiderate. Durante la misurazione, il polo negativo del multimetro è stato collegato al terminale B e quello positivo al terminale D, mentre è stata applicata una tensione con il polo positivo su A e il polo negativo su C.

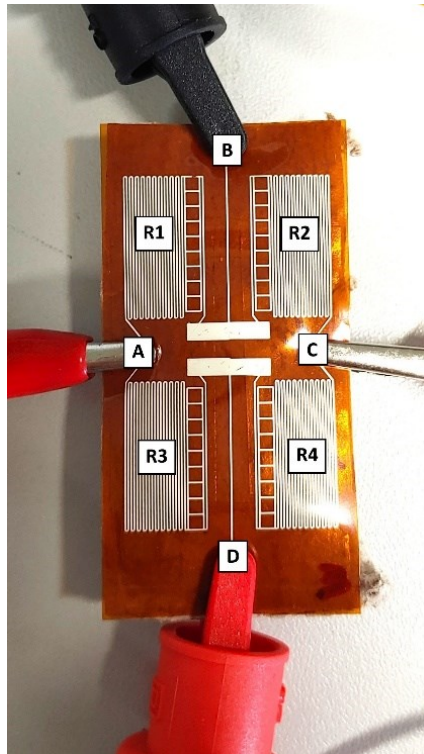
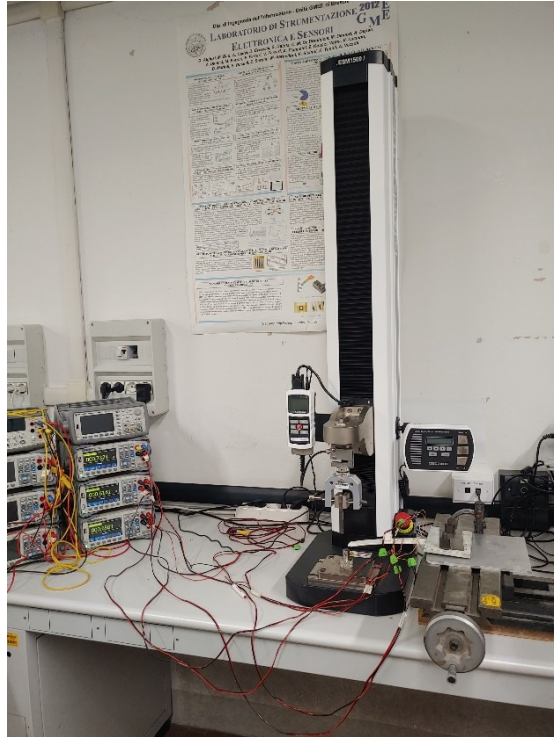


Figura 22: configurazione del ponte per la misura della tensione

Dopo aver identificato la prima tensione di offset di ciascun ponte, indicativa della qualità della stampa (essendo più vicina allo zero quando la stampa è uniforme), si è proceduto al taglio di tratti trasversali dei ponti. L'obiettivo era di far avvicinare il più possibile la tensione di offset allo zero, tenendo presente che i tagli effettuati su R1 e R4 tendono ad aumentarla, mentre quelli sugli altri tendono a diminuirla. Attraverso misurazioni costanti del multimetro, è stato studiato l'impatto di ciascun taglio sulla tensione.

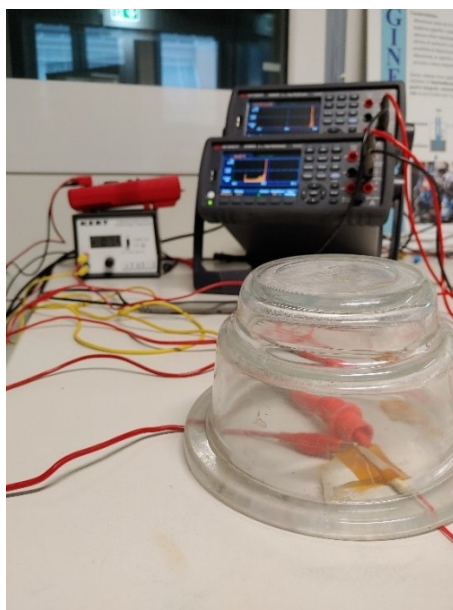
Per ciascun ponte sono state misurate le resistenze tra le coppie di terminali AB, BC, CD, DA, AC e BD; in particolare, la differenza di resistenza tra le coppie AC e BD è stata considerata un ulteriore indice di qualità di stampa. Per effettuare queste misurazioni è stata utilizzata la configurazione del multimetro a due fili.

Per i campioni di trimmer stampati su ABS, sono state effettuate misurazioni della resistenza in condizioni normali e dopo ciascun taglio consecutivo. Inoltre, è stata valutata la variazione della resistenza applicando, sull'estremità opposta dei campioni rispetto ai trimmer, un carico da 0 a 0.2 kgF (dove 1 kgF corrisponde a circa 9.81 N) con un incremento graduale di 0.05 kgF, utilizzando il banco dinamometrico Luchsinger ESM1500 (mostrato nella Figura 23). Questo processo ha comportato un totale di 50 misurazioni per ogni trimmer, e quindi di 150 per ciascun campione di ABS; per condurre tali misurazioni è stata impiegata la configurazione a 4 fili del multimetro.



*Figura 23: banco dinamometrico Luchsinger ESM1500*

Per analizzare la problematica causata dal fenomeno dell'auto riscaldamento è stata osservata la variazione di temperatura su quarti di ponte esposti a differenti tensioni; queste misurazioni sono state effettuate sia in condizioni normali che con i quarti di ponte coperti da un recipiente in vetro, al fine di isolarli dall'ambiente esterno. Per raccogliere questi dati è stata collegata al multimetro una sonda Pt100, una termoresistenza al platino, posizionata al di sotto del foglio di substrato.



*Figura 24: configurazione per la misura della temperatura*

## Capitolo 4

### RISULTATI E DISCUSSIONE

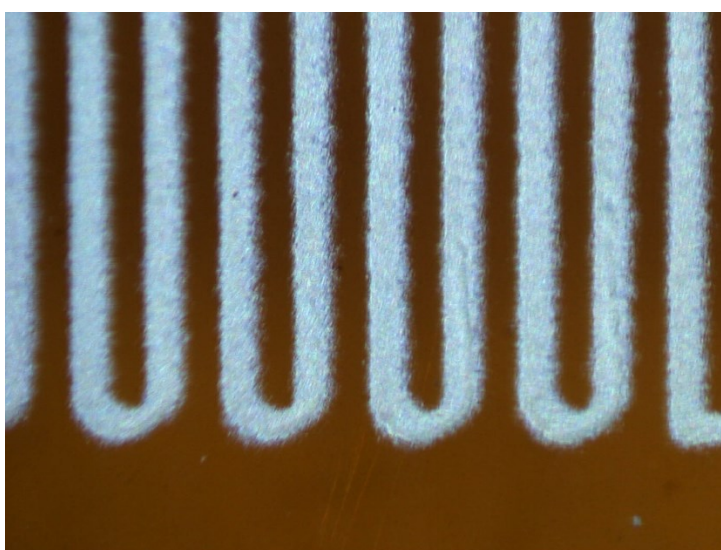
Questo capitolo è dedicato a presentare in dettaglio i risultati derivanti dai processi di caratterizzazione descritti nei paragrafi precedenti; inoltre, si concentra sulla discussione approfondita di tali risultati, analizzandone le implicazioni. Allo stesso tempo, si affrontano le problematiche incontrate durante il processo, oltre quelle anticipate precedentemente.

#### 4.1 Analisi morfologica

L'analisi morfologica è avvenuta per tre ponti stampati, rispettivamente chiamati nel seguito dell'elaborato Ponte 1, Ponte 2 e Ponte 3. Le misurazioni della larghezza sono state effettuate utilizzando un microscopio ottico insieme al relativo software integrato; per valutare la larghezza, invece, è stato impiegato un profilometro. I risultati ottenuti sono organizzati e suddivisi tra estensimetri e trimmer.

##### 4.1.1 Larghezza e spessore degli estensimetri

Per la misurazione della larghezza è stata selezionata una porzione rappresentativa per ciascun estensimetro di ogni ponte, e per ciascuna di queste porzioni sono state acquisite immagini utilizzando un microscopio ottico, regolando il fuoco in modo da ottenere una definizione ottimale dei dettagli stampati. Il risultato di questo processo è riportato nella Figura 25.



*Figura 25: porzione di estensimetro analizzata al microscopio*



Attraverso l'analisi di questo file utilizzando il software integrato con lo strumento, è possibile estrarre le dimensioni desiderate; il risultato di questa elaborazione è evidenziato nella Figura 26.

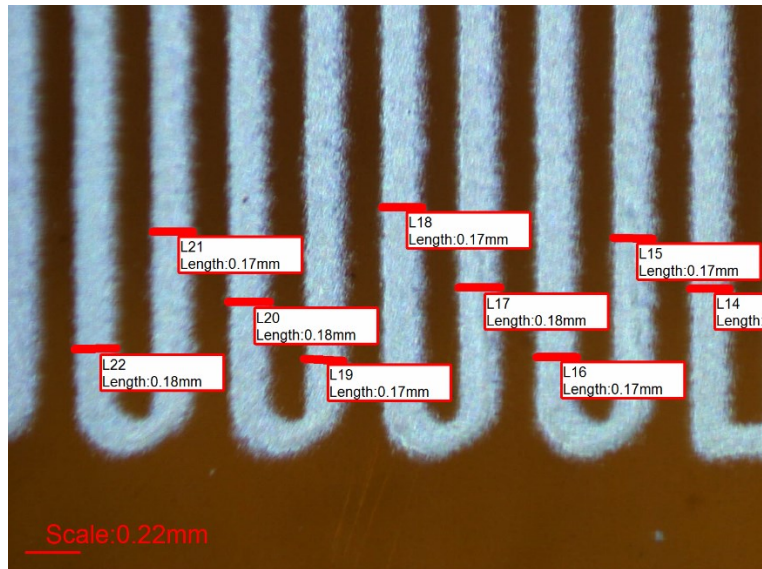


Figura 26: porzione di estensimetro analizzata al microscopio, con misure

Sono stati acquisiti complessivamente 32 dati di larghezza per ciascun ponte, per i quali sono stati calcolati i parametri statistici di media e deviazione standard riassunti in Tabella 4. Dall'analisi di tali dati e delle relative immagini, è possibile dedurre che nonostante la presenza di un profilo frastagliato e di gocciolature al di fuori della traccia principale (fenomeno noto come "overspray"), la tecnica di stampa tramite AJP dimostra una notevole consistenza nel risultato ottenuto. Questo aspetto di elevata ripetibilità è di fondamentale importanza nella valutazione di un processo di stampa, poiché ne determina l'affidabilità sul lungo periodo.

	Media [mm]	Deviazione standard [mm]
Ponte 1	0.1772	0.0089
Ponte 2	0.1800	0.0075
Ponte 3	0.1786	0.0139

Tabella 4: media e deviazione standard delle larghezze degli estensimetri

Anche per la misurazione dello spessore è stata scelta una porzione rappresentativa per ciascun estensimetro di ogni ponte, e per ciascuna di queste aree è stata impiegata una procedura meticolosa e attenta, in linea con i requisiti tecnologici dell'interferometria a luce

bianca. Dopo l'elaborazione tramite il software integrato al profilometro, il risultato è illustrato nella Figura 27.

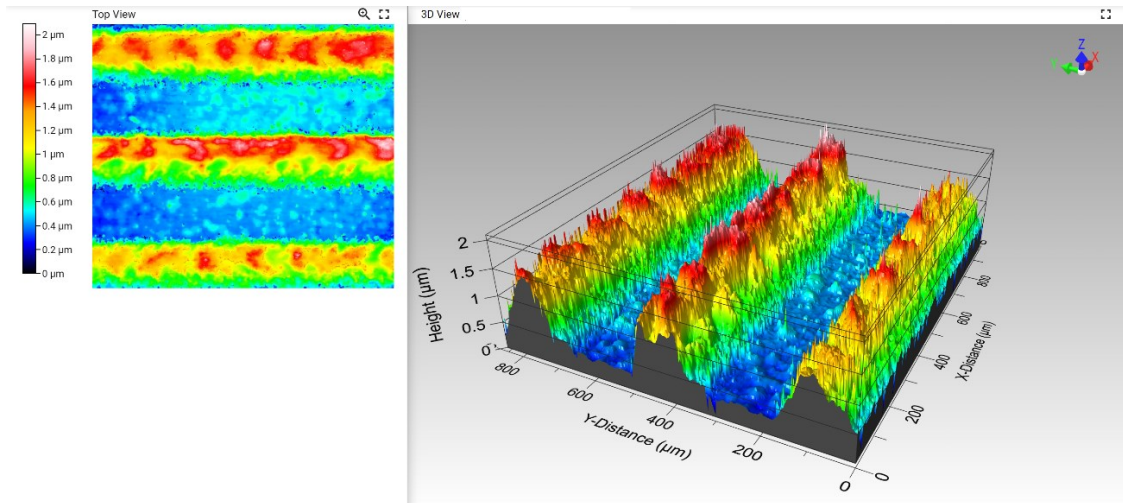


Figura 27: porzione di estensimetro analizzata dal profilometro

Gli spessori raggiunti sono stati riportati nella Tabella 5; dall'analisi dell'immagine sono evidenti le diverse variazioni nello spessore che possono però essere considerate trascurabili data la loro entità nell'ordine dei  $\mu\text{m}$ .

	Spessore [ $\mu\text{m}$ ]
Ponte 1	1.484
Ponte 2	1.549
Ponte 3	1.610

Tabella 5: spessori degli estensimetri

#### 4.1.2 Larghezza e spessore dei trimmer

Come già svolto nell'analisi degli estensimetri, per la misurazione della larghezza è stata scelta una porzione rappresentativa per ciascun trimmer di ogni ponte. In seguito, è stato attentamente regolato il fuoco del microscopio per garantire la massima nitidezza dell'immagine del campione in esame per ciascuna di queste aree selezionate. Il risultato di questo processo è illustrato nella Figura 28.



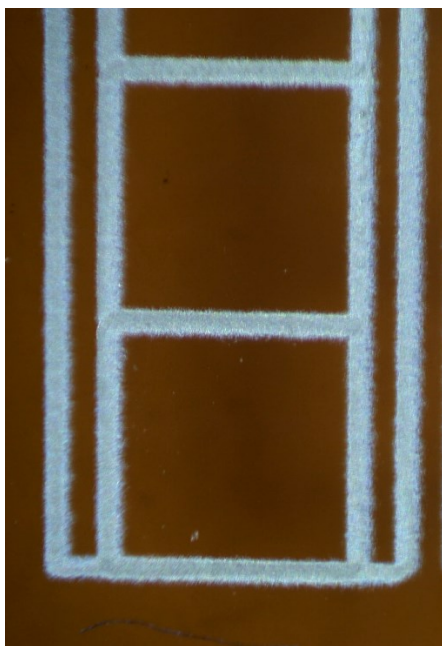


Figura 28: porzione di trimmer analizzata al microscopio

Mediante l'elaborazione di questo file utilizzando il software integrato nello strumento, sono state estratte le dimensioni desiderate, evidenziate in Figura 29.

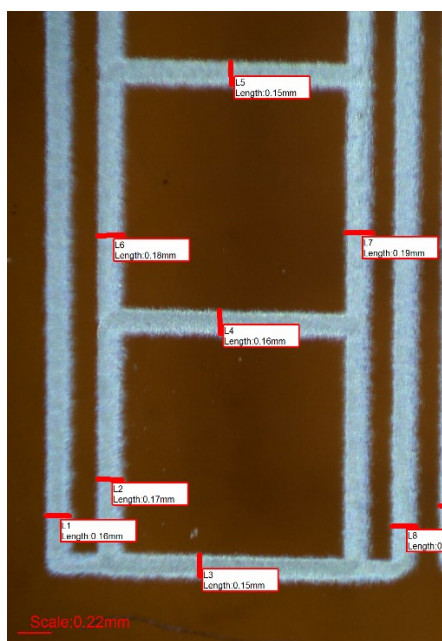


Figura 29: porzione di trimmer analizzata al microscopio, con misure

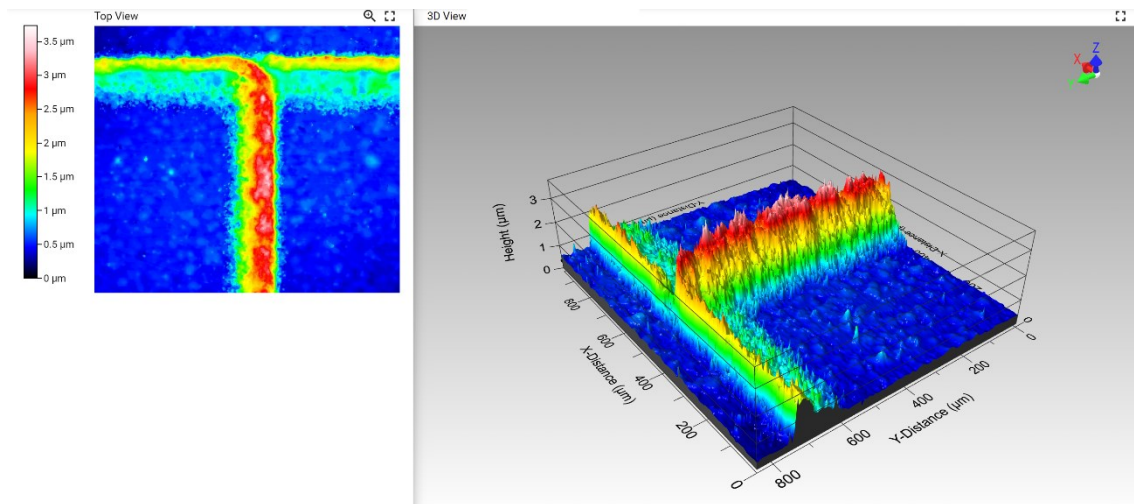
Sono stati rilevati complessivamente 32 dati di larghezza per ogni ponte, per i quali sono stati calcolati i parametri statistici di media e deviazione standard riassunti in Tabella 6. Dall'analisi di questi dati e delle immagini corrispondenti emerge che, nonostante la presenza di un profilo irregolare e di gocciolature al di fuori della traccia principale (fenomeno noto come "overspray"),

la tecnica di stampa tramite AJP mostra una notevole coerenza nei risultati ottenuti. Questa consistenza, fondamentale per la ripetibilità del processo di stampa, riveste un'importanza cruciale nella valutazione dell'affidabilità nel lungo termine.

	Media [mm]	Deviazione standard [mm]
Ponte 1	0.1653	0.0112
Ponte 2	0.1711	0.0132
Ponte 3	0.1656	0.0206

*Tabella 6: media e deviazione standard delle larghezze dei trimmer*

Anche per la misurazione dello spessore è stata selezionata una porzione rappresentativa per ciascun trimmer di ogni ponte. Per ogni area selezionata, è stata seguita una procedura meticolosa e attenta, in accordo con i requisiti tecnologici dell'interferometria a luce bianca. Dopo l'elaborazione attraverso il software integrato al profilometro, il risultato è mostrato nella Figura 30.



*Figura 30: porzione di trimmer analizzata dal profilometro*

Dall'analisi dell'immagine è emerso un inconveniente imprevisto: le sezioni trasversali dei trimmer presentano uno spessore doppio rispetto a quelle longitudinali. La ricerca della causa di questo problema ha rivelato che la stampante, nel processo di stampa del ponte come un unico filamento, crea i trimmer seguendo un percorso a forma di "otto", passando quindi due volte sulle sezioni trasversali e depositando quindi il doppio del materiale. Di conseguenza, nella

Tabella 7 gli spessori sono stati suddivisi tra le sezioni trasversali (indicate come  $R_v$ , “resistenze verticali”) e quelle longitudinali (indicate come  $R_o$ , “resistenze orizzontali”).

	Spessore $R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	Spessore $R_o$ [ $\mu\text{m}$ ]
Ponte 1	2.312	1.224
Ponte 2	2.817	1.346
Ponte 3	3.299	1.836

Tabella 7: spessori delle sezioni trasversali e longitudinali dei trimmer

Di conseguenza, è necessario adattare i ragionamenti proposti nel paragrafo 3.3.2, poiché si era ipotizzato che “ogni lato del quadrato è rappresentato da resistenze di valore  $R$ ”. Il primo passo consiste quindi nel suddividere le sezioni del trimmer in  $R_o$  e  $R_v$ , come nella Figura 31.

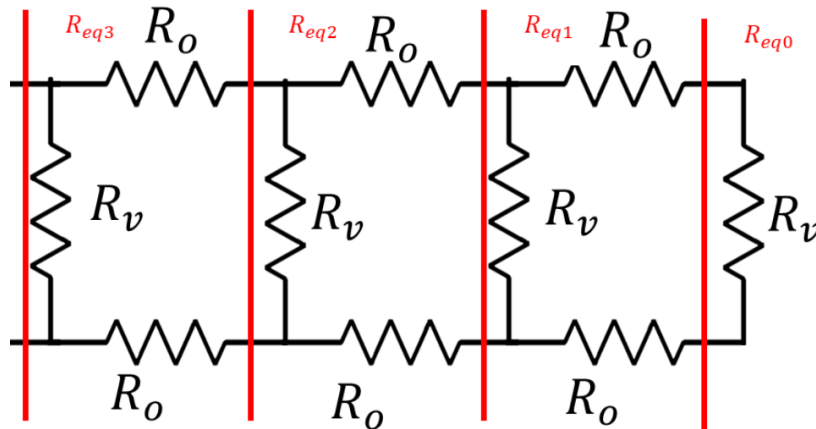


Figura 31: trimmer con resistenze riadattate

È necessario ora sostituire le relazioni [10], [11], [12], [13] e [14] con le equazioni [15], [16], [17], [18] e [19] qui di seguito riportate:

$$R_{eq0} = R_v \quad [15]$$

$$R_{eq1} = R_v \parallel (2R_o + R_v) = R_v \parallel (2R_o + R_{eq0}) \quad [16]$$

$$R_{eqN} = R_v \parallel (2R_o + R_{eq(N-1)}) \quad [17]$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} R_{eqN} = R_o \left( \sqrt{1 + 2 \frac{R_v}{R_o}} - 1 \right) \quad [18]$$

$$R_{Neq} = 2mR_o + R_{eq(N-m)} \quad [19]$$

In base a queste nuove equazioni, le resistenze  $R_o$  e  $R_v$  sono state approssimativamente stimate rispettivamente a  $0.55 \Omega$  e  $2.11 \Omega$ .

## 4.2 Analisi elettrica

I paragrafi successivi sono dedicati all'analisi approfondita sia delle problematiche tecniche discusse nel paragrafo 1.3, tra cui la tensione di offset e l'effetto di autoriscaldamento, sia all'effetto provocato dal trimmer durante la deformazione. Inoltre, verranno esplorate possibili soluzioni o strategie di compensazione per mitigare tali problematiche.

### 4.2.1 Compensazione della tensione di offset

La progettazione dei trimmer effettuata in questo lavoro di tesi mira esplicitamente a compensare la tensione di offset dei ponti di Wheatstone, al fine di renderli più precisi. La procedura prevede di ridurre al minimo il modulo della tensione di offset, cercando di farlo tendere il più possibile allo zero. Si è tenuto conto del fatto che i tagli applicati su  $R_1$  e  $R_4$  (rispetto a quanto illustrato nella Figura 22, rappresentata per comodità nella Figura 32) aumentano la tensione di offset, mentre quelli applicati sugli altri la diminuiscono. Durante questo processo, la tensione è stata monitorata costantemente attraverso il multimetro.

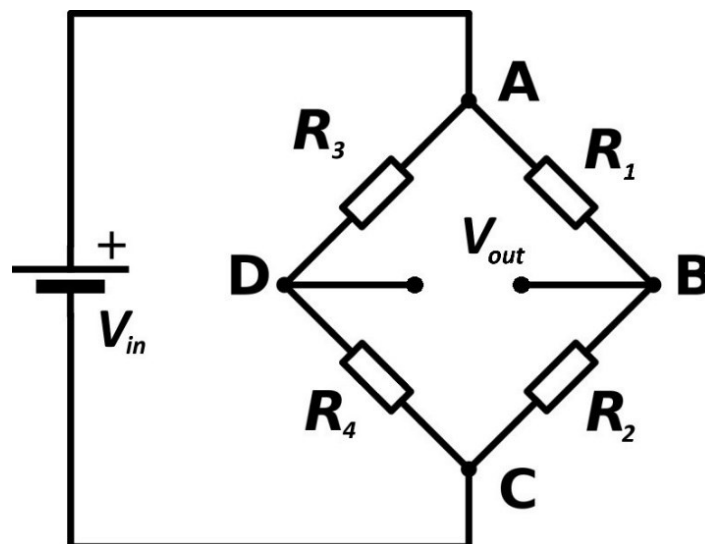


Figura 32: schema della configurazione del ponte usata durante i tagli

Otto ponti sono stati soggetti a questa procedura; i risultati sono mostrati nella Figura 33, che illustra la variazione della tensione in relazione al numero di tagli effettuati.

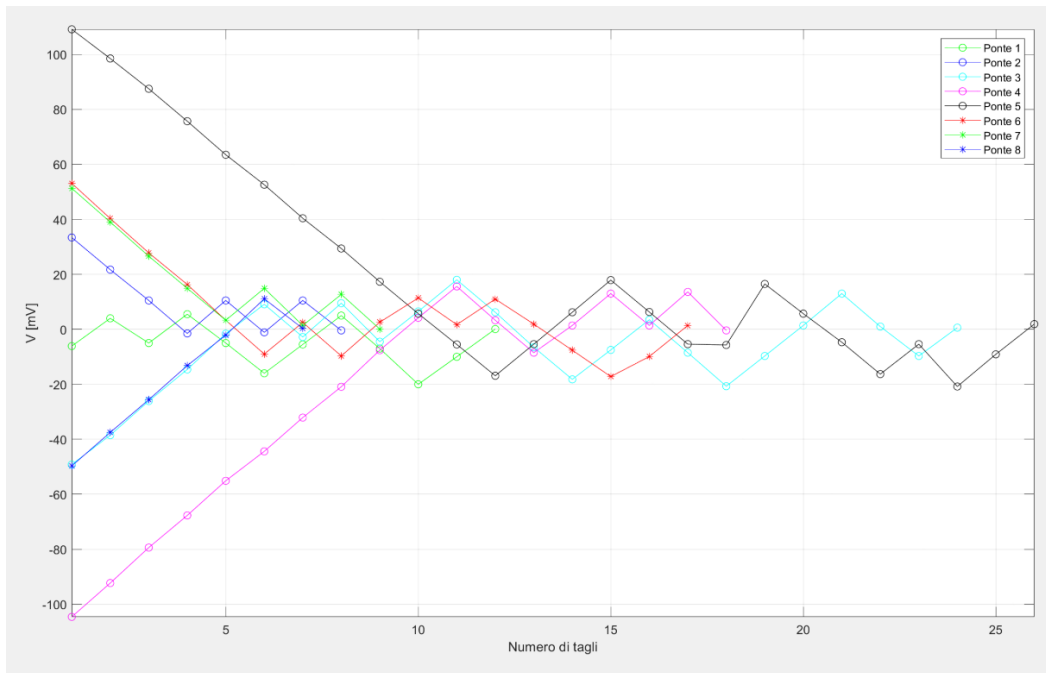


Figura 33: variazione della tensione in relazione ai tagli effettuati

Come evidente nella figura, la procedura è in grado di compensare tensioni di offset anche con valori superiori ai 100 mV, grazie ai tagli che possono generare una differenza di potenziale di media 11.49 mV e deviazione standard 1.9 mV ciascuno.

Per analizzare più approfonditamente l'effetto di ciascun taglio, si è dedicata particolare attenzione al Ponte 2, acquisendo un totale di 8900 dati per poter essere raggruppati e visualizzati in diversi modi. Inizialmente, nella Figura 34 viene mostrata in dettaglio la variazione della tensione in relazione al numero di tagli effettuati, focalizzandosi esclusivamente sul ponte preso in esame.

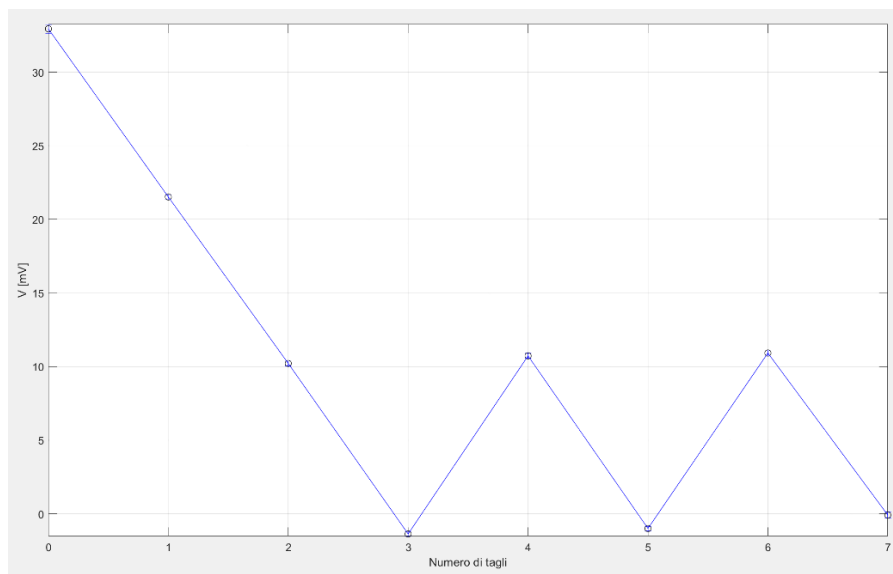


Figura 34: variazione della tensione in relazione ai tagli effettuati per il Ponte 2

Nella Figura 35 è possibile osservare la variazione della tensione durante l'acquisizione dei dati.

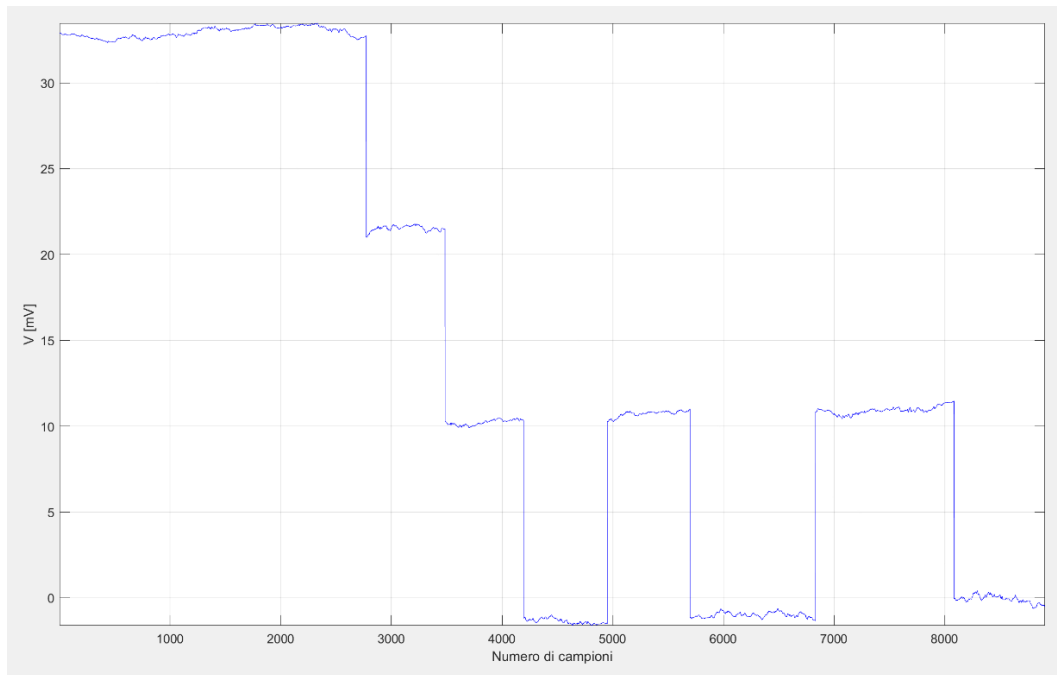


Figura 35: variazione della tensione durante il campionamento

Infine, nella Figura 36, i dati raccolti per ogni taglio sono rappresentati tramite un istogramma, mostrando la densità di frequenza in relazione alla variazione di tensione per ciascun taglio; viene inoltre evidenziata la media attraverso un rettangolo più scuro.

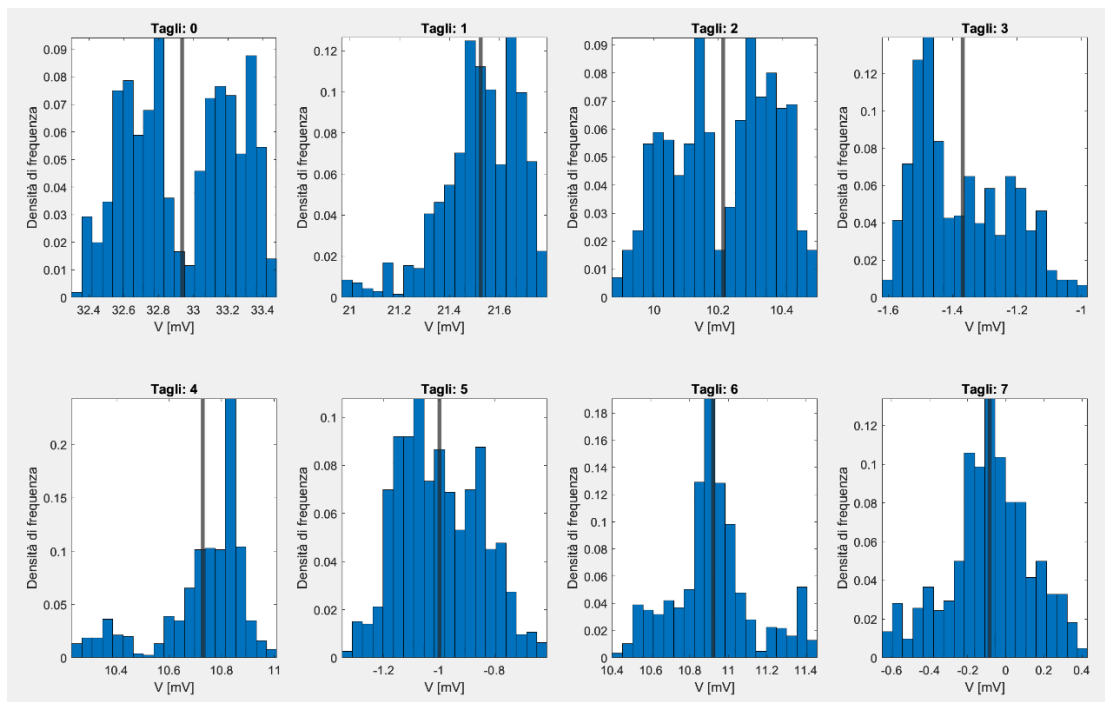


Figura 36: istogrammi della variazione della tensione per ogni taglio

#### 4.2.2 Effetti della deformazione sui trimmer

Per gli stessi principi introdotti nel paragrafo 1.1, essendo anche il trimmer una resistenza metallica è quindi soggetto agli effetti conseguenti ad una deformazione. Per studiare questi effetti sono stati stampati tre trimmer su ogni lastra di ABS, di cui due atti allo studio di deformazioni longitudinali, mentre uno per quelle trasversali; sono stati collegati a dei multimetri in configurazione a quattro fili per poter monitorare le variazioni di resistenza, come visibile in Figura 37. La deformazione è prodotta dal banco dinamometrico, che ha applicato in sequenza 0 kgF, 0.05 kgF, 0.1 kgF, 0.15 kgF e 0.2 kgF sull'estremo delle lastre opposto a quello dei trimmer; questo è avvenuto per ogni taglio eseguito sui trimmer.

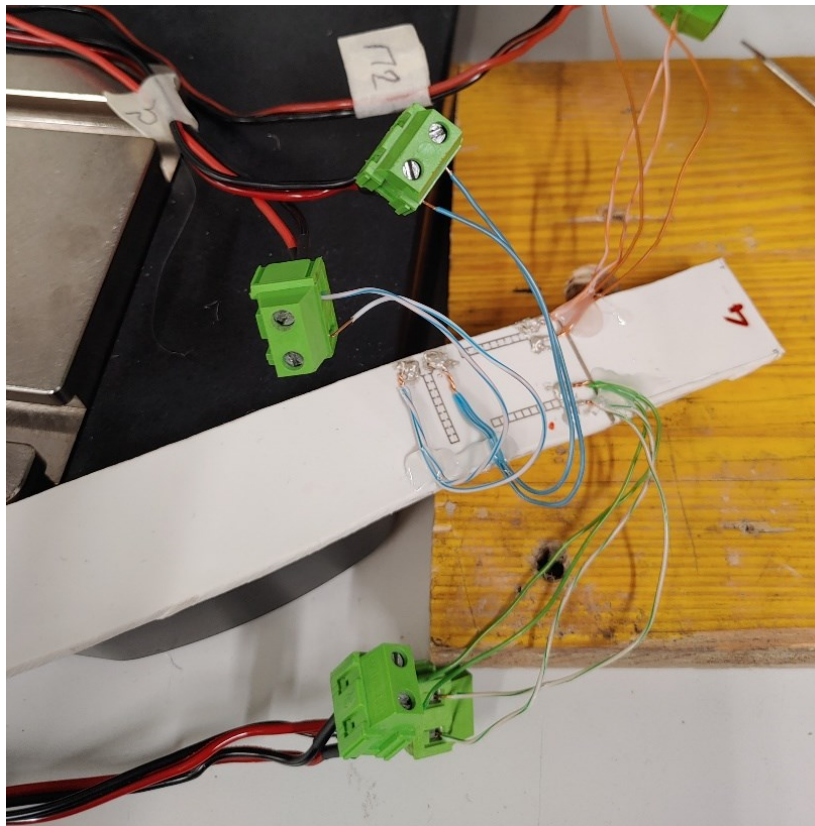


Figura 37: configurazione a 4 fili dei trimmer su lastre di ABS

Una volta acquisiti tutti i dati, sono stati inizialmente suddivisi tra deformazioni trasversali e longitudinali, e successivamente rispetto al numero di tagli. Nella Figura 38, le variazioni di resistenza sono state raggruppate in relazione alla forza applicata per le deformazioni longitudinali. Come previsto, esse mostrano un andamento regolare di crescita, con valori di differenze di resistenza trascurabili, poiché la massima registrata è di soli 0.0043  $\Omega$ .

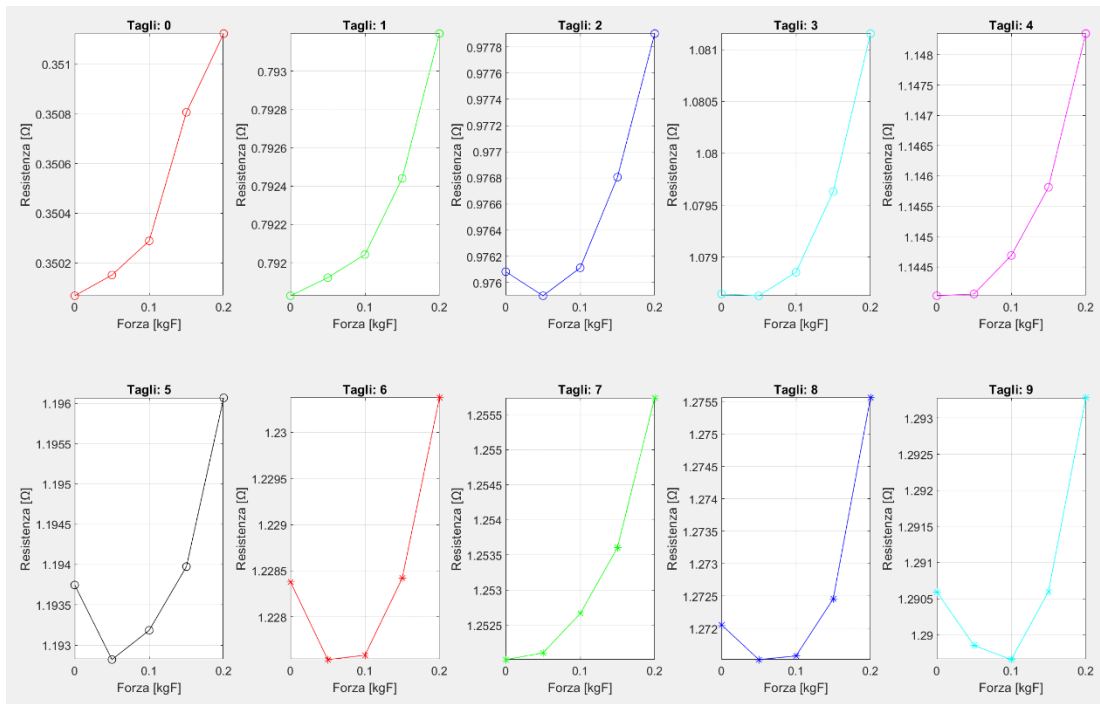


Figura 38: variazioni di resistenza rispetto alle deformazioni longitudinali

Allo stesso modo nella Figura 39 le variazioni di resistenza sono state raggruppate in relazione alla forza applicata per le deformazioni trasversali. Qui si osservano andamenti più irregolari, tuttavia, anche questi caratterizzati da valori trascurabili, dato che il picco di differenza di resistenza registrato è di soli 0.0179 Ω.

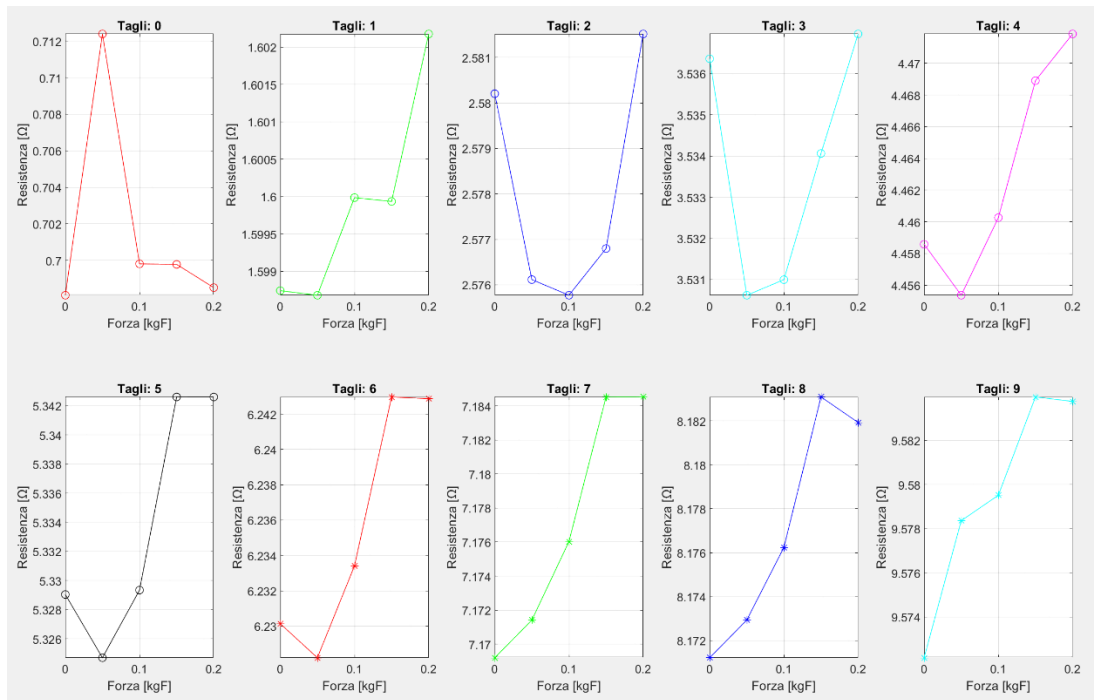


Figura 39: variazioni di resistenza rispetto alle deformazioni trasversali



### 4.2.3 Effetti dell'autoriscaldamento

Considerando che i dispositivi stampati in questo studio sono realizzati in materiale metallico, sono suscettibili all'effetto Joule e, di conseguenza, ad un fattore di autoriscaldamento. È importante notare che una variazione nella temperatura corrisponde a una variazione nella resistenza, un effetto che potrebbe influenzare la precisione durante la misurazione delle deformazioni.

Il primo passo consiste nel verificare se e come la temperatura varia nel tempo in relazione alla tensione applicata. Per raccogliere questi dati, è stata utilizzata una sonda Pt100, una termoresistenza al platino, collegata al multimetro e posizionata al di sotto di un quarto del ponte stampato. Come illustrato nella Figura 39, il dispositivo si riscalda e, dopo un periodo di transizione non costante, tende a stabilizzarsi ad una temperatura costante che dipende dalla tensione di ingresso.

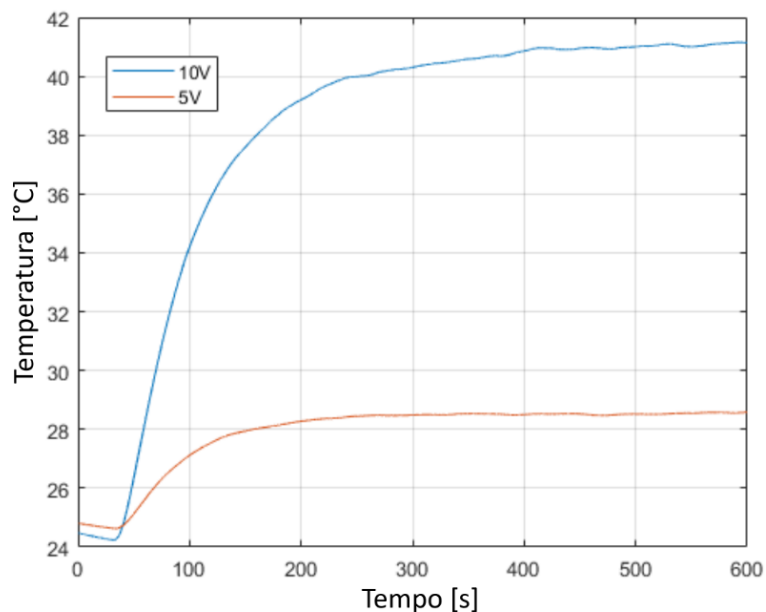


Figura 39: variazione della temperatura del quarto di ponte rispetto al tempo

È necessario quindi studiare come questa variazione di temperatura influisca sulla tensione in uscita dal dispositivo; per fare ciò, il dispositivo è stato collegato al multimetro e gli sono stati applicati in sessioni separate 5 V e 10 V. I dati sono stati poi registrati in due istogrammi, visibili nella Figura 40: è evidente come una tensione più elevata comporti un maggiore sbilanciamento di tensione, il che è ancor più evidente nella Tabella 8, dove sono riportati i valori statistici calcolati di media e deviazione standard in relazione al voltaggio in ingresso.

	Media [ $\mu\text{V}$ ]	Deviazione standard [ $\mu\text{V}$ ]
5 V	- 15.69	39.9
10 V	4400	1900

Tabella 8: media e deviazione standard della tensione rispetto alla tensione di ingresso

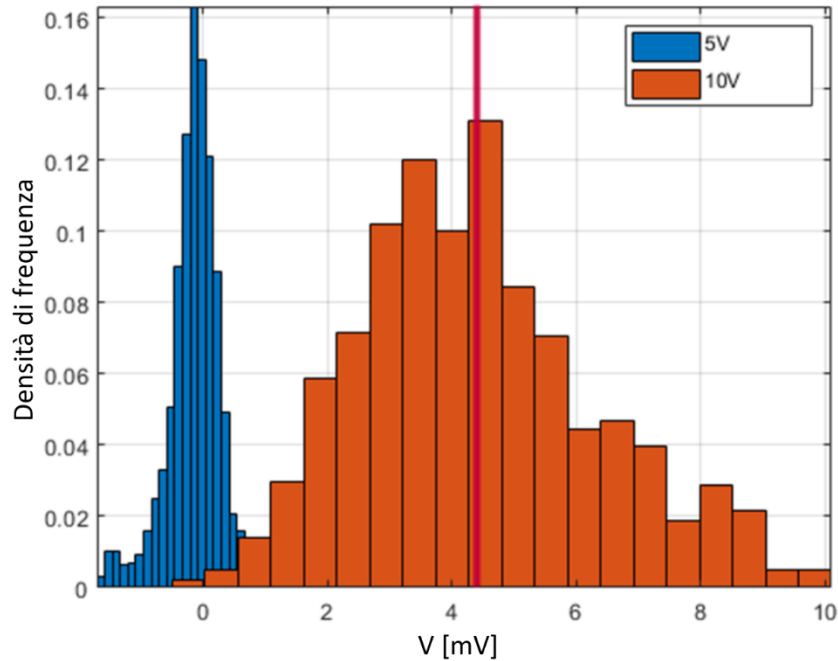


Figura 40: istogrammi della variazione della tensione rispetto alla tensione di ingresso

È stato inoltre valutato l'impatto del coprire il dispositivo (riducendo la dispersione termica) rispetto al lasciarlo esposto all'ambiente circostante; per fare ciò è stata misurata la variazione di tensione nel tempo di un quarto del ponte, sia senza copertura sia con una copertura in vetro applicata, in due sessioni separate e con tensione di ingresso uguale a 5 V per entrambe. I risultati sono riportati negli istogrammi della Figura 41, dove, come atteso, il dispositivo coperto mostra un maggiore sbilanciamento di tensione; nella Tabella 9 sono riportati i valori medi e le deviazioni standard, che confermano questa osservazione.

	Media [ $\mu\text{V}$ ]	Deviazione standard [ $\mu\text{V}$ ]
5 V scoperto	- 15.69	39.9
5 V coperto	2700	65.8

Tabella 9: media e deviazione standard della tensione per il dispositivo coperto e scoperto

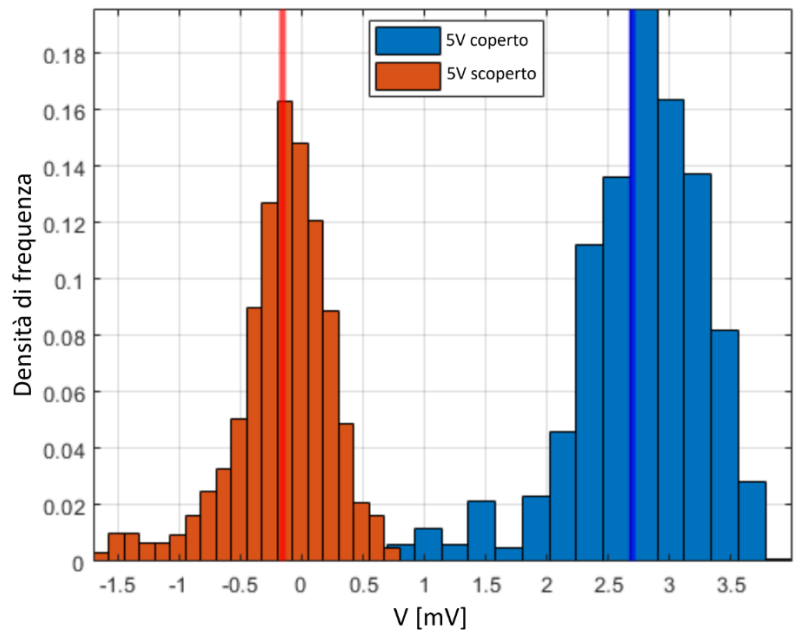


Figura 40: istogrammi della variazione della tensione per il dispositivo coperto e scoperto

## CONCLUSIONI

La completa comprensione dei diversi contesti in cui gli estensimetri possono essere utilizzati ha evidenziato l'importanza fondamentale che questi sensori rivestono, soprattutto nel contesto medico, e ha illustrato la vasta gamma di applicazioni possibili in questo settore. Inoltre, la capacità di stampare questi dispositivi utilizzando tecnologie avanzate come l'Aerosol Jet Printing amplia significativamente le loro potenzialità, consentendo l'applicazione di questi sensori anche in ambiti microscopici e in strutture tridimensionali finora al di là della loro portata.

L'attenta progettazione delle geometrie e l'analisi approfondita attraverso le varie metodologie di caratterizzazione illustrate in questo elaborato hanno condotto non solo a risultati soddisfacenti per quanto riguarda la compensazione delle problematiche sia anticipate che riscontrate, ma anche alla raccolta di dati importanti per la concezione di soluzioni future.

Il problema derivante dalla tensione di offset, causata dall'impossibilità di produrre resistenze perfettamente identiche, è stato significativamente ridotto attraverso l'introduzione dei trimmer sviluppati durante questa ricerca. Questi trimmer hanno permesso di ottenere rapporti di compensazione fino a due ordini di grandezza, compensando efficacemente l'effetto della tensione di offset. L'analisi condotta sull'impatto di tali dispositivi sulle misurazioni di deformazione ha rivelato un effetto così minimo da poter essere considerato trascurabile. Sono inoltre attualmente in corso ulteriori studi per migliorare ulteriormente la sensibilità dei trimmer al fine di ridurre le tensioni di offset a livelli dell'ordine delle centinaia di microvolt.

Il fenomeno di autoriscaldamento è stato oggetto di studio dettagliato utilizzando l'attrezzatura disponibile, e i dati acquisiti sono preziosi per una comprensione più approfondita di questa problematica. La decisione di progettare i ponti di Wheatstone nella configurazione "full bridge" è stata presa appositamente per mitigare questo problema; sono infatti in fase di pianificazione studi futuri volti a sviluppare un modello matematico dell'effetto termico, al fine di ottenere una rappresentazione più accurata e predittiva di questo fenomeno.

## BIBLIOGRAFIA

- F. Maita, V. Piccialli, F. Pensa, M. Scatto, M. Ruggeri and L. Maiolo, "*Application of Unconditioned Nanostructured Thermoplastic-Based Strain Gauge Sensor in Wearable Electronics*", DOI: 10.1109/JSEN.2022.3221181
- Ashish Yadav, Neha Yadav, Yongling Wu, Seeram RamaKrishna and Zheng Hongyu, "*Wearable strain sensors: state-of-the-art and future applications*", DOI: 10.1039/d2ma00818a
- Piotr Tutak, "*Application of strain gauges in measurements of strain distribution in complex objects*", DOI: 10.1515/jacsm-2015-0004
- Chu, M., Nguyen, T., Pandey, V., "*Respiration rate and volume measurements using wearable strain sensors*", DOI: 10.1038/s41746-019-0083-3
- Lee, S.P., Ha, G., Wright, D.E., "*Highly flexible, wearable, and disposable cardiac biosensors for remote and ambulatory monitoring*", DOI: 10.1038/s41746-017-0009-x
- Ferrone, "*Wearable band for hand gesture recognition based on strain sensors*", DOI: 10.1109/BIOROB.2016.7523814
- Paolo Bellitti, Michela Borghetti, Edoardo Cantù, Emilio Sardini and Mauro Serpelloni, "*Resistive Sensors for Smart Objects: Analysis on Printing Techniques*", DOI: 10.1109/TIM.2022.3181941
- Michela Borghetti, Edoardo Cantù, Emilio Sardini and Mauro Serpelloni, "*Future Sensors for Smart Objects by Printing Technologies in Industry 4.0 Scenario*", DOI: 10.3390/en13225916

## SITOGRAFIA

- [https://www.researchgate.net/publication/276511938\\_Application\\_Of\\_Strain\\_Gauges\\_In\\_Measurements\\_Of\\_Strain\\_Distribution\\_In\\_Complex\\_Objects](https://www.researchgate.net/publication/276511938_Application_Of_Strain_Gauges_In_Measurements_Of_Strain_Distribution_In_Complex_Objects)
- <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/gauge-factor>
- <https://www.hbm.com/it/7163/wheatstone-bridge-circuit-strain-gauge/>
- <https://www.hbm.com/it/3517/compressione-dei-vantaggi-della-tecnologia-degli-estensimetri-nei-dispositivi-ed-apparecchiature-oem-medicali/>
- <https://dewesoft.com/blog/strain-gauge-applications>