



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Energia Elettrica

**Valutazione di un parametro piezoelettrico del nitruro di
alluminio utilizzando come sistema di prova la configurazione
di trave a sbalzo**

Relatore: Prof. Daniele Desideri

Laureanda: Lisa Bertucco

Matricola: 2027573

Anno Accademico 2023/2024

Ai miei genitori.

Indice

Sommario	v
Capitolo 1: Introduzione	1
1.1 Tecniche di controllo non distruttive ad ultrasuoni.....	2
Capitolo 2: Materiali piezoelettrici	9
2.1 Piezoelettricità.....	9
2.2 Polarizzazione	10
2.2.1 Condizione necessaria per avere effetto piezoelettrico	12
2.2.2 Effetto piezoelettrico diretto	15
2.2.3 Effetto piezoelettrico inverso	17
2.3 Relazioni lineari per un materiale piezoelettrico	19
2.4 Nitruro di alluminio	21
Capitolo 3: Modello elettromeccanico	23
3.1 Introduzione	23
3.2 Formulazione del modello elettromeccanico	24
3.3 Eccitazione della base	32
3.4 Analisi in regime sinusoidale permanente con eccitazione sinusoidale della base.....	35
3.5 Determinazione del parametro piezoelettrico d_{31}	39
3.5.1 Fit dei dati sperimentali.....	39
Capitolo 4: Campione di prova e strumentazione utilizzata in laboratorio	43
4.1 Campione di prova	43
4.2 Strumentazione utilizzata in laboratorio	47
4.2.1 Generatore di funzioni Agilent 33120A.....	47
4.2.2 Amplificatore SmartAmp POWER AMPLIFIER 2100E21-100.....	49

4.2.3 Shaker elettrodinamico MODAL SHOP 2007E	49
4.2.4 Accelerometro piezoelettrico PCB 352C65 e condizionatore di segnale PCB 480C02.....	51
4.2.5 Sonda passiva di tensione YOKOGAWA 701943.....	52
4.2.6 Oscilloscopio digitale YOKOGAWA DL9140 (710310).....	54
4.2.7 Misuratore digitale di impedenza GW Instek LCR 6300.....	55
4.2.8 Forno G3 Ferrari mod. G10006	56
4.2.9 Termocoppia di tipo K.....	57
4.2.10 Multimetro digitale Fluke 87 V	58
Capitolo 5: Attività sperimentale in laboratorio	61
5.1 Caratterizzazione preliminare del forno.....	61
5.1.1 Forno con manopola del termostato in posizione 1	62
5.1.2 Forno con manopola del termostato in posizione 1,5	64
5.2 Prove sul convertitore	66
5.3 Descrizione configurazione strumenti	66
5.4 Descrizione svolgimento della prova.....	69
5.5 Prove preliminari sul convertitore.....	69
5.5.1 Misurazioni con misuratore digitale di impedenza LCR nella prima prova preliminare	69
5.5.2 Verifica stima del valore di capacità.....	71
5.5.3 Caratteristica della tensione in funzione della frequenza nella prima prova preliminare	72
5.5.4 Scrittura del codice per il fit dei dati sperimentali	73
5.5.5 Stima del parametro piezoelettrico nella prima prova preliminare	74
5.5.6 Misurazioni con misuratore digitale di impedenza LCR nella seconda prova preliminare	76
5.5.7 Caratteristica della tensione in funzione della frequenza nella seconda prova preliminare	78
5.5.8 Stima del parametro piezoelettrico nella seconda prova preliminare.....	79

5.6 Trattamenti termici.....	80
5.6.1 Primo trattamento termico: riscaldamento con manopola del termostato in posizione 1	81
5.6.2 Misurazioni con misuratore digitale di impedenza LCR dopo due ore dal primo trattamento termico	82
5.6.3 Caratteristica della tensione in funzione della frequenza nella prova svolta dopo due ore dal primo trattamento termico	83
5.6.4 Stima del parametro piezoelettrico nella prova svolta dopo due ore dal primo trattamento termico	84
5.6.5 Misurazioni con misuratore digitale di impedenza LCR dopo sette giorni dal primo trattamento termico.....	85
5.6.6 Caratteristica della tensione in funzione della frequenza nella prova svolta dopo sette giorni dal primo trattamento termico	87
5.6.7 Stima del parametro piezoelettrico nella prova svolta dopo sette giorni dal primo trattamento termico	89
5.6.8 Secondo trattamento termico: riscaldamento manopola del termostato in posizione 1,5	90
5.6.9 Misurazioni con misuratore digitale di impedenza LCR dopo cinque giorni dal secondo trattamento termico	91
5.6.10 Caratteristica della tensione in funzione della frequenza nella prova svolta dopo cinque giorni dal secondo trattamento termico	92
5.6.11 Stima del parametro piezoelettrico nella prova svolta dopo cinque giorni dal secondo trattamento termico	94
Capitolo 6: Conclusioni	97
Ringraziamenti.....	99
Appendice A	101
Bibliografia	103

Sommario

Il presente lavoro di tesi, si concentra sull'analisi di un trasduttore piezoelettrico per applicazioni ad alta temperatura, utilizzando una configurazione di trave a sbalzo.

Il dispositivo, concepito come convertitore piezoelettrico unimorfo, utilizza un modello interpretativo del condensatore piano a piastre parallele. La sua struttura presenta, come elettrodo inferiore, un substrato metallico di alluminio, come dielettrico, un film di nitruro di alluminio depositato tramite magnetron sputtering reattivo e, come elettrodo superiore, una pasta conduttiva in carbonio.

Per valutare le prestazioni piezoelettriche del convertitore sono state fatte, presso il Laboratorio di Materiali Micro e Nano Strutturati "M. Bagatin" del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova, diverse prove sperimentali. Inizialmente sono state eseguite delle prove preliminari a temperatura ambiente per ottenere una prima caratterizzazione del comportamento del dispositivo. Successivamente, il dispositivo è stato riscaldato con trattamenti termici a temperature crescenti, passando da un trattamento termico a quello successivo. Dopo ciascun trattamento termico, il convertitore è stato nuovamente provato per valutare la sua risposta piezoelettrica.

L'analisi del dispositivo è stata realizzata nel modo seguente. È stato utilizzato un misuratore digitale di impedenza LCR per verificare l'assenza di cortocircuiti indesiderati e misurare la capacità del sistema nell'intervallo di frequenze tra 100 Hz e 300 kHz. Successivamente, attraverso l'uso di uno shaker elettrodinamico, che permette di sollecitare meccanicamente il convertitore, è stata valutata l'uscita di tensione in funzione della frequenza di vibrazione. Infine, mediante un approccio computazionale implementato in MATLAB, sono stati analizzati i risultati sperimentali al fine di ottenere i parametri del modello matematico da cui è possibile ricavare una stima del coefficiente piezoelettrico d_{31} .

Capitolo 1

Introduzione

L'importanza della raccolta di energia dall'ambiente circostante, nota come “energy harvesting”, è sempre più riconosciuta in numerose applicazioni in cui è richiesta una bassa potenza, ma l'autonomia energetica è fondamentale.

In particolare, l'energy harvesting permette di sfruttare l'energia cinetica disponibile sotto forma di vibrazioni, presenti in apparecchiature industriali, domestiche o in strutture in movimento (come automobili ed aeroplani), convertendola in energia elettrica tramite dispositivi raccoglitori di energia cinetica.

Tra i vari tipi di raccoglitori, quelli piezoelettrici sono interessanti in quanto offrono soluzioni flessibili ed adattabili ad una vasta gamma di applicazioni.

Negli ultimi anni questi dispositivi hanno conosciuto un notevole sviluppo, spinti dalla crescente necessità di trovare soluzioni sostenibili per l'alimentazione di dispositivi elettronici in ambienti remoti o difficilmente accessibili.

In particolare, i trasduttori piezoelettrici per alte temperature rappresentano un campo di ricerca promettente, consentendo la misurazione e il monitoraggio in tempo reale in ambienti caratterizzati da condizioni di temperatura elevate.

Questi trasduttori trovano impiego in diverse applicazioni, tra cui la caratterizzazione dei materiali, l'ispezione dei processi e il rilevamento di guasti mediante test non distruttivi ultrasonici, in ambienti ad alta temperatura, come quelli presenti negli impianti industriali, energetici e aerospaziali.

1.1 Tecniche di controllo non distruttive ad ultrasuoni

A seconda del contesto specifico della ricerca e del meccanismo fisico sfruttato, si possono distinguere diverse tipologie di test non distruttivi (NDT).

Alcune delle tipologie di test non distruttivi più comunemente utilizzate sono:

- Radiografia (RT)
- Penetrazione liquida (PT)
- Magnetoscopia (MT)
- Correnti indotte (ET)
- Termografia (TT)
- Ultrasonico (UT)

Il metodo ultrasonico (UT) è una tecnica di test non distruttivo che sfrutta onde sonore ad alta frequenza per rilevare difetti interni nei materiali e valutare la qualità e l'integrità di strutture mediante l'analisi delle onde riflesse e trasmesse.

Questa metodologia si basa sull'uso di onde meccaniche ad alta frequenza, note come ultrasuoni, che vengono introdotte nel materiale in esame per rilevare variazioni nella loro propagazione, indicando la presenza di difetti o discontinuità.

Nel caso specifico della tecnica UT, gli ultrasuoni, onde elastiche e vibrazionali con frequenza superiore a 20 kHz, sono generati utilizzando materiali piezoelettrici che convertono energia elettrica in energia meccanica. Questi materiali, quando sono sottoposti a un campo elettrico alternato alla frequenza adeguata, producono vibrazioni elastiche. Le onde elastiche così generate, vengono trasmesse nel materiale in esame, dove si propagano con la stessa frequenza del generatore e con una velocità dipendente dal materiale attraversato.

Per garantire un'efficace trasmissione delle onde, è necessario un adeguato accoppiamento acustico tra il trasduttore e il materiale da esaminare.

Una volta trasmesse nel materiale, le onde ultrasoniche interagiscono con eventuali discontinuità o difetti presenti. Queste interazioni causano variazioni nell'eco delle onde, che vengono rilevate e analizzate tramite appositi strumenti. L'analisi del segnale ultrasonico fornisce informazioni cruciali sulle dimensioni, la geometria e la natura dei difetti incontrati.

La rappresentazione dei dati ultrasonici avviene tramite diverse modalità, tra cui il metodo "A-mode", che visualizza l'ampiezza del segnale in funzione del tempo. Il fascio ultrasonico, trasmesso e ricevuto dal trasduttore, infatti, è caratterizzato da due parametri fondamentali:

- Parametro a : è l'ampiezza, ovvero il valore di picco dell'impulso, indicativo della presenza di difetti;
- Parametro t : è il tempo che intercorre tra l'impulso trasmesso e quello ricevuto, fornisce una misura indiretta della distanza percorsa dall'onda ultrasonica all'interno del materiale ed è quindi indicativo della profondità dei difetti.

Questa rappresentazione fornisce informazioni in una dimensione (1D) sulle discontinuità incontrate (come riflessioni o assorbimenti di onde) all'interno del materiale e può essere utilizzata in varie applicazioni, industriali e non. Altre tecniche di rappresentazione, come l'ecografia bidimensionale (2D) e tridimensionale (3D), sono utilizzate per analisi più dettagliate, ad esempio in ambito biomedico.

Le discontinuità all'interno del materiale causano variazioni nel segnale riflesso, che possono essere interpretate per identificare la posizione, la dimensione e la natura dei difetti. La complessità del segnale ultrasonico riflesso dipende dalla natura e dalle dimensioni dei difetti rilevati. Attraverso un processo di analisi e correlazione delle caratteristiche del segnale, delle proprietà del materiale e dei parametri di scansione, è possibile localizzare e dimensionare i difetti con precisione.

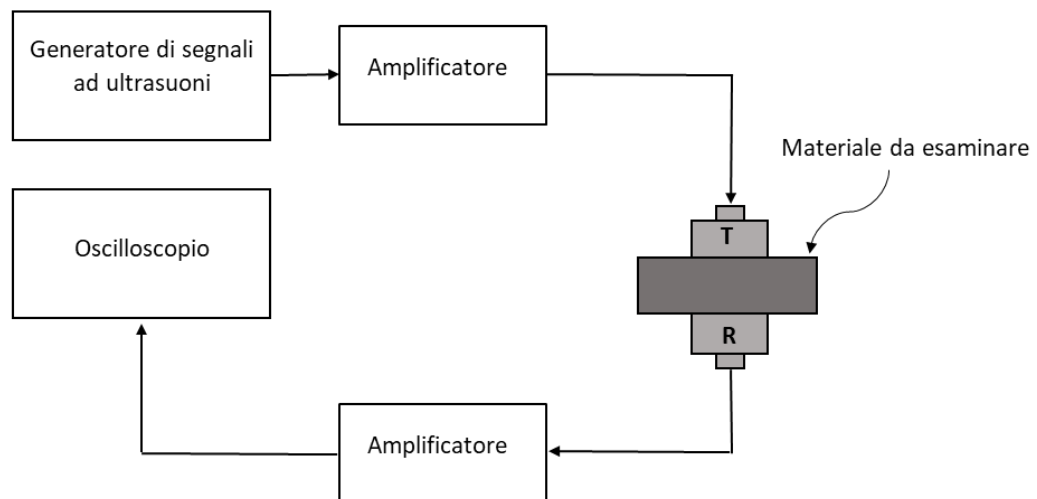


Fig. 1.1 - Schema di realizzazione di un sistema elementare di controllo non distruttivo ad ultrasuoni.

Un trasduttore è un dispositivo in grado di trasformare una forma di energia in un'altra, solitamente di tipo diverso.

La sua capacità di conversione è descritta da una funzione matematica denominata caratteristica o funzione di trasferimento del trasduttore. Questa funzione stabilisce la relazione tra la grandezza di ingresso e quella di uscita del trasduttore. Conoscendo questa relazione e misurando la grandezza in uscita, è possibile determinare il valore della grandezza di ingresso e viceversa.

La piezoelettricità gioca un ruolo cruciale nel funzionamento dei trasduttori, in quanto permette loro di funzionare sia come trasmettitori di onde sonore ad alta frequenza, sia come ricevitori.

Quando il trasduttore è utilizzato come *trasmettitore* (T), l'applicazione di una tensione elettrica di breve durata causa una deformazione, che, dopo la cessazione dell'impulso elettrico, è seguita da una serie di oscillazioni smorzate. Ogni impulso generato dal trasduttore produce un treno di onde ultrasoniche, la frequenza di queste oscillazioni è determinata dallo spessore del trasduttore, mentre l'ampiezza dipende dalla tensione applicata.

Nel caso in cui il trasduttore funzioni come *ricevitore* (R), la vibrazione del materiale in esame viene trasmessa al trasduttore stesso per contatto. Se la frequenza di vibrazione coincide con quella propria del trasduttore, quest'ultimo genera una tensione elettrica che varia da positiva a negativa ogni volta che passa dalla massima estensione alla minima contrazione. Questo fenomeno crea un segnale elettrico rilevabile attraverso un oscilloscopio.

A seconda dell'applicazione specifica, dalle dimensioni e dalla forma del materiale da esaminare, nonché dal tipo di difetti che si prevede di rilevare, si possono adottare diverse modalità di rilevamento ultrasonico. Le principali tecniche di controllo non distruttivo (NDT) basate sugli ultrasuoni sono:

1. Modalità *pulse-echo* (*eco-impulso* o *in riflessione*): il trasduttore genera onde ultrasoniche che vengono riflesse da eventuali discontinuità presenti nel materiale e raccolte dallo stesso trasduttore, che agisce sia come trasmettitore che come ricevitore (T/R). Si tratta di una tecnica versatile utilizzata per rilevare difetti sia superficiali che interni;
2. Modalità *through-transmission* (*in trasmissione*): vengono impiegati due trasduttori, uno emette il fascio di onde ultrasoniche (T), mentre l'altro rileva la componente trasmessa dopo che le onde hanno attraversato il materiale (R). Questa tecnica è particolarmente efficace nel rilevare difetti che attraversano l'intera sezione del materiale;

3. Modalità *pitch catch* (lancio e raccolta): Questa tecnica coinvolge due trasduttori posizionati sullo stesso lato del materiale da esaminare, uno funge da trasmettitore (T) e l'altro da ricevitore (R). Il trasduttore trasmettitore invia un'onda ultrasonica, mentre il trasduttore ricevitore rileva l'eco riflessa dalle discontinuità. Questa modalità risulta essere utile per valutare le condizioni superficiali del materiale e per rivelare difetti o discontinuità vicino alla superficie.

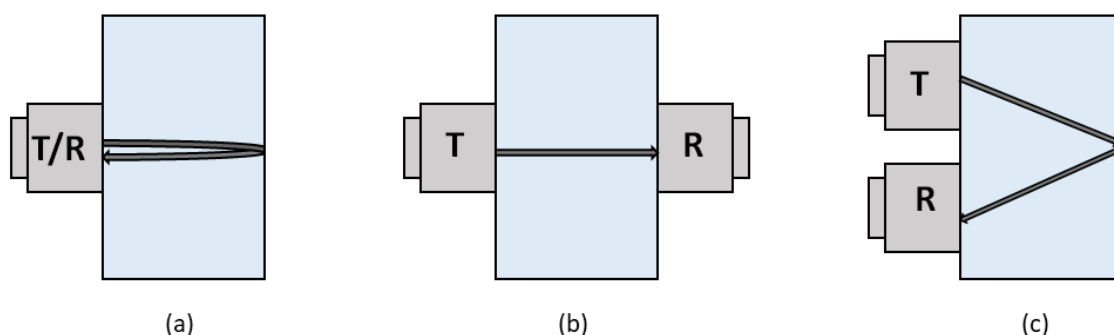


Fig. 1.2 - Schematizzazione delle tecniche di controllo: (a) tecnica pulse-echo; (b) tecnica through-transmission; (c) tecnica pitch catch.

Le onde ultrasoniche possono essere classificate principalmente in tre tipi principali in base al modo in cui si propagano attraverso un materiale:

1. Onde longitudinali: sono caratterizzate da un movimento delle particelle del materiale nella stessa direzione della propagazione dell'onda e sono generate applicando un'onda di stress perpendicolare alla superficie del materiale. Le onde longitudinali sono comunemente utilizzate nelle tecniche di pulse-echo e through transmission;
2. Onde trasversali: sono caratterizzate da un movimento perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda. Le onde trasversali sono spesso utilizzate nelle tecniche di pitch-catch e nelle applicazioni che richiedono la rilevazione di difetti superficiali;
3. Onde di superficie (o onde di Rayleigh): si propagano lungo la superficie di separazione tra due materiali o all'interno di un singolo materiale. Queste onde combinano caratteristiche sia delle onde longitudinali che delle onde trasversali, con movimenti sia in direzione longitudinale che trasversale rispetto alla superficie del

materiale. Essendo particolarmente sensibili ai difetti superficiali, per questo motivo sono spesso impiegate nelle tecniche di pitch-catch.

Ogni tipo di onda ha le proprie applicazioni e limitazioni, la scelta del tipo di onda ultrasonica dipende dalle caratteristiche del materiale da ispezionare e dai tipi di difetti che si desidera rilevare.

Nella letteratura sono presenti diversi esempi che dimostrano l'efficacia del monitoraggio ultrasonico tramite tecnica pulse-echo [19,20]. In particolare, il lavoro di Kirk et al. [19], ha esaminato dettagliatamente le prestazioni dei trasduttori piezoelettrici a film sottile mediante test in laboratorio e sperimentazioni su componenti industriali.

Nello specifico [19], questi trasduttori sono stati realizzati con film di nitruro di alluminio depositato direttamente sul componente da monitorare, utilizzando la tecnica di sputtering. Il loro studio ha dimostrato che, questi trasduttori possono operare fino ai 600 °C, consentendo il monitoraggio continuo anche durante il funzionamento dei macchinari e degli impianti a temperature elevate.

I materiali piezoelettrici trovano largo impiego in queste tecniche d'analisi non distruttive ad ultrasuoni che spaziano da applicazioni biomediche, principalmente eseguite a temperatura ambiente, ad applicazioni di carattere industriale che richiedono il funzionamento sia a temperatura ambiente che a temperature elevate.

In ambienti industriali operativi a elevate temperature, l'esecuzione dei test non distruttivi richiede spesso interruzioni o arresti dei processi, con conseguenti lunghi preparativi e, talvolta, smantellamento parziale dei sistemi stessi. Lo sviluppo di trasduttori e sistemi di rilevamento adatti per le misurazioni ultrasoniche NDT in condizioni di alta temperatura consentirebbe il monitoraggio in tempo reale dei processi e garantirebbe la continuità operativa, portando benefici economici e pratici evidenti.

Le prestazioni dei materiali piezoelettrici ferroelettrici ad alte temperature sono soggette a diverse limitazioni, tra cui la temperatura di Curie, la temperatura di transizione di fase, l'invecchiamento del materiale, l'aumento dell'attenuazione acustica, delle perdite dielettriche e della conducibilità elettrica. La Tabella 1.1 presenta alcune di queste limitazioni per alcuni piezoelettrici per alte temperature [1].

Materiale piezoelettrico	Temperatura transizione di fase (°C)	Perdite dielettriche	Resistività (Ω·cm)
GaPO ₄	970	0.15	2.3·10 ⁷
LN	1150	5.5	6.6·10 ⁵
LGS	1470	0.5 - 0.2	2·10 ⁶ - 8·10 ⁶
YCOB	1510	0.3 - 0.1	1·10 ⁷ - 2·10 ⁸
GdCOB	1470	0.3 - 0.2	4·10 ⁶ - 3·10 ⁷

Tab. 1.1 - Proprietà di alcuni materiali piezoelettrici per alte temperature.

In particolare, i materiali ferroelettrici tradizionalmente impiegati, come il titanato di zirconio al piombo (PZT), presentano limitazioni dovute alla loro temperatura di Curie, che di solito non supera i 350 °C, rendendoli inadatti a questo tipo di applicazioni.

Nella Tabella 1.2 si elencano alcuni materiali ferroelettrici provati per alte temperature con le relative temperature di Curie.

Materiale ferroelettrico	Temperatura di Curie (°C)
Piombo-zirconato di titanio (PZT)	160-365
Metaniobato di piombo (PbNb₂O₆)	400-570
Titanato di bismuto (Bi₄Ti₃O₁₂)	600
Niobato di litio (LiNbO₃)	1142-1210

Tab. 1.2 - Limitazioni in temperatura di alcuni materiali ferroelettrici per applicazioni ad alta temperatura [18].

In questo contesto, il nitruro di alluminio emerge come una valida alternativa, grazie alla sua capacità di mantenere le proprietà piezoelettriche ad alte temperature.

Grazie alla sua produzione sotto forma di film sottile, i trasduttori realizzati in AlN possono essere direttamente integrati su componenti e materiali ingegneristici, eliminando così le sfide legate all'accoppiamento acustico ad alta temperatura.

A differenza del PZT, il nitruro di alluminio presenta anche il vantaggio di non contenere piombo, eliminando così anche le preoccupazioni riguardanti la tossicità e l'impatto ambientale associati del materiale e rendendo il nitruro di alluminio una scelta più ecologica e sicura.

Sebbene risulti più penalizzato dal punto di vista delle prestazioni piezoelettriche (le proprietà piezoelettriche del AlN sono inferiori rispetto a quelle dei PZT, che presentano $d_{33} \cong 390-650 \text{ pC/N}$ [18]), il nitrato di alluminio, con i vantaggi già presentati, è preferibile rispetto ai tradizionali PZT nelle applicazioni ad alta temperatura.

La presente tesi di laurea magistrale è stata organizzata nel modo seguente (le attività sperimentali sono state condotte presso il Laboratorio di Materiali Micro e Nano Strutturati “M. Bagatin” del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell’Università di Padova).

I primi due capitoli offrono una panoramica delle basi teoriche sui materiali piezoelettrici e sulle relazioni lineari fondamentali che ne descrivono il comportamento.

Nel terzo capitolo viene analizzato il modello elettromeccanico di un raccogliatore di energia piezoelettrico in configurazione a trave a sbalzo e viene illustrata la metodologia per la derivazione del parametro piezoelettrico d_{31} .

Il quarto capitolo offre una descrizione del campione utilizzato nelle prove sperimentali e degli strumenti impiegati per le analisi sperimentali in laboratorio.

Il capitolo cinque descrive le prove preliminari realizzate per la caratterizzazione del funzionamento del forno usato per i trattamenti termici sul campione. Inoltre vengono descritte le prove eseguite a temperatura ambiente sul convertitore, sia quelle iniziali che quelle effettuate dopo ciascun trattamento termico. Per ciascuna prova, vengono discussi gli andamenti della capacità del campione al variare della frequenza, sono presentate le caratteristiche della tensione in uscita in funzione della frequenza del convertitore piezoelettrico a cantilever ed è stimato il valore del coefficiente piezoelettrico d_{31} .

Infine, l’ultimo capitolo contiene le conclusioni e le possibilità di sviluppo future.

Capitolo 2

Materiali piezoelettrici

2.1 Piezoelettricità

La piezoelettricità, letteralmente “elettricità da pressione”, è una caratteristica peculiare di alcuni materiali cristallini che, quando sottoposti a sollecitazioni meccaniche, come la compressione o la deformazione, sono in grado di generare cariche elettriche superficiali (effetto piezoelettrico diretto) e, allo stesso tempo, possono deformarsi meccanicamente quando esposti a un campo elettrico (effetto piezoelettrico inverso).

Questo fenomeno è stato osservato per la prima volta dai fratelli Pierre e Jacques Curie nel 1880, che misurarono la carica superficiale che compariva su cristalli come quarzo, tormalina e sale di Rochelle quando questi venivano sottoposti a sforzo meccanico, scoprendo, di fatto, l'effetto piezoelettrico diretto.

Fu Lippmann, nel 1881, ad elaborare matematicamente l'esistenza dell'effetto piezoelettrico inverso, il quale fu poi confermato sperimentalmente dai fratelli Pierre e Jacques Curie.

Durante la prima guerra mondiale la piezoelettricità ha trovato l'importante applicazione pratica del sonar: Langevin costruì la prima sorgente ultrasonora subacquea, stimolando un'intensa attività di ricerca su questi materiali.

Negli anni successivi, la scoperta di ceramiche piezoelettriche come il titanato di bario $BaTiO_3$ e il PZT ha portato a significativi progressi nella comprensione e nell'applicazione dei materiali piezoelettrici.

Durante la seconda guerra mondiale, ulteriori scoperte hanno portato allo sviluppo di materiali piezoceramici con prestazioni notevolmente migliorate, aprendo la strada a una vasta gamma di applicazioni, tra cui sensori di pressione ed energy harvesting (che sfruttano l'effetto diretto) e motori ultrasonici (che sfruttano l'effetto inverso). La continua evoluzione e l'ampia

applicabilità dei materiali piezoelettrici testimoniano la loro importanza e versatilità nei vari settori tecnologici.

2.2 Polarizzazione

Quando un campo elettrico viene applicato su di un materiale isolante (dielettrico), si può studiare la polarizzazione del materiale.

La polarizzazione, risultato della risposta del cristallo all'applicazione di un campo elettrico, è una caratteristica anisotropa dei cristalli, rappresentata tramite un tensore di rango due.

La relazione generale tra il vettore spostamento dielettrico (\mathbf{D}), il campo elettrico (\mathbf{E}), e il vettore polarizzazione elettrica (\mathbf{P}) in un dielettrico è espressa come:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (2.1)$$

Dove la quantità scalare $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \left[\frac{C^2}{Nm^2} \right] = 8.854 \cdot 10^{-12} \left[\frac{F}{m} \right]$ è la permittività del vuoto.

Quando due cariche puntiformi uguali ed opposte $+q$ e $-q$ (con $q > 0$) sono tra loro ad una distanza d molto piccola si parla di momento di dipolo elettrico \mathbf{p} .

Il vettore spostamento \mathbf{d} , come mostrato in figura 2.1, è un vettore diretto dalla carica negativa $-q$ a quella positiva $+q$.

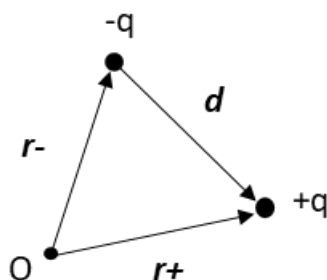


Fig. 2.1 - Cariche puntiformi uguali ed opposte $+q$ e $-q$ e vettore spostamento \mathbf{d} .

Preso un qualsiasi punto O, i vettori diretti da O alle cariche puntiformi $+q$ e $-q$ sono rispettivamente \mathbf{r}_+ e \mathbf{r}_- . Il momento di dipolo elettrico può essere scritto come:

$$\mathbf{p} = +q\mathbf{r}_+ + (-q)\mathbf{r}_- = q(\mathbf{r}_+ - \mathbf{r}_-) = q\mathbf{d} \quad (2.2)$$

Se si sceglie un punto O diverso, il momento di dipolo elettrico \mathbf{p} non varia.

Pertanto il vettore momento di dipolo elettrico \mathbf{p} ha:

- direzione lungo la congiungente tra le due cariche puntiformi $+q$ e $-q$, con verso diretto rispettivamente dalla carica negativa a quella positiva;
- modulo dato dal prodotto tra la carica positiva e la distanza fra le due cariche \mathbf{d} .

Si consideri adesso un volume infinitesimo ΔV , si assuma che, dentro questo piccolo volume, siano presenti un numero molto grande (n) di dipoli elettrici. Il momento di dipolo elettrico per unità di volume, ovvero il vettore polarizzazione \mathbf{P} , è dato dal rapporto tra la somma di tutti i momenti di dipolo elettrico dentro il volume ΔV e il volume ΔV stesso:

$$\mathbf{P} = \frac{\sum_n \mathbf{p}_n}{\Delta V} = \frac{\Delta \mathbf{p}}{\Delta V} \quad (2.3)$$

In un materiale isotropo la relazione tra polarizzazione e campo elettrico all'interno del materiale è data da:

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi \mathbf{E} \quad (2.4)$$

dove χ è la suscettività elettrica. Essa è legata alle proprietà degli atomi e delle molecole del materiale e descrive la risposta del materiale sotto l'azione di un campo elettrico esterno.

Sostituendo l'equazione (2.4) nella (2.1) si ottiene il vettore spostamento elettrico:

$$\mathbf{D} = \epsilon_0(1+\chi)\mathbf{E} \quad (2.5)$$

Si definisce permittività elettrica relativa ϵ_r la quantità:

$$\epsilon_r = 1 + \chi \quad (2.6)$$

Si definisce permittività elettrica ϵ il prodotto tra la permittività elettrica del vuoto ϵ_0 e la permittività elettrica relativa ϵ_r :

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (2.7)$$

Quindi, mettendo tutto insieme, l'equazione (2.5) può essere riscritta nella seguente forma:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (2.8)$$

2.2.1 Condizione necessaria per avere effetto piezoelettrico

Se un cristallo è centrosimmetrico, applicando uno sforzo non si ha nessun contributo di polarizzazione. Per prendere consapevolezza di questo fatto si faccia riferimento alla struttura bidimensionale centrosimmetrica in Figura 2.2.

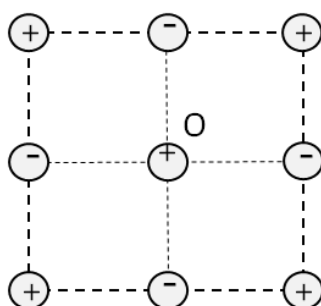


Fig. 2.2 - Struttura bidimensionale centrosimmetrica.

In questo caso si ha che, al centro O, i baricentri degli ioni positivi e degli ioni negativi coincidono.

Se viene applicata una forza gli atomi si muovono e vengono premuti gli uni contro gli altri ma i baricentri rimangono in O, come si può vedere in Figura 2.3.

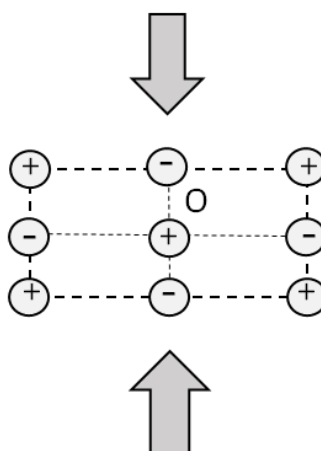


Fig. 2.3 - Spostamento degli atomi a seguito di una forza applicata, coincidenza dei baricentri.

Si ha che, quando il cristallo è centrosimmetrico, il baricentro degli ioni positivi e quello degli ioni negativi coincidono, anche dopo la deformazione del cristallo dovuta ad uno sforzo, pertanto, non si ha alcun contributo in polarizzazione.

La condizione necessaria affinché si abbia l'effetto piezoelettrico è che il cristallo sia *non-centrosimmetrico*.

A dimostrazione di ciò si consideri la struttura bidimensionale non-centrosimmetrica riportata in Figura 2.4. Essa presenta tre cariche positive e tre cariche negative, di uguale valore assoluto, poste ai vertici di un esagono.

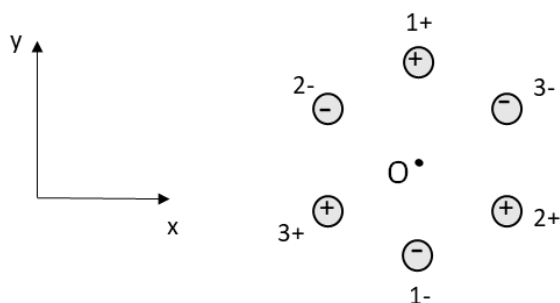


Fig. 2.4 - Struttura bidimensionale *non-centrosimmetrica* con tre cariche positive e tre cariche negative di uguale valore assoluto poste ai vertici di un esagono.

In questo caso la carica totale è nulla e poiché il baricentro delle cariche positive coincide in O con quello delle cariche negative anche la polarizzazione netta è nulla.

Se si applica una forza lungo l'asse y, ipotizzando che gli spostamenti degli atomi siano quelli indicati con le frecce in Figura 2.5, si ha uno spostamento delle cariche 1^+ e 1^- verso O lungo y e uno spostamento delle cariche 2^- , 3^+ e 3^- , 2^+ rispettivamente lungo -x e +x.

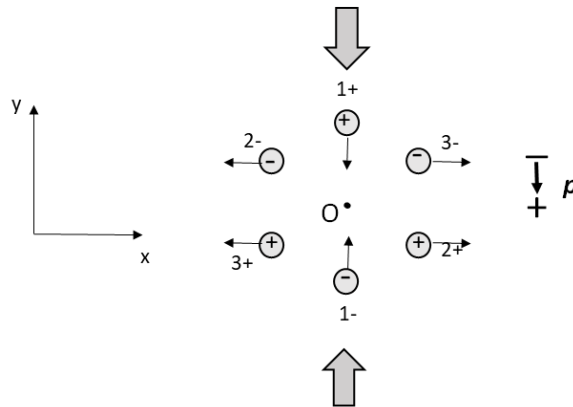


Fig. 2.5 - Struttura bidimensionale *non-centrosimmetrica* con tre cariche positive e tre cariche negative di uguale valore assoluto poste ai vertici di un esagono a cui è applicato uno sforzo lungo l'asse y.

Poiché si ha uno spostamento del baricentro delle cariche positive da O in direzione -y e uno spostamento del baricentro delle cariche negative da O in direzione +y, ne risulta una polarizzazione netta lungo y.

Se alla stessa struttura bidimensionale non-centrosimmetrica di partenza è applicato uno sforzo lungo l'asse x, ne risulta una polarizzazione netta lungo y.

Infatti, ipotizzando che gli spostamenti degli atomi siano quelli indicati in Figura 2.6, si ha un allontanamento delle cariche 1⁺ e 1⁻ da O lungo y e uno spostamento delle altre cariche verso O lungo +x e -x.

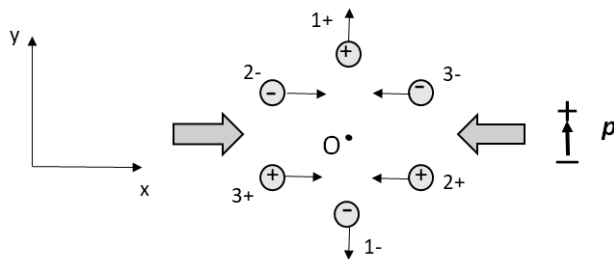


Fig. 2.6 - Struttura bidimensionale *non-centrosimmetrica* con tre cariche positive e tre cariche negative di uguale valore assoluto poste ai vertici di un esagono a cui è applicato uno sforzo lungo l'asse x.

La trattazione successiva adotterà i seguenti riferimenti per gli assi, in conformità allo IEEE Standard of Piezoelectricity del 1987:

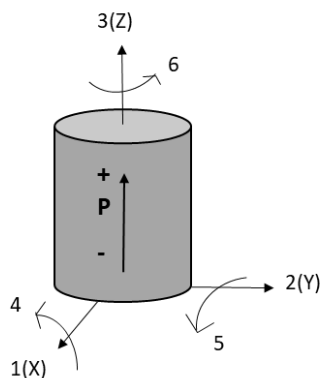


Fig. 2.7 - Convenzione per gli assi.

Gli assi ortogonali x, y e z sono designati rispettivamente come 1, 2 e 3 e sono comunemente impiegati per identificare i coefficienti elasto-piezo-dielettrici del materiale. I numeri 4, 5 e 6 descrivono gli sforzi di taglio meccanico che agiscono tangenzialmente alle aree definite dal sistema di coordinate e possono essere interpretati come rotazioni attorno ad ogni asse. Infine, la direzione z, corrispondente all'asse 3, è considerata la direzione di polarizzazione.

2.2.2 Effetto piezoelettrico diretto

Quando un materiale piezoelettrico viene sottoposto a uno sforzo meccanico, i suoi dipoli elettrici interni subiscono uno spostamento. Questo fenomeno porta alla separazione di cariche negative e positive sulle facce opposte del materiale generando di fatto un campo elettrico. La somma dei momenti di dipolo che si formano in tutto il volume del materiale crea una polarizzazione.

Nel contesto di un modello lineare con grandezze scalari, possiamo esprimere la relazione di proporzionalità tra la polarizzazione (P_p) dovuta all'azione meccanica e lo sforzo (T) attraverso l'equazione:

$$P_p = dT \quad (2.9)$$

Dove d è la costante piezoelettrica espressa in $\left[\frac{C}{m^2}\right] = \left[\frac{C}{N}\right]$, lo sforzo T è espresso in $\left[\frac{N}{m^2}\right]$ e P_p è il contributo di polarizzazione dovuto solamente all'effetto piezoelettrico diretto espresso in $\left[\frac{C}{m^2}\right]$.

Tale relazione mostra come cambiando il segno dello sforzo si abbia come conseguenza il cambio di segno anche nel contributo alla polarizzazione.

La costante piezoelettrica non è uno scalare, ma una matrice 3x6:

$$[d] = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

La polarizzazione è un vettore, identificato dalle sue tre componenti, mentre lo sforzo è un tensore di rango 2. Poiché il tensore degli sforzi è simmetrico, è possibile semplificarlo come una singola colonna di 6 elementi dopo aver fatto un cambio di notazione.

$$[T] = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 & T_6 & T_5 \\ T_6 & T_2 & T_4 \\ T_5 & T_4 & T_3 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Dunque la relazione tensoriale diventa:

$$\begin{bmatrix} P_{p1} \\ P_{p2} \\ P_{p3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Questa è la relazione che descrive l'effetto piezoelettrico diretto e può essere riscritta in maniera più compatta nel seguente modo:

$$[P_p] = [d][T]_{6 \times 1} \quad (2.13)$$

2.2.3 Effetto piezoelettrico inverso

Quando un materiale piezoelettrico viene sottoposto ad un campo elettrico esterno, questo induce una deformazione meccanica nel materiale. Questo fenomeno è noto come effetto piezoelettrico inverso.

Considerando un modello lineare, per semplicità con l'ipotesi di grandezze scalari, per l'effetto piezoelettrico inverso si può scrivere una relazione di proporzionalità diretta tra la deformazione (S) e il campo elettrico dentro il materiale (E):

$$S_p = dE \quad (2.14)$$

Dove d è sempre la costante piezoelettrica dell'effetto diretto espressa in $\left[\frac{C}{N}\right]$, E è il campo elettrico espresso in $\left[\frac{V}{m}\right]$, mentre S_p è il contributo, adimensionale, della deformazione dovuto solamente all'effetto piezoelettrico inverso.

Si utilizza ora la trasposta della matrice $[d]$, cioè:

$$[d]^T = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{21} & d_{31} \\ d_{12} & d_{22} & d_{32} \\ d_{13} & d_{23} & d_{33} \\ d_{14} & d_{24} & d_{34} \\ d_{15} & d_{25} & d_{35} \\ d_{16} & d_{26} & d_{36} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Il campo elettrico è un vettore di tre componenti mentre la deformazione S è un tensore simmetrico di rango 2 e può pertanto essere semplificato in un vettore colonna di sei componenti con un cambio di notazione.

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{31} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{23} & S_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 & \frac{1}{2} S_6 & \frac{1}{2} S_5 \\ \frac{1}{2} S_6 & S_2 & \frac{1}{2} S_4 \\ \frac{1}{2} S_5 & \frac{1}{2} S_4 & S_3 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

La relazione generale scritta in forma matriciale risulta quindi:

$$\begin{bmatrix} S_{p1} \\ S_{p2} \\ S_{p3} \\ S_{p4} \\ S_{p5} \\ S_{p6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{21} & d_{31} \\ d_{12} & d_{22} & d_{32} \\ d_{13} & d_{23} & d_{33} \\ d_{14} & d_{24} & d_{34} \\ d_{15} & d_{25} & d_{35} \\ d_{16} & d_{26} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Riscritta in maniera più compatta risulta:

$$[S_p]_{6 \times 1} = [d]^T [E] \quad (2.18)$$

È interessante notare inoltre che la matrice $[d]$ della costante piezoelettrica può contenere molte componenti nulle quando il cristallo presenta simmetria.

Si ricordi che la relazione di dipendenza della deformazione S dallo sforzo meccanico T si può descrivere mediante la seguente relazione:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14} & s_{15} & s_{16} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & s_{24} & s_{25} & s_{26} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} & s_{34} & s_{35} & s_{36} \\ s_{41} & s_{42} & s_{43} & s_{44} & s_{45} & s_{46} \\ s_{51} & s_{52} & s_{53} & s_{54} & s_{55} & s_{56} \\ s_{61} & s_{62} & s_{63} & s_{64} & s_{65} & s_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = [s] \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Dove $[s]$ è la matrice cedevolezza.

Mentre la dipendenza dello sforzo meccanico T dalla deformazione S si può scrivere come segue:

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} = [c] \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

dove $[c]$ è la matrice rigidità.

Come è possibile osservare, tra la matrice cedevolezza $[s]$ e la matrice rigidità $[c]$ valgono le seguenti relazioni:

$$\begin{aligned} [c] &= [s]^{-1} \\ [s] &= [c]^{-1} \end{aligned} \quad (2.21)$$

2.3 Relazioni lineari per un materiale piezoelettrico

Si ipotizzi di operare a temperatura costante e di adottare un modello semplificato con grandezze scalari. In questo contesto si considerino lo sforzo meccanico T e il campo elettrico E come variabili indipendenti, mentre, la deformazione S e lo spostamento elettrico D come variabili dipendenti.

Si ha:

$$\begin{cases} S = S(T, E) \\ D = D(T, E) \end{cases} \quad (2.22)$$

Utilizzando un modello lineare e ipotizzando di essere in una condizione di piccole variazioni nell'intorno di un "punto di lavoro" del cristallo piezoelettrico, possiamo scrivere:

$$\begin{cases} \Delta S = \frac{\partial S}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial S}{\partial E} \Delta E \\ \Delta D = \frac{\partial D}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial D}{\partial E} \Delta E \end{cases} \quad (2.23)$$

A seguito di opportune considerazioni dal punto di vista energetico e termodinamico, si può giungere alla conclusione che:

$$\frac{\partial S}{\partial E} = \frac{\partial D}{\partial T} \quad (2.24)$$

Questo significa che rimangono da identificare solo tre derivate parziali del primo ordine, ovvero $\frac{\partial S}{\partial T}$, $\frac{\partial D}{\partial E}$ e $\frac{\partial S}{\partial E} = \frac{\partial D}{\partial T}$. Inoltre considerando le relazioni lineari precedenti queste tre derivate parziali del primo ordine risultano essere rispettivamente: la cedevolezza, la permittività e la costante piezoelettrica.

Si definisce cedevolezza il rapporto tra l'incremento della deformazione sull'incremento dello sforzo, a valore costante di campo elettrico E (come ricordato dall'apice).

$$s^E = \left. \frac{\Delta S}{\Delta T} \right|_{\Delta E=0} = \left. \frac{\Delta S}{\Delta T} \right|_{E=const} \quad (2.25)$$

Si definisce permittività il rapporto tra l'incremento dello spostamento elettrico sull'incremento del campo elettrico, a sforzo costante T (come ricordato dall'apice).

$$\varepsilon^T = \left. \frac{\Delta D}{\Delta E} \right|_{\Delta T=0} = \left. \frac{\Delta D}{\Delta E} \right|_{T=const} \quad (2.26)$$

Mentre la costante piezoelettrica d è data dall'espressione (2.24) ed è la stessa per l'effetto diretto e per l'effetto inverso.

Quindi possiamo riscrivere la (2.23) tenendo conto di queste relazioni:

$$\begin{cases} \Delta S = s^E \Delta T + d \Delta E \\ \Delta D = d \Delta T + \varepsilon^T \Delta E \end{cases} \quad (2.27)$$

Dalle (2.27), nell'ipotesi che quando le variabili indipendenti sono uguali a zero, anche le variabili dipendenti sono pari a zero, si ottiene:

$$\begin{cases} S = s^E T + d E \\ D = d T + \varepsilon^T E \end{cases} \quad (2.28)$$

Le relazioni (2.28) possono essere riscritte in notazione matriciale come:

$$\begin{cases} [S] = [s^E][T] + [d]^T[E] \\ [D] = [d][T] + [\varepsilon^T][E] \end{cases} \quad (2.29)$$

Dove anche in questo caso, l'apice " T " in $[\varepsilon^T]$ sta ad indicare che la permittività è a sforzo costante; mentre l'apice " E " in $[s^E]$ significa che la cedevolezza è a campo elettrico costante.

Nella relazione dello spostamento elettrico è quindi possibile individuare sia il termine dovuto al campo elettrico che il contributo alla polarizzazione dell'effetto piezoelettrico diretto, mentre nella relazione dell'elasticità è presente il termine dovuto allo sforzo ed anche il contributo alla deformazione dell'effetto piezoelettrico inverso.

A partire dalle relazioni lineari scritte in forma matriciale (2.29) ed utilizzando l'inverso della matrice di cedevolezza e della matrice di permittività, è possibile ottenere formulazioni diverse delle relazioni lineari per un materiale piezoelettrico.

In particolare, a seconda di quali variabili indipendenti vengono considerate, si hanno quattro possibili sistemi di equazioni lineari, prendendo una variabile indipendente tra la deformazione (S) e lo sforzo (T), e l'altra variabile indipendente tra lo spostamento elettrico (D) e il campo elettrico (E). Sono riportate riassuntivamente in Tabella 2.1 scritte in forma matriciale.

Variabili indipendenti	Relazioni lineari per materiali piezoelettrici	
$[T], [E]$	$\begin{cases} [S] = [s^E][T] + [d]^T[E] \\ [D] = [d][T] + [\varepsilon^T][E] \end{cases}$	(2.29)
$[S], [D]$	$\begin{cases} [T] = [c^D][S] - [h]^T[D] \\ [E] = -[h][S] + [\beta^S][D] \end{cases}$	(2.30)
$[T], [D]$	$\begin{cases} [S] = [s^D][T] + [g]^T[D] \\ [E] = -[g][T] + [\beta^T][D] \end{cases}$	(2.31)
$[S], [E]$	$\begin{cases} [T] = [c^E][S] - [e]^T[E] \\ [D] = [e][S] + [\varepsilon^S][E] \end{cases}$	(2.32)

Tab. 2.1 - Relazioni lineari per un materiale piezoelettrico.

2.4 Nitruro di alluminio

Nel corso di questa tesi è stato impiegato il nitruro di alluminio come materiale piezoelettrico. Questo materiale emerge come alternativa alle ceramiche piezoelettriche più comuni, come il PZT, la cui applicazione è limitata dalla loro caratteristica temperatura di Curie di 350 °C.

Un ulteriore vantaggio del nitruro di alluminio risiede nella sua non tossicità e nell'assenza di piombo, rendendolo così una scelta più sostenibile dal punto di vista ambientale rispetto alle piezoceramiche PZT più diffuse.

Il nitruro di alluminio è un composto binario prodotto dalla reazione dell'azoto con l'alluminio. Esso è costituito da una struttura di tipo wurtzítico appartenente al sistema cristallino esagonale.

La struttura esagonale del nitruro di alluminio, presentando simmetrie cristalline, riduce il numero di coefficienti indipendenti della matrice piezoelettrica, concentrandosi sui coefficienti d_{31} , d_{33} e d_{15} . Ne consegue che l'espressione (2.8) del tensore $[d]$ nel caso del nitruro di alluminio si possa riscrivere:

$$[d] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Le caratteristiche piezoelettriche del nitruro di alluminio sono strettamente legate all'orientamento cristallografico del film, evidenziando un'eccellente risposta piezoelettrica quando il film presenta perfetto orientamento lungo l'asse c /direzione [001].

Capitolo 3

Modello elettromeccanico

3.1 Introduzione

Per la valutazione del coefficiente piezoelettrico d_{31} del nitrato di alluminio, verrà adottata, come sistema di prova, la configurazione di trave a sbalzo. Di seguito sarà quindi riportato il modello elettromeccanico analitico. La configurazione consiste nel modello a trave a sbalzo che si basa sull'ipotesi di Euler-Bernoulli [12]. Questo significa che si considera la trave come un elemento lungo il quale varia il raggio di curvatura con il procedere lungo l'asse della trave.

Il sistema, che è una trave a sbalzo costituita da un materiale composito in cui è presente uno strato di materiale piezoelettrico depositato su di un substrato di tipo metallico, viene sollecitato in modo sinusoidale alla sua frequenza naturale fondamentale per ottenere la massima uscita elettrica. È la configurazione di un raccoglitore di energia piezoelettrico unimorfo.

Si assume che la trave del raccoglitore sia eccitata dal movimento della sua base, rappresentato da una traslazione nella direzione trasversale ovvero lungo l'asse z (direzione 3) e da una piccola rotazione.

Durante questo movimento, il materiale piezoelettrico subisce variazioni di lunghezza sull'asse x (direzione 1), con la parte superiore e inferiore dello strato piezoelettrico che vengono alternativamente compresse e distese.

La tensione generata è misurata dagli elettrodi posizionati sia sopra che sotto lo strato piezoelettrico, quindi si manifesta lungo l'asse z (direzione 3), perpendicolare all'asse di movimento. Questo fenomeno è comunemente indicato come modo 31, ed in questo contesto sono rilevanti solo i termini d_{31} e s_{11} menzionati nelle espressioni relative alla costante piezoelettrica e alla matrice di cedevolezza presentate nel Capitolo 2.

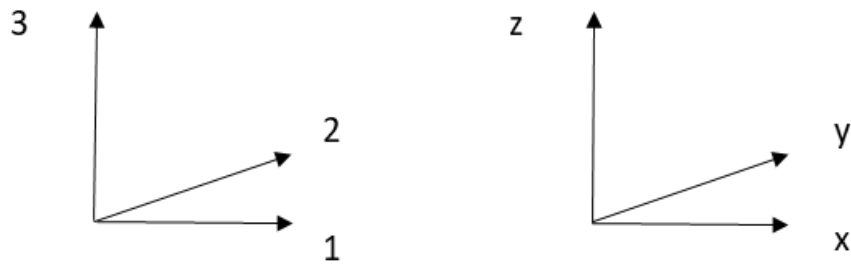


Fig. 3.1 - Sistema di riferimento utilizzato per la descrizione delle grandezze del Capitolo 3.

Il circuito elettrico è costituito da un carico resistivo R_l collegato agli elettrodi che racchiudono lo strato piezoelettrico. Pertanto, insieme alla capacità interna C_p del materiale piezoelettrico, è necessario considerare una resistenza in parallelo ad essa. Di conseguenza, il circuito elettrico risultante assume la forma di un circuito RC di primo ordine.

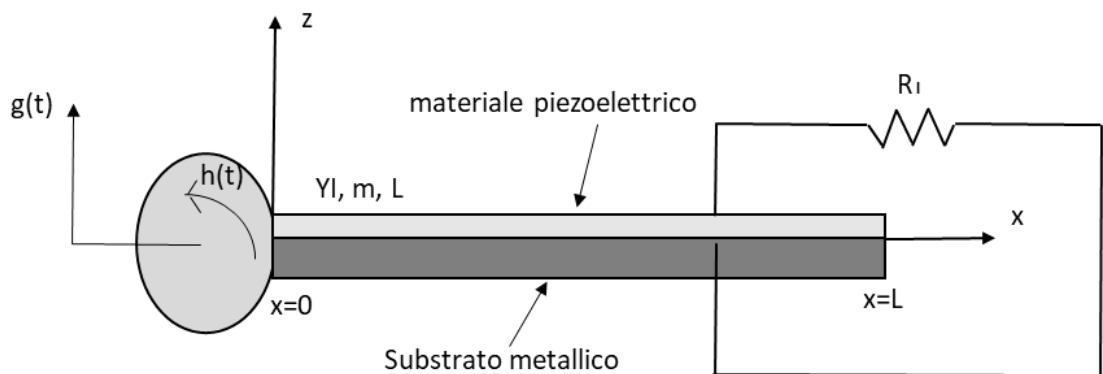


Fig. 3.2 - Rappresentazione schematica di un raccogliatore di energia piezoelettrico unimorfo. Nella vista laterale, è mostrato un carico rappresentato dalla resistenza R_l collegato tra la superficie superiore e quella inferiore dello strato di materiale piezoelettrico.

3.2 Formulazione del modello elettromeccanico

Un raccogliatore di energia piezoelettrico in cui è presente un solo strato di materiale piezoelettrico è detto unimorfo. Nell'ambito di questo studio si consideri il raccogliatore di energia unimorfo presentato in Figura 3.2, si tratta di una trave uniforme composta di Euler-

Bernoulli costituita da uno strato di materiale piezoelettrico perfettamente legato al substrato metallico di sostegno.

Il raccoglitore risulta collegato al circuito elettrico attraverso gli elettrodi, che racchiudono lo strato di materiale piezoelettrico. Si presume che gli elettrodi siano perfettamente conduttivi e che coprano l'intera superficie nella parte inferiore e superiore, in modo che il campo elettrico sia uniforme lungo la lunghezza della trave.

Il semplice circuito elettrico consiste solo in un carico resistivo. La resistenza di dispersione dello strato di materiale piezoelettrico è significativamente maggiore rispetto alla resistenza di carico R_l , di conseguenza, poiché sono collegate in parallelo, la resistenza di dispersione può essere trascurata.

La capacità del materiale piezoelettrico C_p è considerata interna allo strato piezoelettrico anziché venire mostrata come un elemento esterno in parallelo al carico resistivo. In ogni caso, come si vedrà più avanti nello studio, le relazioni costitutive piezoelettriche generano il termine di capacità elettrica, pertanto, anche se non viene esplicitamente raffigurata nella Figura 3.2 come un elemento collegato in parallelo al carico resistivo, la capacità dello strato piezoelettrico non viene trascurata e comparirà semplicemente nell'equazione del circuito.

Si assuma un'eccitazione persistente alla base del raccoglitore in modo che possano essere estratte uscite elettriche continue dal carico resistivo.

Nel modello di trave incastrata non c'è rotazione della base (ovvero $h(t) = 0$) e si ha che il movimento della base è pari a $g(t)$, dove $g(t)$ è la traslazione della base lungo l'asse z (direzione 3).

Pertanto si ha [13]:

$$w(x, t) = g(t) + w_{rel}(x, t) \quad (3.1)$$

Il movimento trasversale assoluto $w(x, t)$ della trave in ogni punto x lungo il suo asse e ad ogni istante temporale t è dato dal contributo $g(t)$, che rappresenta la traslazione della base lungo l'asse z (direzione 3), e dal termine $w_{rel}(x, t)$, che indica la traslazione relativa lungo l'asse z (direzione 3), della trave rispetto alla base.

La dinamica del movimento è descritta mediante la seguente relazione [12]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 M(x, t)}{\partial x^2} + c_s I \frac{\partial^5 w_{rel}(x, t)}{\partial x^4 \partial t} + c_a \frac{\partial w_{rel}(x, t)}{\partial t} + m \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial t^2} \\ = -m \frac{\partial^2 g(t)}{\partial t^2} - c_a \frac{\partial g(t)}{\partial t} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Dove:

- $M(x, t)$ è il momento flettente interno della trave;
- $w_{rel}(x, t)$ è lo spostamento trasverso della trave a sbalzo rispetto alla base;
- $g(t)$ è lo spostamento trasverso della base;
- $c_s I$ è la componente di smorzamento dovuta alla deformazione;

In particolare c_s è il coefficiente equivalente della componente di smorzamento dovuta alla deformazione della trave, mentre I è il momento d'inerzia equivalente dell'area della sezione trasversale composta della trave;

- c_a è il coefficiente di smorzamento viscoso del mezzo in cui si trova la trave cioè l'aria;
- m è la massa per unità di lunghezza della trave.

Ricordando le relazioni costitutive dei materiali piezoelettrici possiamo scrivere:

- Per il substrato
$$T_1^s = Y_s S_1^s \quad (3.3)$$

- Per il materiale piezoelettrico
$$T_1^p = Y_p (S_1^p - d_{31} E_3) \quad (3.4)$$

Dove, considerando che la trave è costituita da un materiale composito, si sono indicate con apice 's' le grandezze delle relazioni relative al substrato, mentre con apice 'p' le grandezze delle relazioni relative al materiale piezoelettrico.

Y indica il modulo di Young ed è pari al reciproco della cedevolezza:

$$Y = \frac{1}{s} \quad (3.5)$$

Similmente, nelle relazioni precedenti, si è indicato con il pedice 's' il modulo di Young del substrato e con il pedice 'p' quello del materiale piezoelettrico.

Integrando il momento della distribuzione dello sforzo su una sezione trasversale della trave è possibile ricavare il momento flettente interno $M(x, t)$ della trave.

Il momento flettente interno può quindi essere riscritto come:

$$M(x, t) = - \int_{h_a}^{h_b} T_1^s b z dz - \int_{h_b}^{h_c} T_1^p b z dz \quad (3.6)$$

Dove, come mostrato dalla Figura 3.3:

- h_b è la posizione della parte superiore del substrato (o inferiore del piezoelettrico) rispetto all'asse neutro della sezione composta;
- h_a è la posizione della parte inferiore del substrato rispetto all'asse neutro della sezione composta;
- h_c è la posizione della parte superiore dello strato di materiale piezoelettrico rispetto all'asse neutro della sezione composta;
- b è la lunghezza della trave.

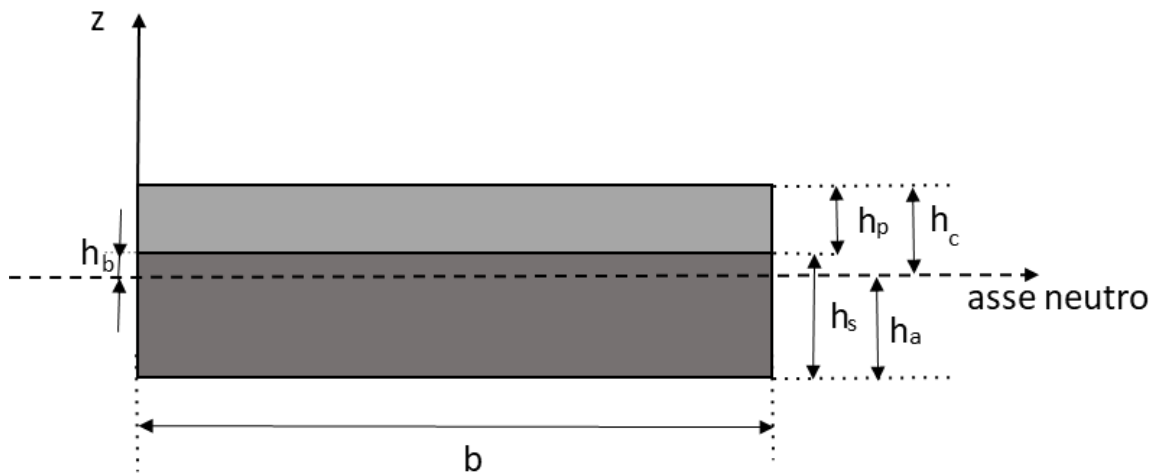


Fig. 3.3 - Sezione trasversale della trave a sbalzo. In tratteggio è indicato l'asse neutro della sezione composta (cioè l'asse della sezione omogenea equivalente).

Il campo elettrico può essere espresso come:

$$E_3(x, t) = - \frac{v(t)}{h_p} \quad (3.7)$$

con $v(t)$ tensione ai capi dello strato di materiale piezoelettrico e h_p spessore del piezoelettrico.

Mentre la relazione tra lo sforzo $S(x, h, t)$ e traslazione relativa $w_{rel}(x, t)$ lungo l'asse z (direzione 3) della trave rispetto alla base è:

$$S(x, h, t) = -h \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2} \quad (3.8)$$

Con h generica distanza (lungo z) dall'asse neutro.

Ora, sostituendo nella relazione del momento flettente interno (3.6) l'equazione (3.3), la (3.4), la (3.7) e la (3.8), si ottiene:

$$\begin{aligned} M(x, t) = & \int_{h_a}^{h_b} Y_s b \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2} z^2 dz + \int_{h_b}^{h_c} Y_p b \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2} z^2 dz \\ & - \int_{h_b}^{h_c} v(t) Y_p b \frac{d_{31}}{h_p} z dz \end{aligned} \quad (3.9)$$

Risolvendo gli integrali definiti si arriva a:

$$\begin{aligned} M(x, t) = & Y_s b \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2} \frac{z^3}{3} \Big|_{h_a}^{h_b} + Y_p b \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2} \frac{z^3}{3} \Big|_{h_b}^{h_c} \\ & - v(t) Y_p b \frac{d_{31}}{h_p} \frac{z^2}{2} \Big|_{h_b}^{h_c} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Facendo qualche passaggio matematico si ricava:

$$\begin{aligned} M(x, t) = & Y_s b \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2} \frac{(h_b^3 - h_a^3)}{3} + Y_p b \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2} \frac{(h_c^3 - h_b^3)}{3} \\ & - v(t) Y_p b \frac{d_{31}}{h_p} \frac{(h_c^2 - h_b^2)}{2} \\ M(x, t) = & b \left[Y_s \frac{(h_b^3 - h_a^3)}{3} + Y_p \frac{(h_c^3 - h_b^3)}{3} \right] \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2} \\ & - v(t) Y_p b \frac{d_{31}}{h_p} \frac{(h_c^2 - h_b^2)}{2} \end{aligned} \quad (3.11)$$

Riscrivibile come:

$$M(x, t) = YI \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2} + \vartheta v(t) \quad (3.12)$$

dove YI è la rigidità a torsione della sezione trasversale:

$$YI = b \left[\frac{Y_s(h_b^3 - h_a^3) + Y_p(h_c^3 - h_b^3)}{3} \right] \quad (3.13)$$

e ϑ è il termine di accoppiamento elettromeccanico:

$$\vartheta = -\frac{d_{31}Y_p b}{2h_p}(h_c^2 - h_b^2) = -\frac{e_{31}}{h_p} \frac{(h_c^2 - h_b^2)}{2} = \frac{e_{31}}{h_p} \frac{(h_b^2 - h_c^2)}{2} \quad (3.14)$$

Se lo strato di materiale piezoelettrico e/o gli elettrodi non coprono l'intera lunghezza L della trave ma una regione $x_1 \leq x \leq x_2$ allora la (3.12) dovrebbe essere riscritta in questo modo:

$$M(x, t) = YI \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2} + \vartheta v(t) [H(x - x_1) - H(x - x_2)] \quad (3.15)$$

dove $H(x)$ è la funzione di Heaviside, ovvero la funzione a gradino unitaria così definita:

$$\begin{cases} H(x) = 0 & \text{per } x < 0 \\ H(x) = 1 & \text{per } x \geq 0 \end{cases}$$

Sostituendo la (3.15) nell'equazione (3.2) si ottiene:

$$\begin{aligned} YI \frac{\partial^4 w_{rel}(x, t)}{\partial x^4} + c_s I \frac{\partial^5 w_{rel}(x, t)}{\partial x^4 \partial t} + c_a \frac{\partial w_{rel}(x, t)}{\partial t} + m \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial t^2} + \vartheta v(t) \\ \cdot \left[\frac{d\delta(x - x_1)}{dx} - \frac{d\delta(x - x_2)}{dx} \right] = -m \frac{\partial^2 g(t)}{\partial t^2} - c_a \frac{\partial g(t)}{\partial t} \end{aligned} \quad (3.16)$$

In cui $\delta(x)$ è la funzione delta di Dirac.

L'equazione (3.16) descrive il moto vibratorio della trave con l'accoppiamento elettrico, se vogliamo ottenere l'equazione del circuito elettrico tenendo conto dell'accoppiamento meccanico bisogna partire dalla seconda equazione della (2.26), si può riscrivere come segue:

$$D_3 = d_{31}T_1 + \varepsilon_{33}^T E_3 \quad (3.17)$$

Sostituendo nella (3.17) la relazione (3.4) che esprime lo sforzo assiale T_1 in funzione della deformazione S_1 e ricordando che il modulo di Young del materiale piezoelettrico si può esprimere come $Y_p = \frac{1}{s_{11}^E}$, si ricava:

$$D_3(x, t) = d_{31}Y_p S_1(x, t) - \frac{d_{31}^2}{S_{11}^E} E_3 + \varepsilon_{33}^T E_3 \quad (3.18)$$

$$D_3(x, t) = d_{31}Y_p S_1(x, t) + \varepsilon_{33}^S E_3 \quad (3.19)$$

Dove:

$$\varepsilon_{33}^S = \varepsilon_{33}^T - \frac{d_{31}^2}{S_{11}^E} \quad (3.20)$$

è la permittività calcolata a deformazione costante.

Sostituendo nell'equazione (3.19) la relazione (3.7) che lega il campo elettrico alla tensione, si può ottenere:

$$D_3(x, t) = d_{31}Y_p S_1(x, t) - \varepsilon_{33}^S \frac{v(t)}{h_p} \quad (3.21)$$

Ricordando l'equazione (3.8), possiamo scrivere la deformazione media in funzione della distanza tra l'asse neutro e il centro dello strato di materiale piezoelettrico h_{pc} (si veda Figura 3.4):

$$S_1(x, t) = -h_{pc} \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2} \quad (3.22)$$

Sostituendo la (3.22) nella (3.21), si ottiene:

$$D_3(x, t) = -d_{31}Y_p h_{pc} \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2} - \varepsilon_{33}^S \frac{v(t)}{h_p} \quad (3.23)$$



Fig. 3.4 - Vista laterale della trave a sbalzo.

La quantità di carica $q(t)$ sviluppata dal materiale piezoelettrico è esprimibile come l'integrale dello spostamento elettrico sull'area dell'elettrodo:

$$q(t) = \int_A \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} dA = - \int_{x_1}^{x_2} \left(d_{31} Y_p h_{pc} b \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2} + \varepsilon_{33}^S b \frac{v(t)}{h_p} \right) dx \quad (3.24)$$

Con \mathbf{n} versore normale uscente dalla superficie degli elettrodi.

Da cui possiamo ottenere la corrente $i(t)$ in uscita:

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} = - \int_{x_1}^{x_2} d_{31} Y_p h_{pc} b \frac{\partial^3 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2 \partial t} dx - \frac{\varepsilon_{33}^S b L_{piezo}}{h_p} \frac{dv(t)}{dt} \quad (3.25)$$

Dove si è introdotto:

$$L_{piezo} = x_2 - x_1 \quad (3.26)$$

Nella relazione (3.25) si nota la capacità dello strato di materiale piezoelettrico C_p . Tale capacità è esprimibile come:

$$C_p = \frac{\varepsilon_{33}^S b L_{piezo}}{h_p} \quad (3.27)$$

La tensione in uscita, ai capi del carico R_l puramente resistivo, sarà semplicemente:

$$v(t) = R_l i(t) = \frac{dq(t)}{dt} = -R_l \left[\int_{x_1}^{x_2} d_{31} Y_p h_{pc} b \frac{\partial^3 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2 \partial t} dx + \frac{\varepsilon_{33}^S b L_{piezo}}{h_p} \frac{dv(t)}{dt} \right] \quad (3.28)$$

o in maniera equivalente:

$$\frac{\varepsilon_{33}^S b L_{piezo}}{h_p} \frac{dv(t)}{dt} + \frac{v(t)}{R_l} = - \int_{x_1}^{x_2} d_{31} Y_p h_{pc} b \frac{\partial^3 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2 \partial t} dx \quad (3.29)$$

3.3 Eccitazione della base

Per trovare una soluzione analitica al problema elettromeccanico associato è necessario risolvere le equazioni (3.16) e (3.29).

Usando il metodo di separazione delle variabili e la sovrapposizione, il movimento relativo della trave a sbalzo rispetto alla base $w_{rel}(x, t)$ si può rappresentare come una serie convergente di autofunzioni [22]:

$$w_{rel}(x, t) = \sum_{r=1}^{\infty} \phi_r(x) \eta_r(t) \quad (3.30)$$

in cui $\phi_r(x)$ è l'autofunzione normalizzata della massa, $\eta_r(t)$ è la coordinata modale del modo r -esimo della trave a sbalzo ed il pedice ' r ' indica il modo di vibrazione specifico.

Le condizioni al contorno per il moto vibratorio relativo della trave rispetto alla base sono:

- Dall'incastro in $x = 0$ (dove $w_{rel} = 0$ e $\frac{\partial w_{rel}}{\partial x} = 0$):

$$w_{rel}(0, t) = 0 \quad (3.31)$$

$$\left. \frac{\partial w_{rel}(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0$$

- Dall'estremo libero in $x = L$ (dove sono nulli il momento flettente ed il taglio):

$$YI \left. \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2} \right|_{x=L} = 0 \quad (3.32)$$

$$YI \left. \frac{\partial^3 w_{rel}(x, t)}{\partial x^3} \right|_{x=L} = 0$$

Siccome il sistema è proporzionalmente smorzato, le autofunzioni $\phi_r(x)$ sono di fatto le autofunzioni normalizzate rispetto alla massa del problema di vibrazione libera non smorzata corrispondente [12] e sono date da:

$$\phi_r = \sqrt{\frac{1}{mL}} \left[\cosh \frac{\lambda_r}{L} x - \cos \frac{\lambda_r}{L} x - \sigma_r \left(\sinh \frac{\lambda_r}{L} x - \sin \frac{\lambda_r}{L} x \right) \right] \quad (3.33)$$

dove i numeri adimensionali λ_r derivano dalla soluzione dell'equazione caratteristica:

$$1 + \cos\lambda \cosh\lambda = 0 \quad (3.34)$$

e il termine σ_r è rispettivamente:

$$\sigma_r = \frac{\operatorname{senh}\lambda_r - \operatorname{sen}\lambda_r}{\cosh\lambda_r + \cos\lambda_r} \quad (3.35)$$

Le autofunzioni ϕ_r soddisfano le seguenti condizioni di ortogonalità:

$$\int_{x=0}^L m \phi_s(x) \phi_r(x) dx = \delta_{rs} \quad (3.36)$$

$$\int_{x=0}^L YI \phi_s(x) \frac{d^4 \phi_r(x)}{dx^4} dx = \omega_r^2 \delta_{rs} \quad (3.37)$$

In cui δ_{rs} è la funzione delta di Kronecker, così definita:

$$\begin{cases} \delta_{rs} = 1 & \text{se } s = r \\ \delta_{rs} = 0 & \text{se } s \neq r \end{cases}$$

e ω_r è la frequenza naturale non smorzata del modo r-esimo, calcolata come:

$$\omega_r = \lambda_r^2 \sqrt{\frac{YI}{mL^4}} \quad (3.38)$$

Servendosi dell'equazione (3.30) e delle condizioni di ortogonalità (3.36) e (3.37), dalla (3.16) si ricava l'equazione differenziale della risposta modale del sistema $\eta_r(t)$:

$$\frac{d^2 \eta_r(t)}{dt^2} + 2\zeta_r \omega_r \frac{d\eta_r(t)}{dt} + \omega_r^2 \eta_r(t) + \chi_r v(t) = N_r(t) \quad (3.39)$$

Dove:

- χ_r è il termine di accoppiamento modale, esprimibile come:

$$\chi_r = \vartheta \left. \frac{d\phi_r(x)}{dx} \right|_{x=x_1}^{x=x_2} \quad (3.40)$$

- ζ_r è il coefficiente di smorzamento meccanico, esprimibile come:

$$\zeta_r = \frac{c_s I \omega_r}{2YI} + \frac{c_a}{2m\omega_r} \quad (3.41)$$

questo termine tiene conto sia degli effetti dello smorzamento dovuti alla deformazione della trave, sia degli effetti dello smorzamento viscoso causato dall'aria.

La funzione forzante modale meccanica $N_r(t)$ è esprimibile come somma della componente inerziale dell'eccitazione meccanica $N_r^m(t)$ e della componente di smorzamento dell'eccitazione meccanica $N_r^c(t)$:

$$N_r(t) = N_r^m(t) + N_r^c(t) \quad (3.42)$$

Con il modello di trave incastrata valgono:

$$N_r^m(t) = -m\gamma_r^w \frac{d^2 g(t)}{dt^2} \quad (3.43)$$

$$N_r^c(t) = -c_a \gamma_r^w \frac{dg(t)}{dt} \quad (3.44)$$

Dove:

$$\gamma_r^w = \int_{x=0}^L \phi_r(x) dx \quad (3.45)$$

Sostituendo l'equazione (3.33) nella (3.45), si ottiene:

$$\gamma_r^w = \int_{x=0}^L \sqrt{\frac{1}{mL}} \left[\cosh \frac{\lambda_r}{L} x - \cos \frac{\lambda_r}{L} x - \sigma_r \left(\sinh \frac{\lambda_r}{L} x - \sin \frac{\lambda_r}{L} x \right) \right] dx \quad (3.46)$$

$$\gamma_r^w = \sqrt{\frac{1}{mL}} \frac{L}{\lambda_r} \left[\sinh \frac{\lambda_r}{L} x - \sin \frac{\lambda_r}{L} x - \sigma_r \left(\cosh \frac{\lambda_r}{L} x - \cos \frac{\lambda_r}{L} x \right) \right]_{x=0}^L$$

Sostituendo l'espressione (3.39) si ricava:

$$\gamma_r^w = \sqrt{\frac{1}{mL}} \frac{L}{\lambda_r} \left\{ \left[\sinh \frac{\lambda_r}{L} L - \sin \frac{\lambda_r}{L} L - \frac{\sinh \lambda_r - \sin \lambda_r}{\cosh \lambda_r + \cos \lambda_r} \left(\cosh \frac{\lambda_r}{L} L - \cos \frac{\lambda_r}{L} L \right) \right] - \left[\sinh 0 - \sin 0 - \frac{\sinh \lambda_r - \sin \lambda_r}{\cosh \lambda_r + \cos \lambda_r} (\cosh 0 + \cos 0) \right] \right\} \quad (3.47)$$

Semplificando si ottiene:

$$\gamma_r^w = \frac{L}{\sqrt{mL}} \frac{2\sigma_r}{\lambda_r} \quad (3.48)$$

Poiché risulta di principale interesse il comportamento dinamico del sistema nel caso di vibrazione alla frequenza fondamentale, di seguito ci focalizzeremo esclusivamente sul modo di vibrazione $r = 1$, che è il modo fondamentale ed il più significativo ai fini dell'analisi.

L'espressione (3.48) può essere quindi riscritta come:

$$\gamma_1^w = \frac{L}{\sqrt{mL}} \frac{2\sigma_1}{\lambda_1} \quad (3.49)$$

Usando $\sigma_1 = 0.734095514$ e $\lambda_1 = 1.87510407$, calcolati a partire dalle espressioni (3.35) e (3.34), l'equazione (3.49) diventa [13]:

$$\gamma_1^w = 0.783 \frac{L}{\sqrt{mL}} \quad (3.50)$$

Se l'effetto dell'eccitazione causata dallo smorzamento esterno del mezzo (cioè l'aria) è trascurabile rispetto all'eccitazione dovuta all'inerzia, ovvero se vale che $N_r^c(t) \ll N_r^m(t)$, allora $N_r^c(t)$ può essere considerata approssimativamente nulla, ovvero $N_r^c(t) = 0$.

3.4 Analisi in regime sinusoidale permanente con eccitazione sinusoidale della base

La generica funzione sinusoidale:

$$a(t) = A_M \sin(\omega t + \alpha) = \sqrt{2} A \sin(\omega t + \alpha) \quad (3.51)$$

è individuata dalla coppia di costanti reali (A_M, α) o $(\sqrt{2}A, \alpha)$ dove $A_M \geq 0, A \geq 0$ e $-\pi < \alpha \leq \pi$.

Poiché un numero complesso scritto in forma polare è individuato dal modulo e dall'argomento (il modulo è un valore ≥ 0 e l'argomento è nell'intervallo $]-\pi, \pi]$), si ha una corrispondenza biunivoca tra l'insieme delle funzioni sinusoidali isofrequenziali e l'insieme dei numeri complessi. Si può quindi introdurre il numero complesso:

$$\bar{A} = Ae^{j\alpha} \quad (3.52)$$

con modulo pari al valore efficace (≥ 0) e argomento pari alla fase iniziale α ($-\pi < \alpha \leq \pi$).

La trasformata di Steinmetz, o trasformata simbolica delle funzioni sinusoidali, permette di associare alle funzioni sinusoidali isofrequenziali i numeri complessi, detti fasori o rappresentazioni simboliche delle sinusoidi. Perciò i fasori costituiscono le rappresentazioni simboliche delle funzioni sinusoidali isofrequenziali, ovvero alla generica funzione sinusoidale (3.51) corrisponde il fasore (3.52).

Pertanto nel caso di regime sinusoidale permanente, la relazione (3.39) può essere riscritta usando i fasori nel seguente modo:

$$-\omega^2 \bar{\eta}_1 + 2\zeta_1 \omega_1 j \omega \bar{\eta}_1 + \omega_1^2 \bar{\eta}_1 + \chi_1 \bar{V} = \bar{N}_1 \quad (3.53)$$

La cui soluzione può essere espressa come:

$$\bar{\eta}_1 = \frac{\bar{N}_1 - \chi_1 \bar{V}}{-\omega^2 + 2j\omega_1 \omega \zeta_1 + \omega_1^2} \quad (3.54)$$

Dove si ricorda che:

$$\zeta_1 = \frac{c_s I \omega_1}{2YI} + \frac{c_a}{2m\omega_1} \quad (3.55)$$

$$\bar{N}_1 = -0.783\sqrt{mL} (-\omega^2 \bar{G}) = 0.783\sqrt{mL} \omega^2 \bar{G} \quad (3.56)$$

$$\chi_1 = \vartheta \frac{d\phi_1(x)}{dx} \Big|_{x=x_1}^{x=x_2} \quad (3.57)$$

Nel caso specifico in esame gli elettrodi ricoprono la regione $x_1 \leq x \leq x_2$, come si può vedere nella Figura 3.5.

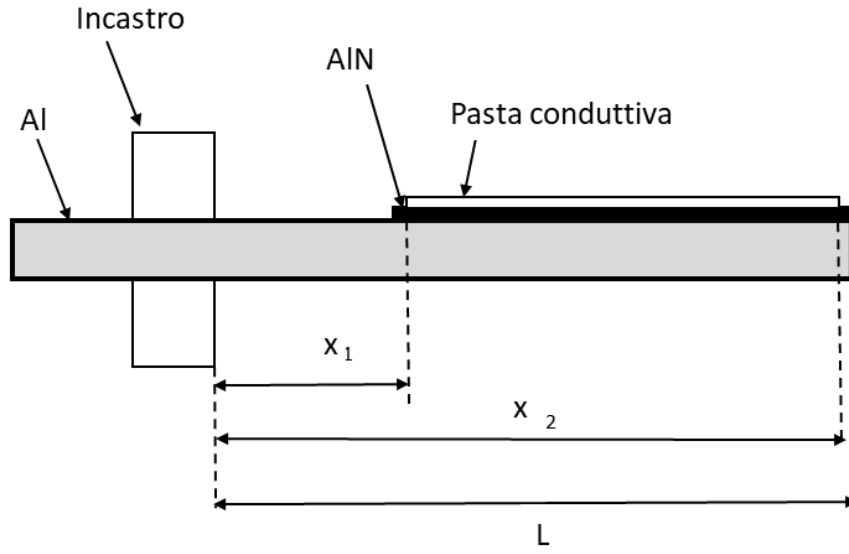


Fig. 3.5 - Vista laterale della struttura a cantilever con il deposito di materiale piezoelettrico AIN.

Si assuma che la trave sia incastrata (ovvero che $h(t) = 0$) e che sia sottoposta ad una traslazione sinusoidale della base nella direzione trasversale $g(t) = Y_0 e^{j\omega t}$. La (3.56) diventa:

$$\bar{N}_1 = 0.783\sqrt{mL} \omega^2 \bar{Y}_0 \quad (3.58)$$

Nelle ipotesi fatte, l'equazione della tensione d'uscita (3.29), in regime sinusoidale, si esprime come:

$$\frac{\bar{V}}{R_l} + j\omega C_p \bar{V} = -d_{31} Y_p h_{pc} b \frac{d\phi_1(x)}{dx} \Big|_{x=x_1}^{x=x_2} j\omega \bar{\eta}_1 \quad (3.59)$$

Dove chiamiamo φ_1^* la quantità:

$$\varphi_1^* = -d_{31} Y_p h_{pc} b \frac{d\phi_1(x)}{dx} \Big|_{x=x_1}^{x=x_2} \quad (3.60)$$

Sostituendo nella (3.65) la (3.60) e la (3.66) e svolgendo qualche passaggio matematico, si arriva alla:

$$\frac{\bar{V}}{\omega^2 \bar{Y}_0} = \frac{\frac{j\omega\varphi_1^* 0.783\sqrt{mL}}{-\omega^2 + j2\omega\omega_1\zeta_1 + \omega_1^2}}{\frac{1}{R_l} + j\omega C_p + \frac{j\omega\chi_1\varphi_1^*}{-\omega^2 + j2\omega\omega_1\zeta_1 + \omega_1^2}} \quad (3.61)$$

Che per $R_l \rightarrow \infty$, ovvero a vuoto, risulta essere:

$$\frac{\bar{V}}{\omega^2 \bar{Y}_0} = \frac{\frac{\varphi_1^*}{C_p} 0.783\sqrt{mL}}{\frac{\chi_1}{C_p} \varphi_1^* - \omega^2 + j2\omega\omega_1\zeta_1 + \omega_1^2} \quad (3.62)$$

Nel caso di raccoglitore di energia piezoelettrico di tipo unimorfo, si può scrivere:

$$\chi_1 = -d_{31}Y_p b \frac{(h_c^2 - h_b^2)}{2h_p} \frac{d\phi_1(x)}{dx} \Big|_{x=x_1}^{x=x_2} = -d_{31}Y_p b h_{pc} \frac{d\phi_1(x)}{dx} \Big|_{x=x_1}^{x=x_2} = \varphi_1^* \quad (3.63)$$

Per h_p piccolo rispetto h_s , si ha che $h_{pc} \approx \frac{h_s}{2}$.

Inoltre:

$$\begin{aligned} \frac{d\phi_1(x)}{dx} \Big|_{x=x_1}^{x=x_2} &= \frac{\lambda_1}{L\sqrt{mL}} \left\{ \left[\sinh \frac{\lambda_1}{L} x_2 - \sin \frac{\lambda_r}{L} x_2 - \sigma_1 \left(\cosh \frac{\lambda_1}{L} x_2 - \cos \frac{\lambda_1}{L} x_2 \right) \right] \right. \\ &\quad \left. - \left[\sinh \frac{\lambda_1}{L} x_1 - \sin \frac{\lambda_r}{L} x_1 - \sigma_1 \left(\cosh \frac{\lambda_1}{L} x_1 - \cos \frac{\lambda_1}{L} x_1 \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (3.64)$$

Prendendo il modulo della (3.62) e usando la (3.63), si può determinare la relazione tra il valore efficace della tensione in uscita (V_{RMS}) e il valore efficace dell'accelerazione di eccitazione (E_{RMS}) [15]:

$$\left| \frac{\bar{V}}{\omega^2 \bar{Y}_0} \right| = \frac{V_{RMS}}{E_{RMS}} = \frac{0.783\sqrt{mL} \frac{|\chi_1|}{C_p}}{\sqrt{\left(\frac{\chi_1^2}{C_p^2} + \omega_1^2 - \omega^2 \right)^2 + (2\zeta_1\omega_1\omega)^2}} \quad (3.65)$$

3.5 Determinazione del parametro piezoelettrico d_{31}

Lo scopo di questo paragrafo è di illustrare la procedura adoperata per il calcolo del parametro piezoelettrico d_{31} del film di nitruro di alluminio depositato sul substrato di alluminio tramite il sistema magnetron sputtering in funzione presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Padova.

3.5.1 Fit dei dati sperimentali

Utilizzando la configurazione di trave a sbalzo, il substrato con deposito di AlN e pasta conduttiva in carbonio viene messo in vibrazione. In questo modo, il convertitore genera un segnale di tensione in uscita, il quale viene raccolto tramite i morsetti collegati al campione, rilevato attraverso una sonda passiva di tensione e visualizzato mediante un oscilloscopio.

La tensione in uscita cambia al variare della frequenza, per questo le misurazioni vengono effettuate in un range di frequenze compreso tra 100 Hz e 800 Hz. I dati ottenuti vengono registrati al fine di ottenere una curva sperimentale che descriva il valore efficace della tensione in funzione della pulsazione ω . Il valore dell'accelerazione è mantenuto costante per tutte le frequenze ed il suo valore efficace è fissato pari a $1 g = 9.81 m/s^2$.

A partire dalla (3.65) è possibile scrivere la funzione che permette di eseguire il fit dei dati sperimentali come:

$$V_{RMS} = m_1 + \frac{m_2}{\sqrt{(\omega^2 - m_3^2)^2 + (\omega m_4)^2}} \quad (3.66)$$

Dove:

- il parametro $m_1 [V]$ è stato inserito con lo scopo di tenere traccia dell'offset di tensione presente nel segnale sperimentale.
- Il parametro $m_2 [\frac{V}{s^2}]$ è definito come:

$$m_2 = E_{RMS} 0.783 \sqrt{mL} \frac{|\chi_1|}{C_p} \text{ con } |\chi_1| = \varphi_1^* \quad (3.67)$$

- Il parametro $m_3 [s^{-1}]$, se il termine $\frac{\varphi_1^2}{C_p}$ è trascurabile rispetto a ω_1^2 , è pari a:

$$m_3 = \omega_1 \quad (3.68)$$

- Il parametro $m_4 [s^{-1}]$ risulta essere:

$$m_4 = 2\zeta\omega_1 \quad (3.69)$$

Da cui, se vale che $m_3 = \omega_1$, si può ottenere il parametro di smorzamento ζ come:

$$\zeta = \frac{m_4}{2m_3} \quad (3.70)$$

È possibile interpretare la curva sperimentale usando la formula (3.66) e, mediante fit numerico dei dati sperimentali, si ottengono i valori dei parametri m_1, m_2, m_3 e m_4 .

Una volta ottenuto il valore di m_2 , dalla (3.67) si può ricavare:

$$\varphi_1^* = \frac{m_2 C_p}{9.81 \cdot 0.783 \sqrt{mL}} \quad (3.71)$$

dove:

- $C_p [F]$ è il valore di capacità misurato a 500 Hz (ovvero vicino alla prima frequenza naturale);
- si è usato il valore $E_{RMS} = 9.81 [m/s^2]$;
- $L [m]$ è la lunghezza della trave a sbalzo (si veda Figura 3.5);
- $m [kg]$ è la massa per unità di lunghezza della trave a sbalzo, calcolabile in questo modo:

$$m = \rho b h \quad (3.72)$$

in cui:

- $\rho [kg/m^3]$ è la densità del substrato di alluminio;
- $b [m]$ è la larghezza del substrato di alluminio;
- $h [m]$ è lo spessore del substrato di alluminio.

Usando il valore di $\varphi_1^* [Cm^{-1}kg^{-1/2}]$ calcolato con la (3.71) e sostituendolo nella (3.63) si riesce a ricavare il valore assoluto del parametro piezoelettrico $|d_{31}|$ espresso in $\left[\frac{C}{N}\right]$:

$$|d_{31}| = \frac{\varphi_1^*}{Y_p \frac{h_s}{2} b \left. \frac{d\Phi_1(x)}{dx} \right|_{x_1}^{x_2}} \quad (3.73)$$

dove:

- $h_s [m]$ è lo spessore del substrato di alluminio;
- $b [m]$ è la larghezza del substrato di alluminio;
- $Y_p \left[\frac{N}{m^2}\right]$ è il modulo di Young del materiale piezoelettrico: per il nitrato di alluminio, si utilizzerà $Y_p = 345 [GPa]$ (a 298 K) valore presente in letteratura [32];
- $\left.\frac{d\Phi_1(x)}{dx}\right|_{x_1}^{x_2}$ è calcolabile come in (3.64).

Capitolo 4

Campione di prova e strumentazione utilizzata in laboratorio

4.1 Campione di prova

Il campione in questione è stato realizzato prima di questo lavoro di tesi, presso il laboratorio Materiali Micro e Nano strutturati “M.Bagatin” del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova. Era pertanto già disponibile all'inizio di questo lavoro di tesi.

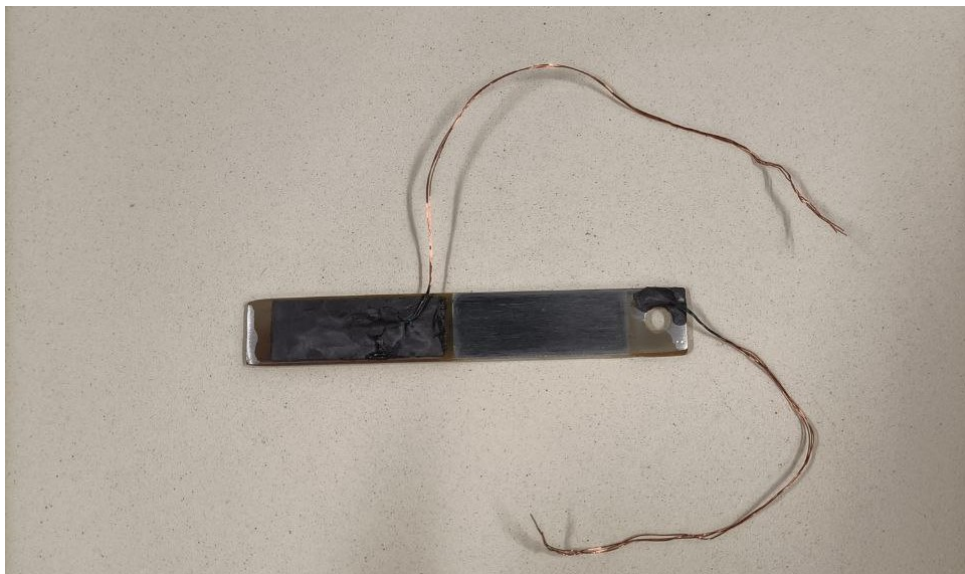


Fig. 4.1 - Campione di prova.

La sua realizzazione era stata fatta, in modo sistematico, come di seguito indicato. Per realizzare il campione in esame si è partiti da una barretta di alluminio $75 \times 12 \text{ mm}^2$ di spessore nominale 2 mm a cui si è effettuato un foro di 4 mm ad una distanza di 4.3 mm dall'estremità. Questo costituisce il substrato su cui è stato poi effettuato il deposito del film di nitruro di alluminio mediante tecnica magnetron sputtering di tipo reattivo.

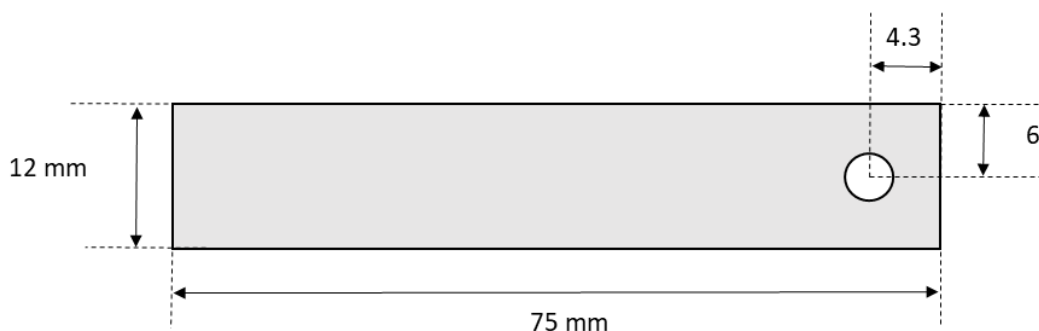


Fig. 4.2 - Rappresentazione (non in scala) del substrato di alluminio su cui è stato effettuato il deposito di AlN . Il suo spessore nominale è pari a 2 mm .

Per la realizzazione del campione in esame, è stato impiegato il sistema di magnetron sputtering presente presso il laboratorio di Materiali Micro e Nano strutturati "M.Bagatin" del DII dell'Università di Padova.

All'interno della camera di sputtering era presente un target di alluminio puro al 99.99%, di diametro circolare (diametro 6").

Durante il processo di sputtering, sono stati utilizzati argon e azoto. I flussi di questi gas sono stati regolati tramite controllori e misuratori di portata dedicati per ciascun gas. La concentrazione di azoto, espressa come rapporto tra il flusso di azoto e il flusso totale di 25 sccm, è stata fissata a 0.4, corrispondente a 10 sccm per l'azoto e 15 sccm per l'argon.

L'alimentazione del sistema è stata fornita da un alimentatore a corrente continua pulsata (TruPlasma DC 4001), con una potenza massima di 1 kW. Questo alimentatore ha operato ad una frequenza di 50 kHz e con un duty cycle del 90% (tempo di pausa $2 \mu\text{s}$), mentre la potenza in uscita è stata mantenuta costante a 150 W.

Durante il processo la pressione operativa nella camera di sputtering è stata di 0.3 Pa. La distanza tra il bersaglio e il substrato è stata di circa 6 cm. La deposizione del film è stata eseguita in modo continuo per un periodo di 50 ore.

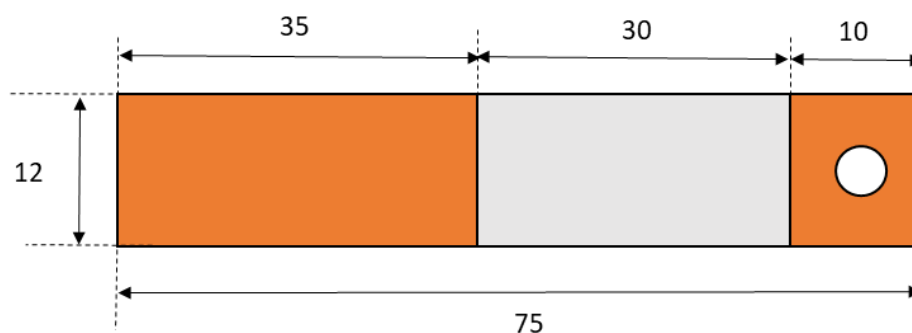


Fig. 4.3 - Rappresentazione (non in scala) del substrato di alluminio con il deposito (area $12 \times 35 \text{ mm}^2$) di nitruro di alluminio.

Nell'ambito dello sviluppo dei trasduttori piezoelettrici per applicazioni ad alta temperatura, una configurazione iniziale adottata per una prima caratterizzazione elettrica è stata quella di un condensatore piano a piastre parallele.

Per la realizzazione di questa struttura, era cruciale sviluppare un secondo elettrodo in grado di garantire elevata conducibilità elettrica, adesione al film di nitruro di alluminio, buone proprietà meccaniche e durabilità nel tempo, oltre al funzionamento a temperature elevate. La soluzione più immediata è stata l'utilizzo di vernici o paste conduttive.

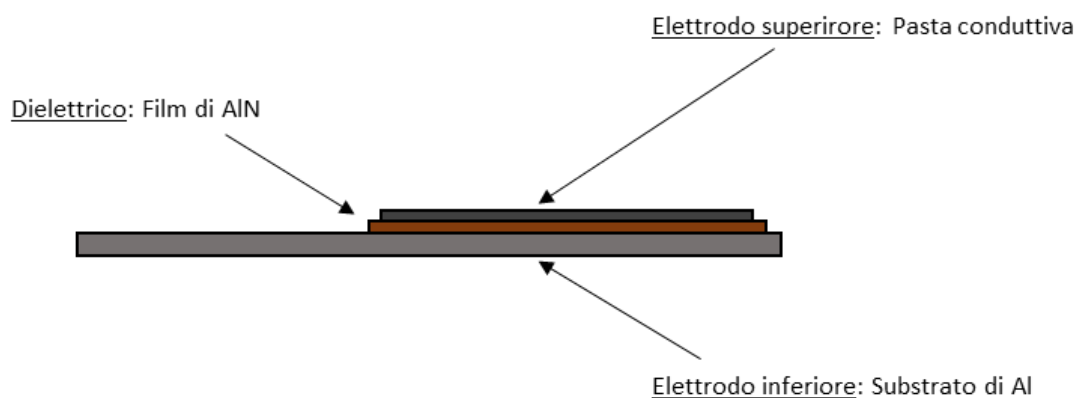


Fig. 4.4 - Modello schematico del condensatore piano a piastre parallele nel contesto in esame.

Tra le opzioni disponibili in commercio, il criterio principale di selezione è stato l'ideoneità per l'uso ad alte temperature di esercizio, considerando la temperatura di Curie del PZT e l'obiettivo di trovarne valide alternative.

Nello specifico, per il campione utilizzato nel presente lavoro di tesi, è stata impiegata la pasta conduttiva PELCO® High Temperature Carbon Paste, la cui formulazione presenta le seguenti caratteristiche salienti:

- Sistema inorganico;
- Elevata temperatura di servizio: è formulata appositamente per applicazioni che richiedono una temperatura di esercizio continua ultra alta, fino a 2000 °C;
- Conducibilità elettrica e termica moderate;
- Pasta sottile: la sua viscosità è riducibile aggiungendo acqua.

Riempitivo	Carbonio
Legante	Silicato inorganico
Diluente	Acqua
Colore	Grigio scuro / Nero
Consistenza	Pasta liscia e fluida. La viscosità può essere ridotta aggiungendo non più del 10% di acqua per peso.
Spessore consigliato	25-100 µm applicato come strato adesivo o rivestimento
Contenuto di carbonio per peso	50-60 %
Densità	1.6 g/cm ³
Temperatura di esercizio	Fino a 2000 °C
Conducibilità termica stimata	1 W/mK
Forza del legame	Moderata ma fragile
Trattamento	Lasciare all'aria per 2-4 ore, poi effettuare un trattamento termico graduale di 2 ore a 93°C e poi di 2 ore a 260°C in modo da ottenere le proprietà elettriche e meccaniche finali. Se il trattamento termico non viene eseguito la matrice può assorbire umidità

Tab. 4.1 - Specifiche tecniche della pasta conduttiva PELCO® High Temperature Carbon Paste.

La stesura della pasta conduttiva è stata eseguita successivamente alla mascheratura ottenuta sovrapponendo strisce di nastro carta in modo da delimitare un'area di 30 x 11 mm². Quest'area corrisponderà quindi all'area dell'elettrodo superiore e del condensatore piano.

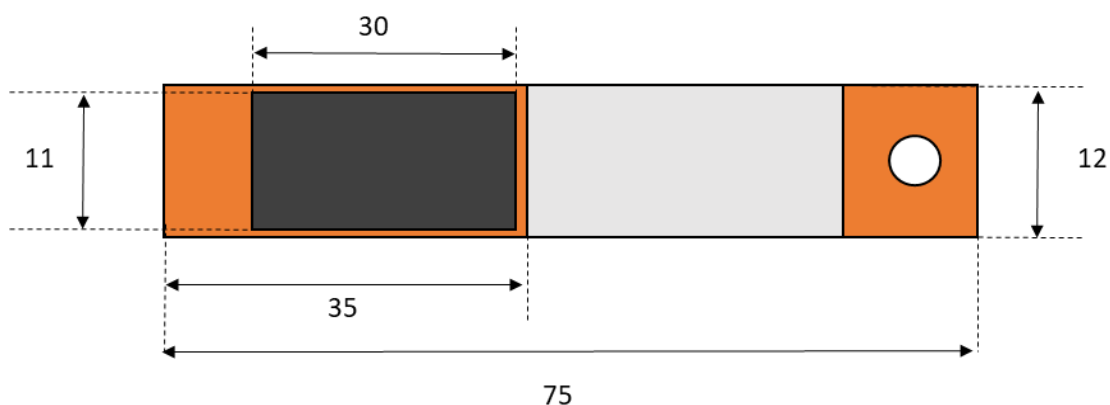


Fig. 4.5 - Rappresentazione (non in scala) del campione.

Infine, i collegamenti elettrici sono stati realizzati utilizzando fili di rame intrecciati e incollati all'elettrodo, sfruttando le proprietà adesive della pasta conduttiva stessa. Questi fili di rame sono stati recuperati da comuni cavi elettrici unipolari di uso domestico, dai quali è stata rimossa la guaina isolante in materiale plastico PVC.

4.2 Strumentazione utilizzata in laboratorio

Si illustrano sinteticamente gli strumenti utilizzati in laboratorio durante il lavoro di tesi.

4.2.1 Generatore di funzioni Agilent 33120A

Il generatore di funzioni Agilent 33120A genera il segnale di tensione utilizzato per alimentare l'amplificatore collegato allo shaker elettrodinamico.

Attraverso questo strumento, è possibile creare un segnale di tensione con la forma d'onda desiderata, che nel contesto di questo studio è una forma d'onda sinusoidale. Inoltre, è possibile regolarne l'ampiezza così da poter mantenere costante sullo shaker elettrodinamico MODAL SHOP 2007E un valore di accelerazione delle vibrazioni pari a 1 g. Tale generatore di funzioni consente anche di variare la frequenza al fine di individuare la frequenza di risonanza della configurazione di trave a sbalzo.



Fig. 4.6 - Generatore di funzioni Agilent 33120A.

Di seguito ne verranno riassunte le specifiche tecniche:

Forme d'onda	sinusoidale, quadra, a dente di sega, triangolare, dente di sega negativa
Risoluzione ampiezza forme d'onda (segno compreso)	12 bit
Frequenza di campionamento	40 MS/s
Range di frequenza	100 μ Hz a 15 MHz
Risoluzione frequenza	10 μ Hz
Distorsione armonica massima	-70 dBc
Distorsione armonica totale (THD)	<0.04 %
Tensione massima in uscita	20 Vpp
Precisione ampiezza (a 1 kHz)	\pm 1% del valore di uscita specificato
Impedenza in uscita	50 Ω
Modulazione	AM, FM, FSK, burst
Range di frequenza	100 μ Hz - 15 MHz
Tensione di alimentazione	100 V / 120 V / 220 V / 240 V \pm 10%
Potenza assorbita	50 VA di picco (28 W media)

Tab. 4.2 - Specifiche tecniche del generatore di funzioni Agilent 33120A.

4.2.2 Amplificatore SmartAmp POWER AMPLIFIER 2100E21-100

L'amplificatore SmartAmp POWER AMPLIFIER 2100E21-100 è utilizzato per trasformare il segnale di tensione, proveniente dal generatore di funzioni Agilent 33120, in un segnale di corrente, necessario per alimentare lo shaker elettrodinamico MODAL SHOP 2007E. Questo amplificatore consente anche di regolare l'ampiezza del segnale in modo da mantenere costante un'accelerazione verticale di 1 g delle vibrazioni.



Fig. 4.7 - Amplificatore SmartAmp POWER AMPLIFIER 2100E21-100.

Di seguito ne verranno riassunte le specifiche tecniche:

Potenza massima in uscita	100 W
Guadagno in tensione massimo	20 dB
Efficienza	92 %
Limite di corrente	18 A (valore di picco)
Distorsione armonica	< 0.1%
Risposta in frequenza	0.4 Hz – 40 kHz
Impedenza in ingresso	10 k Ω
Impedenza in uscita	30 k Ω

Tab. 4.3 - Specifiche tecniche dell'amplificatore SmartAmp POWER AMPLIFIER 2100E21-100.

4.2.3 Shaker elettrodinamico MODAL SHOP 2007E

Il dispositivo utilizzato per generare il movimento vibratorio verticale alla base della trave a sbalzo su cui è stato depositato il film di materiale piezoelettrico è lo shaker elettrodinamico MODAL SHOP 2007E.

Questo dispositivo utilizza la corrente in ingresso, dovuta all'amplificatore SmartAmp POWER AMPLIFIER 2100E21-100, per ottenere una vibrazione verticale con frequenza identica a quella della corrente.

Per fare ciò, utilizza una struttura, detta armatura, composta da un materiale ferromagnetico avvolto da una bobina di materiale conduttore, su cui è montata la tavola di supporto a cui è possibile fissare la trave che si vuole portare in vibrazione. Grazie ad elementi flessibili di collegamento, l'armatura è libera di muoversi indipendentemente dalla struttura di supporto. All'interno di quest'ultima è presente un magnete permanente il cui flusso magnetico si chiude lungo l'armatura e le pareti esterne della struttura. Quando la bobina viene attraversata da corrente alternata, si genera una forza verticale alternata in direzioni opposte a causa dell'interazione tra il flusso magnetico costante del magnete permanente e il flusso variabile prodotto dalla corrente alternata, inducendo così le vibrazioni.



Fig. 4.8 - Shaker elettrodinamico MODAL SHOP 2007E.

Forza massima in uscita (caso sinusoidale – valore di picco)	31 N
Forza massima in uscita (caso generico – valore RMS)	22 N
Forza massima in uscita (impulso – valore di picco)	67 N
Range di frequenza	DC – 9 kHz
Accelerazione massima (valore di picco)	70 g
Corrente massima in input	8 A

Tab. 4.4 - Specifiche tecniche dello shaker elettrodinamico MODAL SHOP 2007E.

4.2.4 Accelerometro piezoelettrico PCB 352C65 e condizionatore di segnale PCB 480C02

L'accelerometro piezoelettrico PCB 352C65 ha il compito di rilevare e misurare l'accelerazione alla quale è soggetta la base su cui è montato il trasduttore piezoelettrico, configurato come trave a sbalzo. L'accelerazione così rilevata viene poi trasferita al condizionatore di segnale PCB 480C02 che lo invierà all'oscilloscopio.

Il principio di funzionamento dell'accelerometro piezoelettrico si basa su una massa sospesa su un cristallo di materiale piezoelettrico. Quando l'accelerazione viene applicata, la massa, con la sua inerzia, comprime il cristallo piezoelettrico, generando un segnale di tensione proporzionale allo sforzo meccanico applicato, in base all'effetto piezoelettrico diretto.



Fig. 4.9 - Accelerometro piezoelettrico PCB 352C65.

Sensibilità ($\pm 10\%$)	100 mV/g
Range di misurazione (valore di picco)	± 50 g
Intervallo di frequenza ($\pm 5\%$)	0.5 - 10000 Hz
Intervallo di frequenza ($\pm 10\%$)	0.3 - 12000 Hz
Intervallo di frequenza (± 3 dB)	0.2 - 20000 Hz
Tensione DC d'eccitazione	18 - 30 V
Corrente costante d'eccitazione	2 - 20 mA
Impedenza d'uscita	$\leq 300 \Omega$

Tab. 4.5 - Specifiche tecniche dell'accelerometro piezoelettrico PCB 352C65.



Fig. 4.10 - Condizionatore di segnale PCB 480C02.

Range di frequenza	0.05 Hz – 500 kHz
Guadagno di tensione ($\pm 2\%$)	1:1
Tensione DC d'eccitazione	25 – 29 V
Corrente costante d'eccitazione	2.0 – 3.2 mA
Offset DC	<30 mV

Tab. 4.6 - Specifiche tecniche del condizionatore di segnale PCB 480C02.

4.2.5 Sonda passiva di tensione YOKOGAWA 701943

La sonda passiva di tensione YOKOGAWA 701943 è connessa da una parte ai morsetti del campione fissato sullo shaker e, dall'altra, all'oscilloscopio digitale YOKOGAWA DL9140 (710310) in modo da poter visualizzare il segnale di tensione in uscita dal cantilever.



Fig. 4.11 - Sonda passiva di tensione YOKOGAWA 701943.

Larghezza di banda	Da DC a 500 MHz (-3dB)
Rapporto di attenuazione	10:1
Resistenza d'ingresso	10 M Ω
Tensione massima d'ingresso (valore di picco)	600 V
Lunghezza della sonda (coassiale)	1.5 m

Tab. 4.7 - Specifiche tecniche della sonda passiva di tensione YOKOGAWA 701943.



Fig. 4.12 - Campione fissato sullo shaker elettrodinamico, connessione della sonda passiva di tensione ai morsetti del campione e accelerometro piezoelettrico.

4.2.6 Oscilloscopio digitale YOKOGAWA DL9140 (710310)

L'oscilloscopio YOKOGAWA DL9140 (710310) è utilizzato per monitorare i segnali di tensione del sistema.

Utilizzando il canale 1 (CH1), è possibile visualizzare la tensione in uscita generata dal convertitore piezoelettrico. Questo segnale proviene dalla sonda passiva di tensione che è collegata direttamente ai morsetti elettrici della trave a sbalzo.

Utilizzando il canale 2 (CH2), invece, si può osservare la tensione relativa all'accelerazione misurata dall'accelerometro ed elaborata attraverso il condizionatore di segnale.



Fig. 4.13 - Oscilloscopio digitale YOKOGAWA DL9140 (710310).

Incertezza di misura	$\pm(1.5\% \text{ di } 8 \text{ divisioni} + \text{incertezza sull'offset DC})$
Incertezza sull'offset DC	da 2 mV/div a 50 mV/div: $\pm (1 \% \text{ valore impostato} + 0.2 \text{ mV})$ da 100 mV/div a 500 mV/div: $\pm (1 \% \text{ valore impostato} + 2 \text{ mV})$ da 1 V/div a 5 V/div: $\pm (1 \% \text{ valore impostato} + 20 \text{ mV})$
Frequenza di campionamento massima	5 GS/s
Larghezza di banda in frequenza	1 GHz
Impedenza d'ingresso	1 M Ω $\pm 1.0\%$ / 20 pF 50 Ω $\pm 1.5\%$

Tab. 4.8 - Specifiche tecniche dell'oscilloscopio digitale YOKOGAWA DL9140 (710310).

4.2.7 Misuratore digitale di impedenza GW Instek LCR 6300

Il misuratore digitale di impedenza GW Instek LCR 6300 viene impiegato per la misura dell'impedenza al variare della frequenza.

Nello specifico verrà utilizzato il modello $R_p - C_p$ parallelo e le misurazioni verranno effettuate per frequenze comprese tra i 100 Hz e i 300 kHz.



Fig. 4.14 - Misuratore digitale di impedenza GW Instek LCR – 6300.

Range di frequenza	10 Hz – 300 kHz
Precisione	± 0.01 % risoluzione a 4 cifre
Impedenza d'uscita	30 Ω , 50 Ω e 100 Ω
Tensione DC Bias	± 2.5 V (0.5 % + 0.005 V)

Tab. 4.9 - Specifiche tecniche del misuratore digitale di impedenza GW Instek LCR – 6300.

4.2.8 Forno G3 Ferrari mod. G10006

I trattamenti termici sul campione saranno eseguiti utilizzando il forno G3 Ferrari mod. G10006. Di seguito sono riassunte le specifiche tecniche del dispositivo:



Fig. 4.15 - Forno G3 Ferrari mod. G10006.

Temperatura	Termostato regolabile fino a 400 °C
Piatto d'appoggio	Pietra refrattaria
Dimensioni piatto d'appoggio	31 cm
Timer	5 minuti (seguiti da segnale acustico)
Metodo di riscaldamento	Doppia resistenza in acciaio corazzato
Alimentazione	AC 230 V - 50 Hz
Dimensioni	33.5 x 20 x 35 cm
Potenza	1200 W

Tab. 4.10 - Specifiche tecniche forno G3 Ferrari mod. G10006.

4.2.9 Termocoppia di tipo K

Nel contesto della caratterizzazione termica del forno G3 Ferrari, un elemento cruciale risulta essere la termocoppia di tipo K, utilizzata per monitorare la temperatura all'interno del forno.

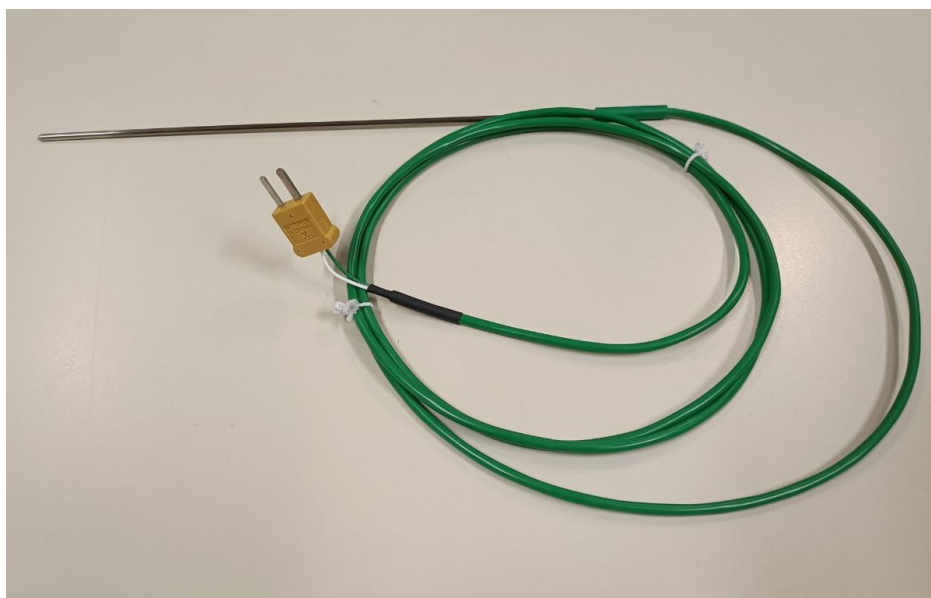


Fig. 4.16 - Termocoppia di tipo K.

Tipo di termocoppia	Tipo K
Intervallo di misurazione della temperatura	-50°C – 1200°C
Precisione	Da 0.5 °C a 5.0 °C tipico
Tempo di risposta	2.1 s
Lunghezza sonda	250 mm
Diametro sonda	3 mm
Materiale corpo sonda	Inconel 600, acciaio inox
Materiale isolante/guaina	Isolamento cavo in PVC, isolamento minerale
Tipo di terminazione	Cavo
Conformità/certificazioni	IEC 584

Tab. 4.11 - Specifiche tecniche Termocoppia di tipo K.

4.2.10 Multimetro digitale Fluke 87 V

Insieme alla termocoppia di tipo K, per il monitoraggio della temperatura all'interno del forno G3 Ferrari, si utilizzerà il multimetro digitale Fluke 87 V.



Fig. 4.17 - Multimetro digitale Fluke 87 V.

Tensione DC	Tensione massima	1000 V
	Precisione	$\pm (0.05 \% + 1)$
	Risoluzione massima	10 μV
Tensione AC	Tensione massima	1000 V
	Precisione	$\pm (0.7 \% + 2)$
	Risoluzione massima	0.1 mV
	Ampiezza di banda	20 kHz con filtro passa-basso; 3db 1kHz
Corrente DC	Valore massimo in ampere	10 A (20 A per al massimo 30 secondi)
	Precisione in corrente	$\pm (0.2 \% + 2)$
	Risoluzione massima	0.01 μA

Corrente AC	Valore massimo in ampere	10 A (20 A per al massimo 30 secondi)
	Precisione in ampere	$\pm(1.0 \% + 2)$
	Risoluzione massima	0.1 μ A
Resistenza	Resistenza massima	50 M Ω
	Precisione	$\pm (0.2 \% + 1)$
	Risoluzione massima	0.1 Ω
Capacità	Capacità massima	9.999 μ F
	Precisione	$\pm(1\% + 2)$
	Risoluzione massima	0.01 nF
Frequenza	Frequenza massima	200 kHz
	Precisione	$\pm(0.005 \% + 1)$
	Risoluzione massima	0.01 Hz
Duty Cycle	Duty Cycle massimo	99.90 %
	Precisione	$\pm (0.2 \% \text{ per kHz} + 0.1\%)$
	Risoluzione massima	0.10 %
Conduttanza	Conduttanza massima	60.00 nS
	Precisione	$\pm(1 \% + 10)$
	Risoluzione massima	0.01 nS
Diodo	Gamma	3 V
	Risoluzione	1 mV
	Precisione	$\pm(2 \% + 1)$
Temperatura	Risoluzione	0.1 $^{\circ}$ C
	Precisione ¹	1 % + 10

¹Non include l'errore derivante dalla sonda della termocoppia

Tab. 4.12 - Specifiche tecniche del multimetro digitale Fluke 87 V.

Capitolo 5

Attività sperimentale in laboratorio

5.1 Caratterizzazione preliminare del forno

Per il trattamento termico del campione si è utilizzato un forno commerciale da cucina, specificamente progettato per la preparazione di pizze.

Questo forno, sebbene non destinato a trattamenti termici specifici, è stato il punto di partenza di queste analisi. Tuttavia, prima di procedere con le sperimentazioni, è stato importante comprendere le sue caratteristiche. Per questo motivo sono state condotte delle prove preliminari volte a caratterizzare il funzionamento del forno.

Attraverso l'impiego di una termocoppia di tipo K, opportunamente posizionata all'interno delle aperture del forno, si è proceduto al monitoraggio dell'andamento della temperatura in relazione alle diverse impostazioni della manopola del termostato.



Fig. 5.1 - Posizionamento del sensore di temperatura all'interno del forno per le prove di caratterizzazione preliminari. La sonda è fatta passare attraverso le aperture del forno, posizionata centralmente, a contatto con il piatto d'appoggio (in pietra refrattaria).

5.1.1 Forno con manopola del termostato in posizione 1

Il processo di acquisizione delle misurazioni è stato condotto in modo sistematico utilizzando la seguente procedura:

1. Preparazione del setup di misura: allestimento dell'ambiente sperimentale come in Figura 5.2, garantendo la corretta disposizione degli strumenti e delle apparecchiature necessarie per le misurazioni;
2. Attivazione del multimetro digitale;
3. Attivazione del forno: Il forno viene acceso e la manopola del termostato viene posizionata al in posizione 1, contemporaneamente è verificata l'accensione automatica del segnale luminoso che indica l'avvio del processo di riscaldamento;
4. Spegnimento del forno: Una volta che il segnale luminoso si è spento, indicando il raggiungimento della temperatura desiderata, la manopola del forno viene riportata alla posizione 0 e l'alimentazione viene interrotta;

5. Misurazioni di temperatura: Le misurazioni di temperatura sono state avviate immediatamente dopo l'accensione della luce del forno e sono proseguite costantemente fino a quando la temperatura rilevata è tornata al valore di temperatura ambiente. Questo intervallo temporale copre l'intero ciclo di riscaldamento e raffreddamento del forno, garantendo la raccolta di dati significativi per l'analisi sperimentale.

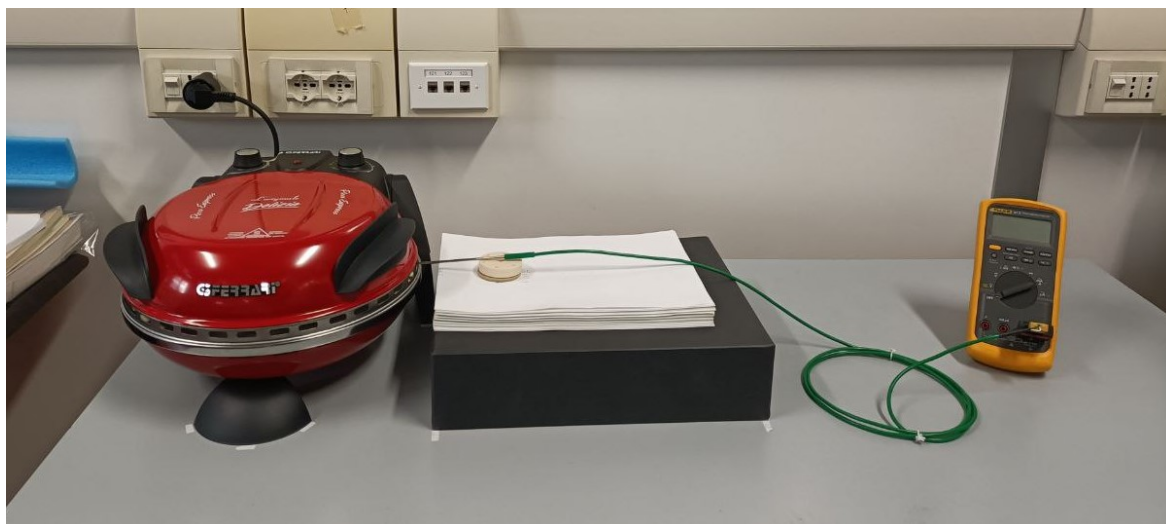


Fig. 5.2 - Setup di misura per le prove di caratterizzazione del forno. A sinistra è visibile il forno G3 Ferrari, nelle cui aperture è inserito il sensore di temperatura, mentre sulla destra si vede il multimetro digitale Fluke 87 V a cui è connessa la termocoppia K per la misura di temperatura.

Nel corso dell'esperimento, le misurazioni di temperatura sono state condotte seguendo una procedura che prevedeva l'adozione di intervalli di misurazione variabili in base al tempo trascorso. Questo approccio mirava a caratterizzare in modo accurato e dettagliato il processo di riscaldamento e raffreddamento del forno. La Tabella 5.1 illustra la scansione temporale adottata per le misurazioni di temperatura durante l'esperimento:

Tempo trascorso (min)	Intervallo di misurazione (s)
0 - 10	Ogni 10 s
10 - 20	Ogni 20 s
20 - 30	Ogni 60 s
30 - termine prova	Ogni 120 s

Tab. 5.1 - Scansione temporale per le misurazioni di temperatura durante le prove con manopola del termostato in posizione 1.

I risultati di questo primo studio sono i seguenti:

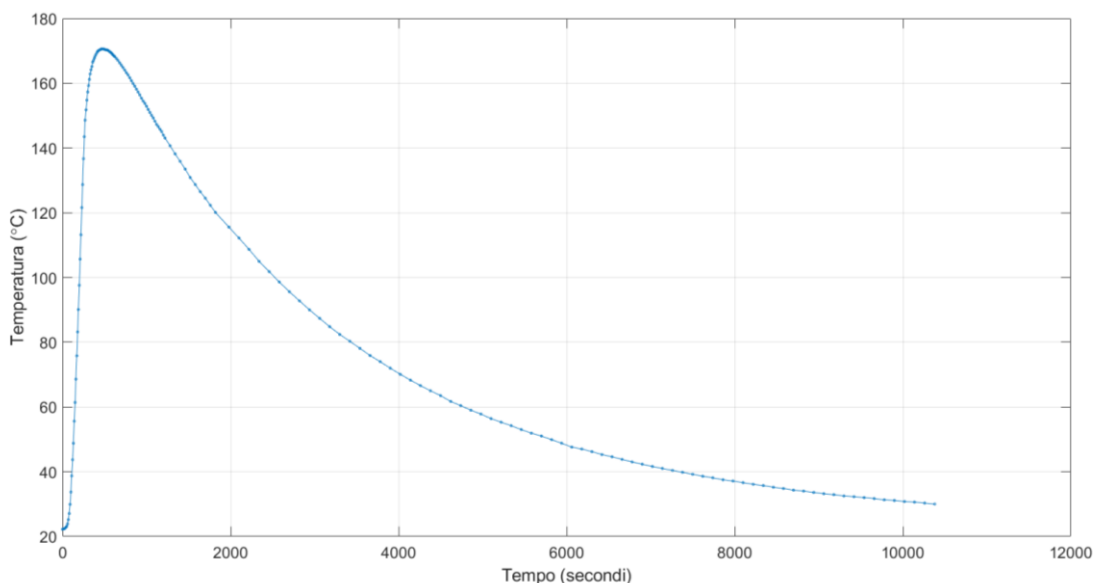


Fig. 5.3 - Andamento della temperatura nel forno con manopola del termostato in posizione 1: misura in posizione centrale con sonda di misura a contatto con il piatto d'appoggio (in pietra refrattaria).

In Figura 5.3 è rappresentato l'andamento della temperatura registrata durante la prova senza campione all'interno condotta nel forno: misura in posizione centrale con sonda di misura a contatto con il piatto d'appoggio (in pietra refrattaria).

Nel grafico, si osserva una fase iniziale di rapida crescita della temperatura, con il valore che raggiunge un picco di circa 170 °C, seguito da una fase di raffreddamento più lento che porta alla temperatura ambiente.

5.1.2 Forno con manopola del termostato in posizione 1,5

Nel prosieguo della caratterizzazione del comportamento termico del forno, sono state condotte ulteriori prove con la posizione della manopola del termostato impostata a 1,5. Al fine di garantire una riproducibilità accurata delle impostazioni, è stato posizionato un segnale adesivo sulla manopola del termostato per indicare la posizione intermedia tra 1 e 2, che è stata adottata come punto di riferimento per tutte le misurazioni successive.

Le misure sono state eseguite in modo sistematico, seguendo la stessa procedura utilizzata per la caratterizzazione del forno con manopola del termostato in posizione 1. Tuttavia, in questo

caso, la scansione dei tempi di misurazione della temperatura è stata modificata per adattarsi alla nuova configurazione (si veda la Tabella 5.2).

Tempo trascorso (min)	Intervallo di misurazione (s)
0 - 15	Ogni 10 s
15 - 25	Ogni 20 s
25 - 40	Ogni 60 s
40 - termine prova	Ogni 120 s

Tab. 5.2 - Scansione temporale per le misurazioni di temperatura durante le prove con manopola del termostato in posizione 1,5.

Le misure sono riportate in Figura 5.4.

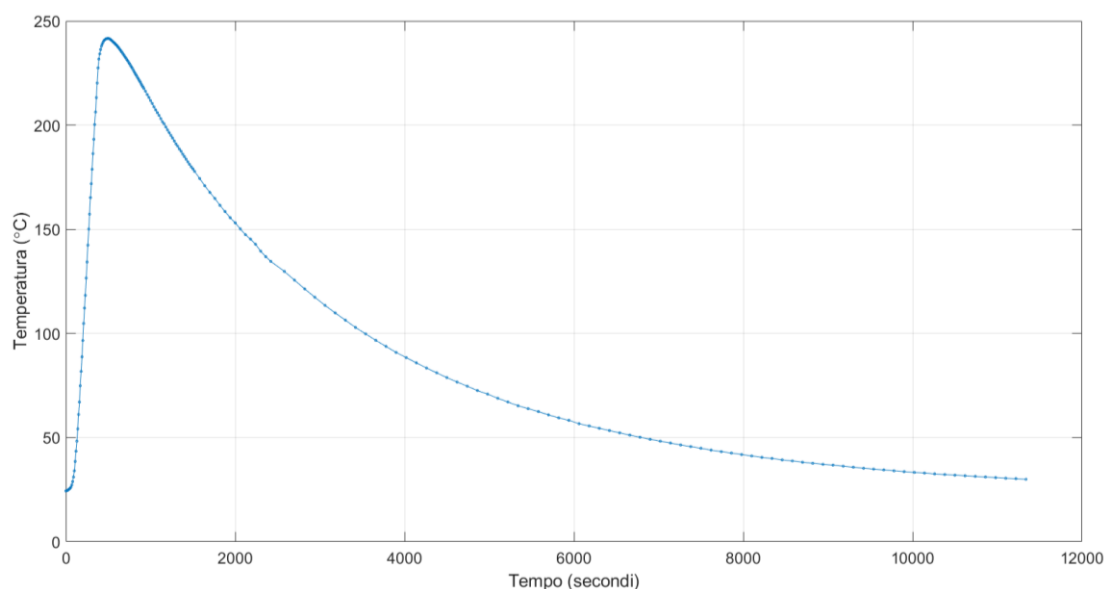


Fig. 5.4 - Andamento della temperatura nel forno con manopola del termostato in posizione 1,5: misura in posizione centrale, con sonda di misura a contatto con il piatto d'appoggio.

Come mostrato nel grafico, l'andamento della temperatura nel forno presenta un comportamento analogo a quello già osservato con la manopola del termostato in posizione 1, ma ora con un picco più alto. La fase di crescita anche in questo caso è stata molto rapida, il forno, infatti, ha impiegato circa 8 minuti per portarsi al valore di picco che si attesta attorno ai 240 °C.

5.2 Prove sul convertitore

È analizzata la tensione in uscita generata dal convertitore piezoelettrico ovvero la risposta in tensione del campione quando il sistema viene sottoposto a una variazione di frequenza e ampiezza delle vibrazioni.

Si procederà al confronto dell'analisi della tensione generata con la funzione parametrica (3.66) precedentemente derivata nel capitolo 3. Dal fit dei dati sperimentali sarà possibile ricavare i parametri m_1, m_2, m_3 e m_4 e quindi si calcolerà il parametro piezoelettrico d_{31} .

Lo studio sarà effettuato in tre situazioni del campione: senza trattamenti termici, dopo un primo trattamento termico e dopo un secondo trattamento termico effettuato a temperatura più alta del precedente.

5.3 Descrizione configurazione strumenti

Il generatore di funzioni Agilent 33120A permette di generare il segnale di tensione che nel caso di studio è un'onda sinusoidale regolabile sia in ampiezza che in frequenza. Questo segnale viene poi amplificato dall'amplificatore SmartAmp POWER AMPLIFIER 2100E21-100 che è collegato all'uscita del generatore di funzioni e che permette di produrre un segnale di corrente regolato in ampiezza ed in frequenza.

Questo segnale viene poi trasformato dallo shaker elettrodinamico MODAL SHOP 2007E in vibrazione sinusoidale verticale sulla sua tavola sulla quale viene montata la struttura contenente il convertitore piezoelettrico (basato sul nitrato di alluminio) in configurazione di trave a sbalzo. L'incastro del campione (si veda la Figura 5.5) allo shaker elettrodinamico MODAL SHOP 2007E viene eseguito a 50 mm dalla punta della struttura.

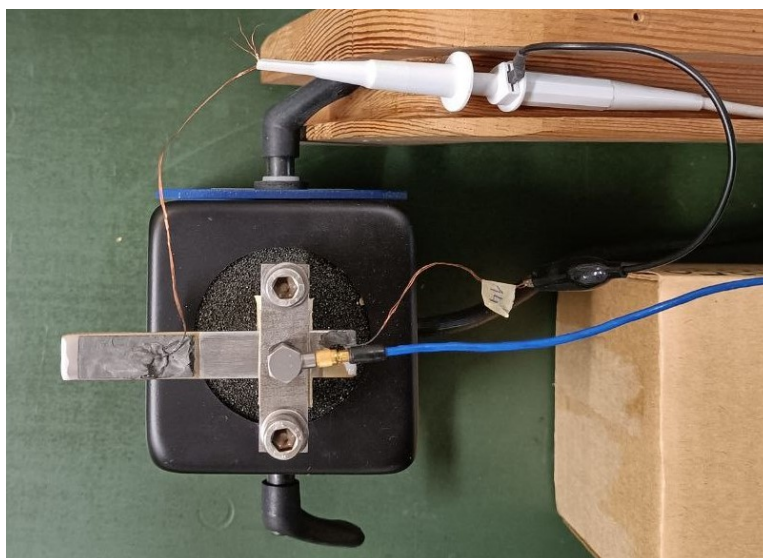


Fig. 5.5 - Vista dall'alto dell'incastro del campione allo shaker elettrodinamico MODAL SHOP 2007E, connessione della sonda passiva di tensione YOKOGAWA 701943 ai morsetti del campione e accelerometro piezoelettrico PCB 352C65 posizionato sulla parte vibrante della struttura.

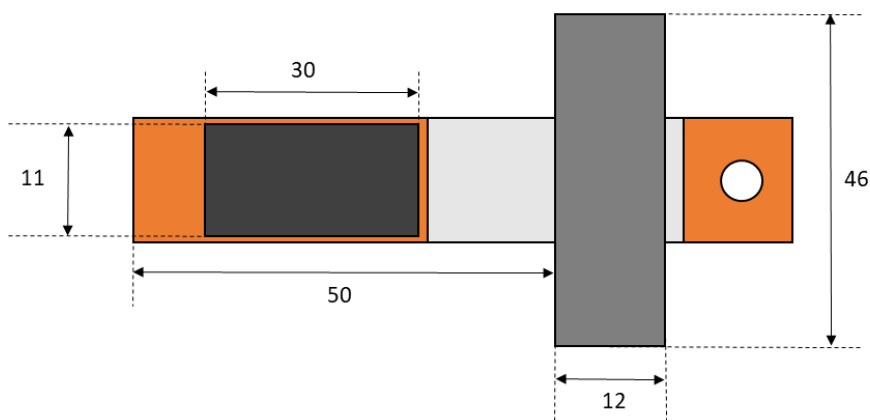


Fig. 5.6 – Rappresentazione (non in scala) dell'incastro del campione allo shaker elettrodinamico MODAL SHOP 2007E eseguito a 50 mm dalla punta della struttura.

Un accelerometro piezoelettrico PCB 352C65 è montato sulla parte vibrante dello shaker. Il segnale dell'accelerometro è condizionato tramite un condizionatore di segnale PCB 480C02, e quindi collegato al canale 2 (CH2) dell'oscilloscopio digitale YOKOGAWA DL9140 710310.

Al canale 1 (CH1) dell'oscilloscopio è collegata una sonda passiva di tensione YOKOGAWA 701943 a cui vengono connessi i morsetti elettrici del campione.

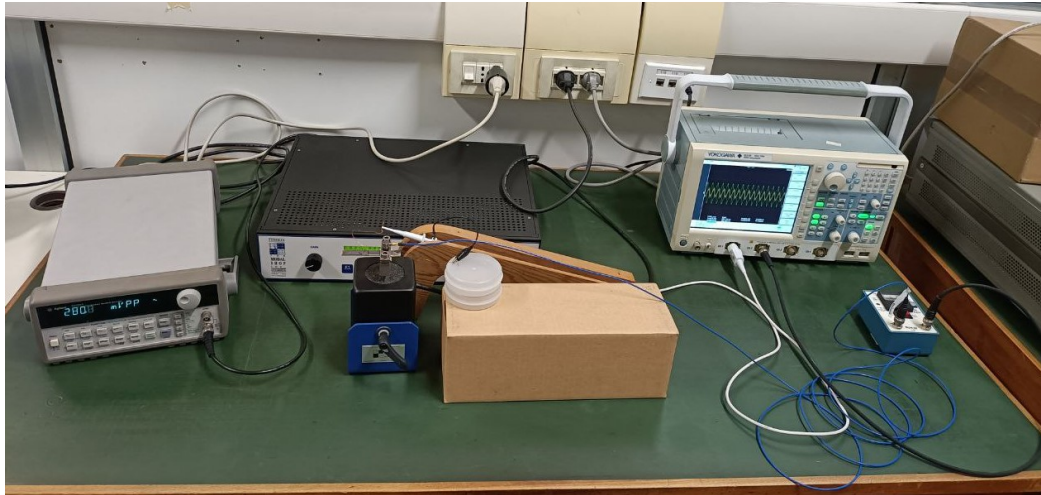


Fig. 5.7 - Set up usato per le misurazioni sul convertitore piezoelettrico in configurazione di trave a sbalzo. Da sinistra verso destra si ha: il generatore di funzioni Agilent 33120 A, l'amplificatore SmartAmp POWER AMPLIFIER 2100E21-100 e lo shaker elettrodinamico MODAL SHOP 2007E, su cui è montato il convertitore piezoelettrico e sulla cui estremità superiore è fissato l'accelerometro piezoelettrico PCB 352C65. Sulla destra è visibile l'oscilloscopio YOKOGAWA DL9140 (710310) al cui canale 1 è connessa la sonda passiva di tensione YOKOGAWA 701943 (collegata ai morsetti del campione) e al canale 2 è connesso il condizionatore di segnale PCB 480C02 (collegato con l'accelerometro piezoelettrico) visibile all'estrema destra.

Si è prestata particolare attenzione affinché il filo di rame dei collegamenti non entri in contatto con altre parti metalliche in modo da evitare la formazione di loop indesiderati che potrebbero essere fonte di disturbo per il sistema.

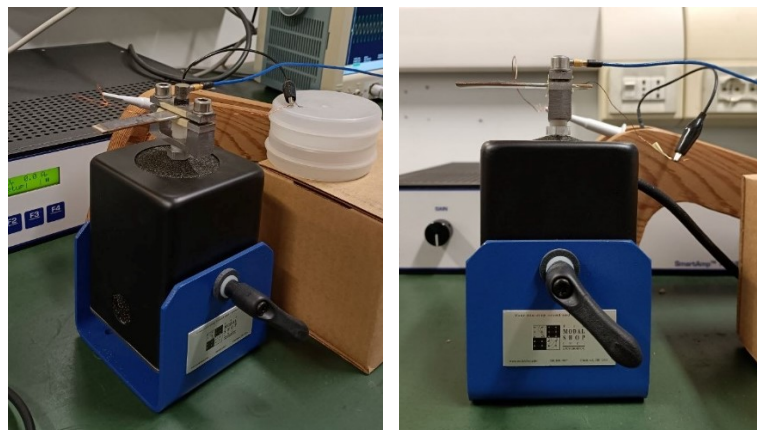


Fig. 5.8 - Particolare dello Shaker elettrodinamico MODAL SHOP 2007E su cui è montato il campione. Sulla sinistra si noti il set up utilizzato durante le prove, per mantenere i fili di rame del collegamento elettrico lontani da altre parti metalliche.

5.4 Descrizione svolgimento della prova

Nelle misurazioni, per tutte le frequenze, si è applicata alla struttura un'accelerazione di valore efficace pari a 1 g (con $g = 9.81 \text{ m/s}^2$), corrispondente, secondo le specifiche tecniche dell'accelerometro piezoelettrico PCB 352C65 descritte nel paragrafo 4.2.4, ad una tensione efficace di 100 mV.

Pertanto, al variare della frequenza del segnale d'alimentazione, si fa in modo di mantenere fisso a 100 mV il valore efficace della tensione, il cui monitoraggio avviene tramite il canale 2 (CH2) dell'oscilloscopio YOKOGAWA DL9140 (710310). Per fare in modo che tale valore rimanga costante si è andati inizialmente a modificare il guadagno dell'amplificatore SmartAmp POWER AMPLIFIER 2100E21-100 e successivamente andando a regolare di volta in volta l'ampiezza del segnale in uscita dal generatore di funzioni Agilent 33120.

5.5 Prove preliminari sul convertitore

Prima di procedere con prove in temperatura del campione, sono state eseguite due sessioni di prove preliminari sul sistema, entrambe condotte senza alcun trattamento termico applicato al campione.

5.5.1 Misurazioni con misuratore digitale di impedenza LCR nella prima prova preliminare

Durante le misurazioni, è stato adottato il modello R_p - C_p parallelo, il quale offre una rappresentazione adeguata del comportamento dell'impedenza del sistema in esame.

Per la caratterizzazione iniziale della struttura, l'attenzione è stata focalizzata principalmente sulla valutazione di un parametro fondamentale: la capacità.

La misurazione è stata condotta su una gamma di frequenze compresa tra 100 Hz e 300 kHz, al fine di esplorare in dettaglio le caratteristiche elettriche del sistema.



Fig. 5.9 - Setup di misura con misuratore digitale LCR.

Frequenza [kHz]	C_p [nF]	R_p [MΩ]
0,1	1,24	8,40
0,2	1,17	5,40
0,5	1,11	3,00
1	1,07	1,92
2	1,04	1,23
5	1,02	0,64
10	0,99	0,28
20	0,984	0,167
50	0,962	0,051
100	0,934	0,019
200	0,894	0,0069
300	0,860	0,0041

Tab. 5.3 - Valori R_p – C_p misurati nella prima prova preliminare effettuata sul campione.

I valori misurati della capacità diminuiscono all'aumentare della frequenza, risultato che è in linea con quanto riportato in letteratura [15]. Un'analisi sul valore di capacità è presentata nel paragrafo successivo.

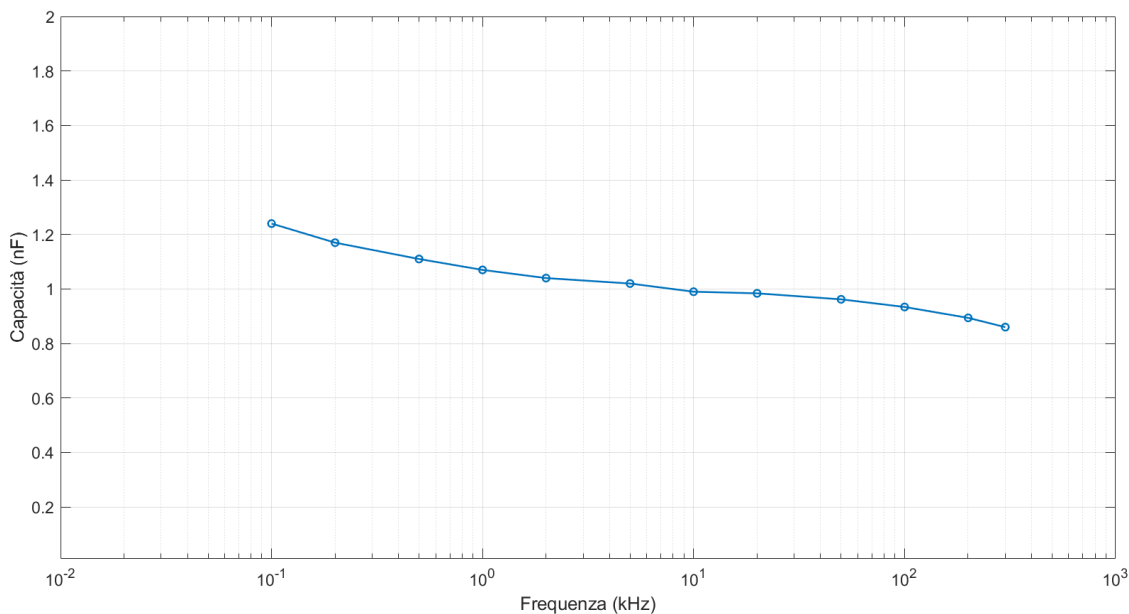


Fig. 5.10 - Andamento della capacità misurata nella prima prova preliminare tramite misuratore digitale LCR nel range di frequenza 100 Hz - 300 kHz.

5.5.2 Verifica stima del valore di capacità

Per come è realizzato, il campione, si presta ad essere interpretato con il semplice modello di condensatore a piastre parallele, si veda Figura 4.4; presenta infatti:

- Substrato di alluminio che costituisce l'elettrodo inferiore
- Deposito di nitruro di alluminio che costituisce il materiale dielettrico
- Pasta conduttiva che realizza l'elettrodo superiore.

Per questo in questo paragrafo si mostrerà il buon accordo tra i risultati sperimentali e il modello teorico di un condensatore piano a piastre parallele.

Il valore di capacità verrà stimato sulla base della relazione seguente:

$$C_p = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{33r} A}{h_p} \quad (5.1)$$

Dove:

- $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} [F/m]$ rappresenta la permittività del vuoto;
- $\varepsilon_{33r} = 9.5$ è la permittività relativa del nitrato di alluminio, valore medio tratto dalla letteratura [15];
- $h_p = 28.7 [\mu m]$ è la distanza tra le piastre, ovvero lo spessore stimato per il film di nitrato di alluminio.
- $A = 30 \cdot 11 = 330 [mm^2]$ è l'area della piastra, misurata direttamente dal campione con un calibro.

Poiché lo spessore del deposito di materiale piezoelettrico non è stato misurato direttamente per il campione in esame, si è ipotizzato un valore di $h_p = 28.7 [\mu m]$, pari allo spessore del film di AlN misurato tramite profilometro per un altro deposito di nitrato di alluminio realizzato nelle stesse condizioni [15].

Sostituendo i valori sopra riportati nella (5.1) si ottiene un valore stimato per la capacità pari a:

$$C_p = 0.967 [nF]$$

Si può osservare che tale valore è in buon accordo con i risultati sperimentali.

5.5.3 Caratteristica della tensione in funzione della frequenza nella prima prova preliminare

Il campione è stato opportunamente fissato allo shaker elettrodinamico MODAL SHOP 2007E.

Le misure sono fatte spaziando tra valori di frequenza che vanno da 100 Hz a 800 Hz con passo più ampio quando si è più lontani dalle condizioni di picco e misure più ravvicinate via via che ci si avvicina al picco (attorno ai 500 Hz) al fine di ottenere una mappatura accurata del comportamento del sistema in prossimità della risonanza.

Frequenza (Hz)	Tensione in uscita rms (mV)	Tensione accel. rms (mV)
100	24	100.0
150	27	100.0
200	31	100.0
250	37	100.0
300	39	100.0
350	43	100.0
400	60	100.0
450	102	100.0
500	412	100.0
505	599	100.0
510	1007	100.0
512	1190	100.0
513	1206	100.0
514	1187	100.0
515	1127	100.0
520	794	100.0
525	550	100.0
530	406	100.0
540	257	100.0
550	186	100.0
600	75	100.0
650	46	100.0
700	35	100.0
800	21	100.0

Tab. 5.4 - Valori efficaci di tensione in uscita al variare della frequenza nella prima prova preliminare.

5.5.4 Scrittura del codice per il fit dei dati sperimentali

Il fit dei dati sperimentali è stato effettuato utilizzando il software MATLAB. Il codice per l'analisi dei dati sperimentali è stato scritto ed è riportato in dettaglio in Appendice A.

Questo codice si basa sul modello matematico descritto nel capitolo 3 e di cui si ricorda la formulazione:

$$V_{RMS} = m_1 + \frac{m_2}{\sqrt{(\omega^2 - m_3^2)^2 + (\omega m_4)^2}}$$

5.5.5 Stima del parametro piezoelettrico nella prima prova preliminare

I dati sperimentali ottenuti analizzando la tensione in uscita generata dal convertitore piezoelettrico al variare della frequenza, sono stati elaborati usando il codice MATLAB, come discusso nel paragrafo precedente.

Si è ottenuto l'andamento della curva in Figura 5.11 e i valori dei parametri del modello riportati in Tabella 5.5.

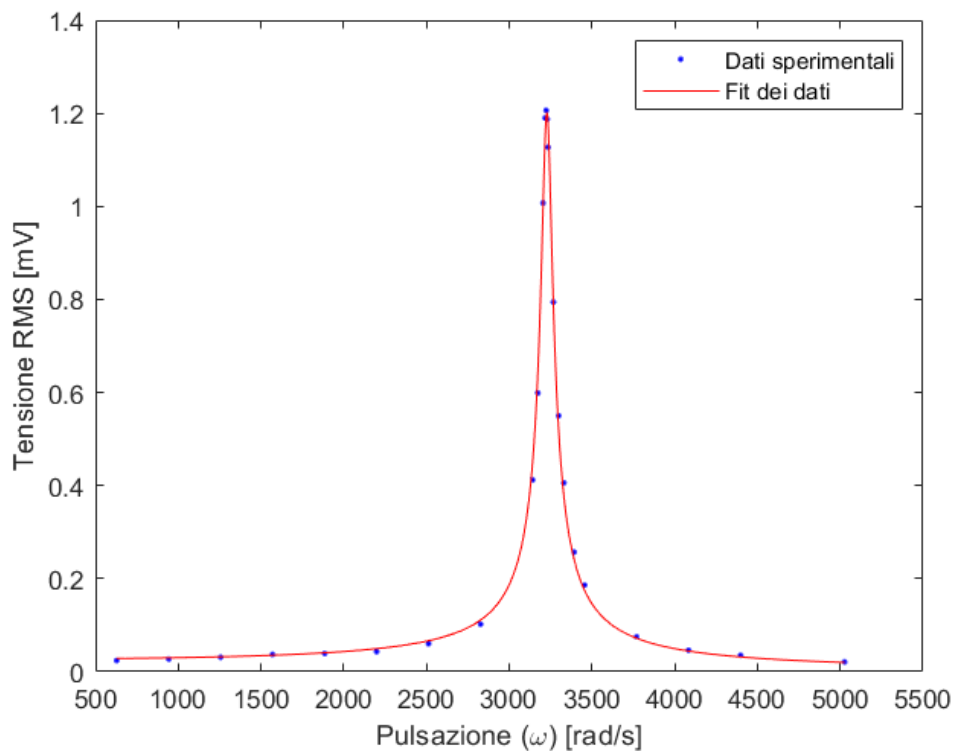


Fig. 5.11 - Dati sperimentali e fit dei dati della tensione in uscita dal convertitore al variare della frequenza nella prima prova preliminare.

Valori dei parametri del modello
$m_1 = 0.001968$
$m_2 = 2.657 \cdot 10^5$
$m_3 = 3228$
$m_4 = 68.59$

Tab. 5.5 - Risultati ottenuti per i parametri del modello nella prima prova preliminare, attraverso il programma di calcolo MATLAB.

Per la stima del parametro piezoelettrico si è seguita la procedura indicata nel capitolo 3:

A partire dal valore del parametro m_2 , esprimibile come $m_2 = E_{RMS} 0.783 \sqrt{mL} \frac{\varphi_1^*}{C_p}$, si riesce a ricavare il valore di φ_1^* come in (3.71):

$$\varphi_1^* = \frac{m_2 C_p}{9.81 \cdot 0.783 \sqrt{mL}} = 697.53 \cdot 10^{-6}$$

In cui per C_p si è usato il valore di capacità misurato a 500 Hz, ovvero $C_{p_{500Hz}} = 1.11 [nF]$.

Sostituendo φ_1^* nella (3.73) si può ottenere valore assoluto del parametro piezoelettrico del nitrato di alluminio:

$$|d_{31}| = \frac{\varphi_1^*}{Y_p \frac{h_s}{2} b \left. \frac{d\Phi_1(x)}{dx} \right|_{x_1}^{x_2}} = 0.499 \cdot 10^{-12} [C/N]$$

Dove sono stati usati i valori riassunti in Tabella 5.6.

$E_{RMS} = 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$	valore di accelerazione
$x_1 = 16 \text{ [mm]}$ $x_2 = 46 \text{ [mm]}$	estremi della verniciatura
$L = 50 \text{ [mm]}$	lunghezza della trave a sbalzo
$mL = \rho bhL = 3.03 \cdot 10^{-3} \text{ [kg]}$	massa per unità di lunghezza della trave a sbalzo
$\rho = 2700 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	densità del substrato di alluminio
$b = 12 \text{ [mm]}$	larghezza del substrato di alluminio
$h_s = 1.87 \text{ [mm]}$	spessore della lamina di alluminio
$Y_p = 345 \text{ GPa [N/m}^2\text{]}$	modulo di Young del nitrato di alluminio a 25 °C [32]

Tab. 5.6 - Dati usati per il calcolo del parametro piezoelettrico del nitrato di alluminio.

5.5.6 Misurazioni con misuratore digitale di impedenza LCR nella seconda prova preliminare

In questo paragrafo, vengono presentati i risultati delle misurazioni effettuate con il ponte d'impedenza LCR durante la seconda prova preliminare effettuata sul campione. Le misurazioni sono state condotte utilizzando lo stesso setup sperimentale e le stesse condizioni operative impiegate nella prima prova preliminare, descritte dettagliatamente nel capitolo precedente.

Le misurazioni sono state eseguite a distanza di circa un mese dalla prima prova preliminare, al fine di valutare eventuali variazioni nel comportamento dell'impedenza nel corso del tempo e, di conseguenza, valutare la stabilità nel tempo delle proprietà elettromeccaniche del campione stesso.

I risultati di tali misurazioni sono riportati nella Tabella 5.7, che mostra i valori dell'impedenza del campione in funzione della frequenza.

Frequenza [kHz]	C_p [nF]	R_p [M Ω]
0.1	1.19	9.84
0.2	1.13	6.37
0.5	1.08	3.63
1	1.05	2.33
2	1.03	1.49
5	1.01	0.715
10	0.985	0.363
20	0.975	0.162
50	0.952	0.045
100	0.921	0.0016
200	0.872	0.0056
300	0.828	0.0033

Tab. 5.7 - Valori R_p – C_p misurati nella seconda prova preliminare effettuata sul campione.

Come illustrato in Figura 5.12, si osserva che, a distanza di un mese l'andamento della capacità al variare della frequenza rimane pressoché invariato nel tempo, confermando così la stabilità delle proprietà elettromeccaniche del campione.

Sebbene siano presenti alcune variazioni nei valori di capacità, queste risultano essere limitate.

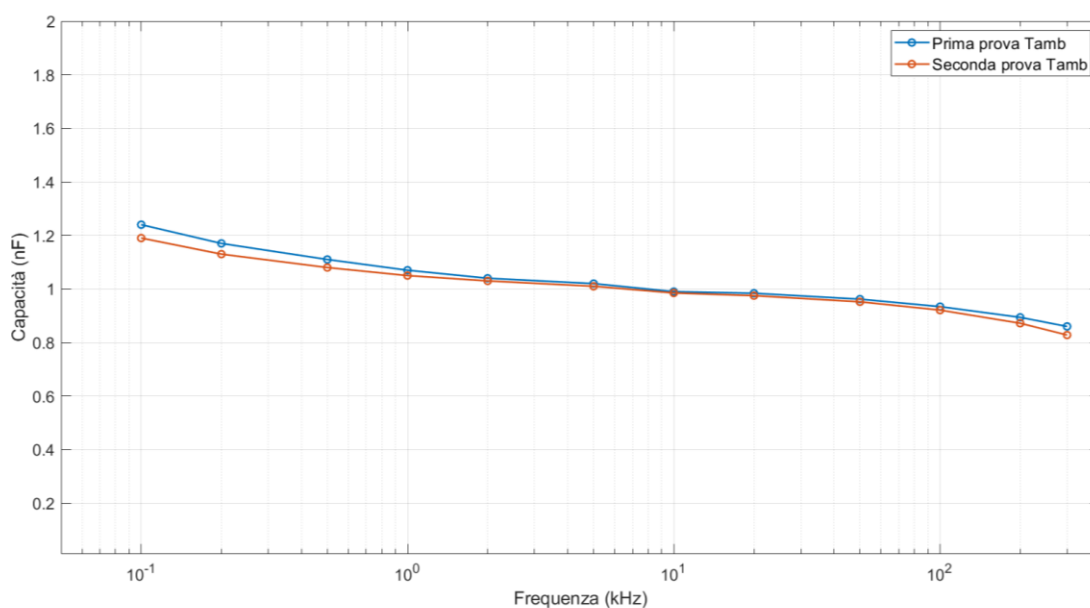


Fig. 5.12 - Confronto tra gli andamenti della capacità C_p al variare della frequenza nella prima e nella seconda prova preliminare.

5.5.7 Caratteristica della tensione in funzione della frequenza nella seconda prova preliminare

In questo paragrafo, esamineremo i risultati della caratteristica della tensione in funzione della frequenza ottenuti durante la seconda prova preliminare sul campione.

Le stesse impostazioni sperimentali e condizioni operative impiegate nella prima prova sono state mantenute costanti per garantire la coerenza nei confronti dei risultati precedenti.

Frequenza (Hz)	Tensione in uscita rms (mV)	Tensione accel. rms (mV)
100	24	100.0
150	27	100.0
200	30	100.0
250	37	100.0
300	38	100.0
350	43	100.0
400	58	100.0
450	93	100.0
500	267	100.0
505	330	100.0
510	435	100.0
515	641	100.0
520	1180	100.0
522	1128	100.0
523	1074	100.0
524	1009	100.0
525	933	100.0
526	865	100.0
530	626	100.0
540	324	100.0
550	218	100.0
600	90	100.0
650	44	100.0
700	32	100.0
800	18	100.0

Tab. 5.8 - Valori efficaci di tensione in uscita al variare della frequenza nella seconda prova preliminare.

È interessante notare che il valore massimo di tensione in uscita è stato raggiunto a frequenze leggermente diverse rispetto a quanto ottenuto nella prova svolta il mese precedente. Questo fenomeno potrebbe essere attribuito a leggere variazioni nel montaggio del campione sullo shaker elettrodinamico.

5.5.8 Stima del parametro piezoelettrico nella seconda prova preliminare

Procederemo ora con l'analisi dei dati raccolti durante la seconda prova preliminare; In Figura 5.13 sono presentati i risultati ottenuti dal fit dei dati sperimentali di tensione in funzione della frequenza, realizzato tramite il software MATLAB.

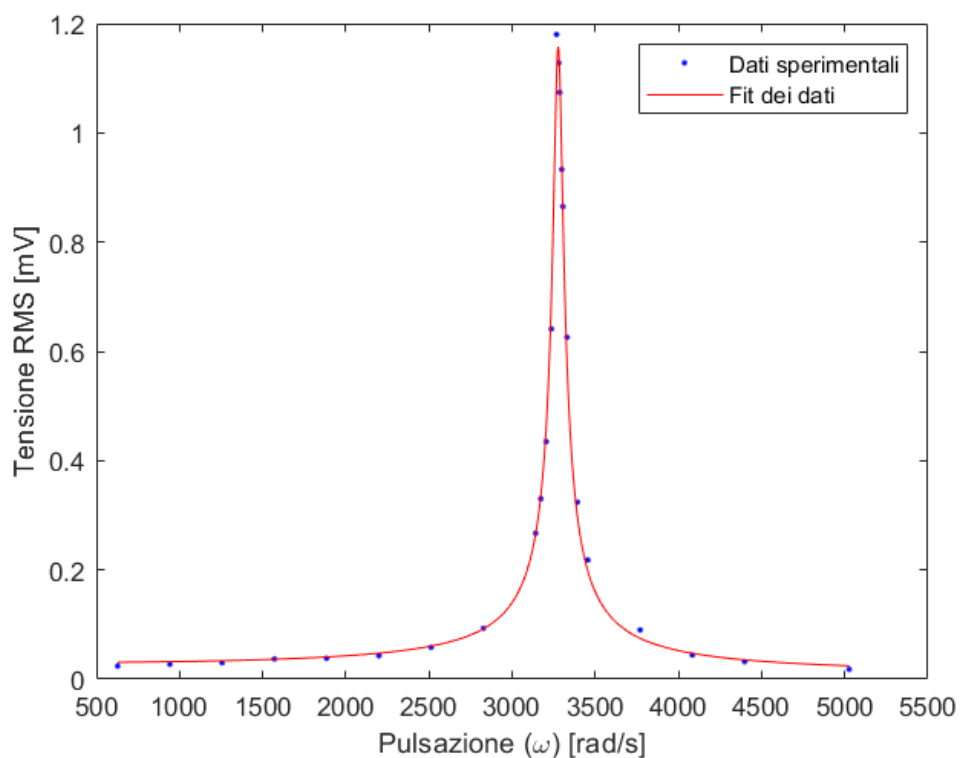


Fig. 5.13 - Dati sperimentali e fit dei dati della tensione in uscita dal convertitore al variare della frequenza nella seconda prova preliminare.

Sono stati ottenuti i seguenti valori dei parametri del modello:

Valori dei parametri del modello
$m_1 = 0.02652$
$m_2 = 2.487 \cdot 10^5$
$m_3 = 3279$
$m_4 = 66.51$

Tab. 5.9 - Risultati ottenuti per i parametri del modello nella seconda prova preliminare, attraverso il programma di calcolo MATLAB.

Utilizzando i parametri forniti dal modello implementato in MATLAB in Tabella 5.9, il valore di capacità misurato con il ponte LCR a 500 Hz, $C_{p_{500Hz}} = 1.08 [nF]$, e le grandezze riassunte nella Tabella 5.6 al paragrafo 5.5.5, si è trovato:

$$\varphi_1^* = \frac{m_2 C_p}{9.81 \cdot 0.783 \sqrt{mL}} = 635.25 \cdot 10^{-6}$$

Da cui il valore del parametro piezoelettrico del nitrato di alluminio è risultato rispettivamente pari a:

$$|d_{31}| = \frac{\varphi_1^*}{Y_p \frac{h_s}{2} b \left. \frac{d\Phi_1(x)}{dx} \right|_{x_1}^{x_2}} = 0.454 \cdot 10^{-12} [C/N]$$

Prova	Valore $d_{31} [pC/N]$
Prima preliminare	0.499
Seconda preliminare	0.454

Tab. 5.10 - Indicazione riassuntiva dei valori di $|d_{31}|$ ricavati rispettivamente nella prima e nella seconda prova preliminare.

5.6 Trattamenti termici

Il campione è stato sottoposto a due trattamenti termici:

- Il primo si è ottenuto posizionando la manopola del termostato in posizione 1;
- Il secondo si è ottenuto posizionando la manopola del termostato in posizione 1,5.

La procedura adottata è stata analoga a quella precedentemente discussa per le prove preliminari senza campione all'interno del forno.

Con entrambi i trattamenti termici, il campione è stato disposto in posizione centrale, appoggiato sul piatto in pietra refrattaria. Alla fine di ciascun trattamento termico, si è analizzato il comportamento del campione con la configurazione di trave a sbalzo.

5.6.1 Primo trattamento termico: riscaldamento con manopola del termostato in posizione 1

Per il trattamento termico il campione è stato posizionato al centro appoggiato sul piatto d'appoggio in pietra refrattaria. Attenzione è stata posta nel ripiegare i fili di rame al fine di mantenerli vicini al campione.

Dopo aver chiuso il forno, la manopola è stata girata in posizione 1 per avviare il trattamento termico con un valore di picco previsto attorno ai 170°C. La procedura adottata è stata analoga a quella precedentemente discussa per le prove preliminari fatte senza campione all'interno con manopola del termostato in posizione 1 (si veda paragrafo 5.1.1).



Fig. 5.14 - Disposizione del campione sul piatto d'appoggio del forno.

Sulla base delle misure di temperatura fatte nella prova preliminare analoga, il campione è stato mantenuto all'interno del forno per un tempo complessivo di circa due ore e quaranta minuti. Dopo tale tempo si è ritenuto che la temperatura fosse ormai tornata a valori prossimi a quelli ambiente.

5.6.2 Misurazioni con misuratore digitale di impedenza LCR dopo due ore dal primo trattamento termico

A distanza di due ore dal primo trattamento termico sono state effettuate le misurazioni sul campione utilizzando il ponte digitale di impedenza LCR al fine di valutare eventuali variazioni nei valori dell'impedenza del campione, in particolare della capacità, in seguito al trattamento termico.

I risultati ottenuti sono riportati in dettaglio nella Tabella 5.11 qui di seguito:

Frequenza [kHz]	C_p [nF]	R_p [MΩ]
0.1	1.21	7.9
0.2	1.14	5.29
0.5	1.08	3.09
1	1.05	2.03
2	1.02	1.33
5	1.00	0.738
10	0.985	0.441
20	0.976	0.231
50	0.962	0.078
100	0.944	0.029
200	0.924	0.010
300	0.904	0.006

Tab. 5.11 - Valori R_p – C_p misurati nella prova svolta dopo due ore dal primo trattamento termico effettuato sul campione.

Dall'analisi dei dati, emerge che i valori ottenuti dopo il trattamento termico non mostrano discostamenti significativi rispetto alle misurazioni effettuate prima del trattamento nelle prove preliminari sul campione.

5.6.3 Caratteristica della tensione in funzione della frequenza nella prova svolta dopo due ore dal primo trattamento termico

Per la misura del parametro piezoelettrico d_{31} , il campione è stato fissato con configurazione di trave a sbalzo (o cantilever), i valori efficaci di tensione al variare della frequenza sono:

Frequenza (Hz)	Tensione in uscita rms (mV)	Tensione accel. rms (mV)
100	23	100.0
150	25	100.0
200	29	100.0
250	36	100.0
300	37	100.0
350	42	100.0
400	58	100.0
450	93	100.0
500	246	100.0
505	297	100.0
510	376	100.0
515	500	100.0
520	777	100.0
522	994	100.0
524	1199	100.0
525	1263	100.0
526	1277	100.0
527	1246	100.0
528	1192	100.0
529	1122	100.0
530	1042	100.0
535	721	100.0
540	518	100.0
550	311	100.0
600	94	100.0
650	52	100.0
700	36	100.0
800	19	100.0

Tab. 5.12 - Valori efficaci di tensione in uscita al variare della frequenza nella prova svolta dopo due ore dal primo trattamento termico effettuato sul campione.

Dai risultati riportati in Tabella 5.12, si osserva un leggero aumento del valore massimo rispetto ai casi precedenti al trattamento termico delle prove preliminari. Inoltre il valore di picco si è verificato per un valore di frequenza leggermente diverso rispetto alle prove preliminari. In generale, non si evidenziano variazioni significative che possano alterare in modo sostanziale le proprietà del sistema.

5.6.4 Stima del parametro piezoelettrico nella prova svolta dopo due ore dal primo trattamento termico

Dall'integrazione dei dati sperimentali con il modello implementato in MATLAB (si veda Appendice A) si ricava la curva di fit, riportata in Figura 5.15.

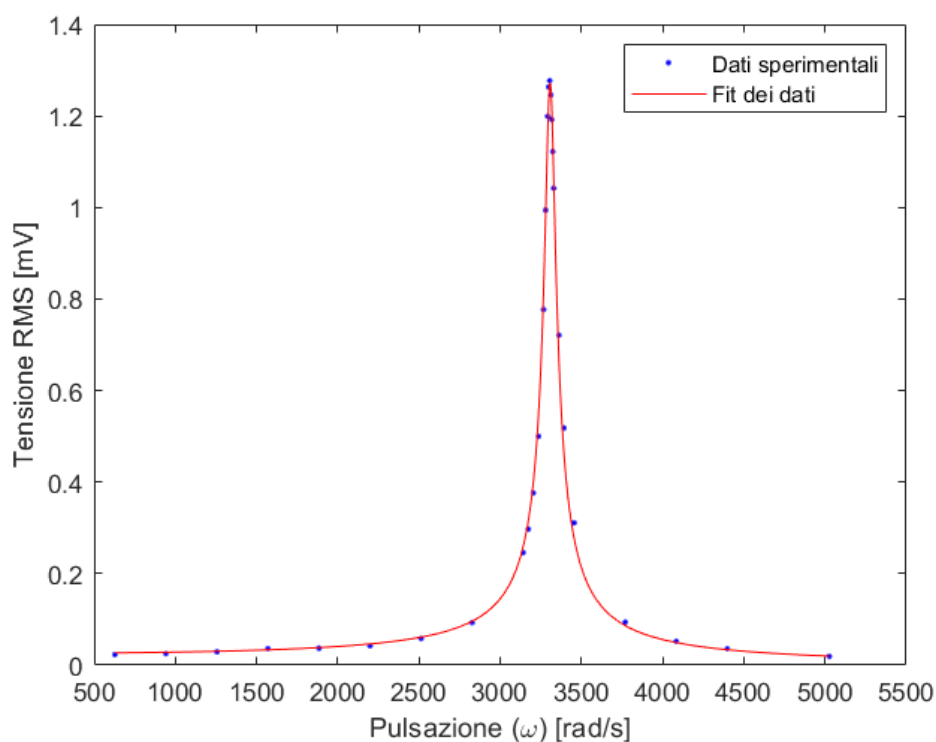


Fig. 5.15 - Dati sperimentali e fit dei dati della tensione in uscita dal convertitore al variare della frequenza nella prova svolta dopo due ore dal primo trattamento effettuato sul campione.

Si sono ottenuti i seguenti valori per i parametri del modello:

Valori dei parametri del modello
$m_1 = 4.832 \cdot 10^{-5}$
$m_2 = 2.834 \cdot 10^5$
$m_3 = 3308$
$m_4 = 67.35$

Tab. 5.13 - Risultati ottenuti per i parametri del modello nella prova svolta dopo due ore dal primo trattamento termico.

Utilizzando per C_p il valore misurato a 500 Hz, ovvero $C_{p_{500Hz}} = 1.08 [nF]$, e i valori riassunti in Tabella 5.6, si ricava:

$$\varphi_1^* = \frac{m_2 C_p}{9.81 \cdot 0.783 \sqrt{mL}} = 723.89 \cdot 10^{-6}$$

Da cui si può ottenere la stima del parametro piezoelettrico del nitruro di alluminio:

$$|d_{31}| = \frac{\varphi_1^*}{Y_p \frac{h_s}{2} b \left. \frac{d\Phi_1(x)}{dx} \right|_{x_1}^{x_2}} = 0.518 \cdot 10^{-12} [C/N]$$

5.6.5 Misurazioni con misuratore digitale di impedenza LCR dopo sette giorni dal primo trattamento termico

Dopo sette giorni dal primo trattamento termico, sono stati ripetuti i test utilizzando il ponte LCR per valutare eventuali variazioni nel comportamento dell'impedenza del campione nel tempo; Se ne riportano i risultati in Tabella 5.14.

Frequenza [kHz]	C_p [nF]	R_p [M Ω]
0.1	1.20	9.10
0.2	1.15	5.94
0.5	1.09	3.33
1	1.06	2.13
2	1.03	1.35
5	1.01	0.692
10	0.987	0.352
20	0.979	0.191
50	0.960	0.063
100	0.938	0.024
200	0.915	0.0086
300	0.892	0.0047

Tab. 5.14 - Valori $R_p - C_p$ misurati nella prova svolta dopo sette giorni dal primo trattamento termico effettuato sul campione.

Come evidenziato dal confronto grafico in Figura 5.16 tra l'andamento della capacità nella prova eseguita dopo due ore dal trattamento termico e in quella eseguita dopo sette giorni, i due andamenti sono perfettamente sovrapponibili, con variazioni trascurabili tra le due prove. Questo conferma che, anche dopo sette giorni, il valore di capacità è rimasto pressoché invariato, suggerendo una stabilità nel tempo del campione.

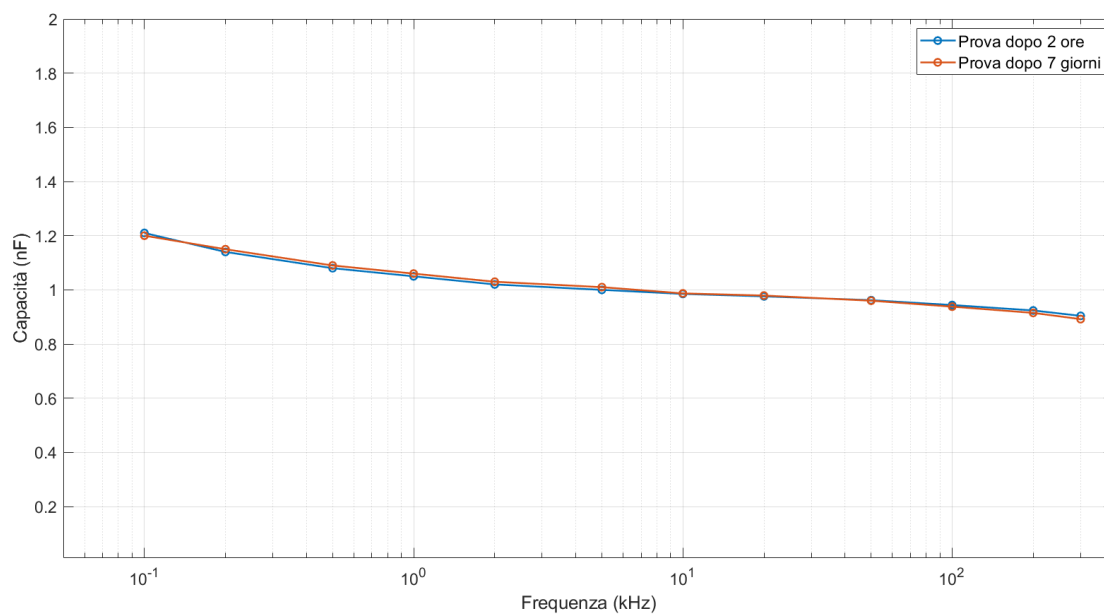


Fig. 5.16 - Confronto degli andamenti di capacità C_p al variare della frequenza rispettivamente dopo due ore dal trattamento termico e dopo sette giorni dal primo trattamento termico effettuato sul campione.

5.6.6 Caratteristica della tensione in funzione della frequenza nella prova svolta dopo sette giorni dal primo trattamento termico

Dopo sette giorni dal primo trattamento termico, si è condotta l'analisi con la configurazione cantilever.

Dai risultati ottenuti, riportati in Tabella 5.15, emerge che non vi sono state variazioni significative nella tensione in funzione della frequenza rispetto alla prova precedente.

In particolare, il valore massimo di tensione registrato, pari a 1.294 V, continua ad essere coerente con quello precedentemente osservato, mostrando solo lievi aumenti rispetto alle prove effettuate prima del trattamento termico. Ciò suggerisce una buona stabilità delle prestazioni del campione nel tempo.

Frequenza (Hz)	Tensione in uscita rms (mV)	Tensione accel. rms (mV)
100	24	100.0
150	27	100.0
200	31	100.0
250	38	100.0
300	41	100.0
350	44	100.0
400	62	100.0
450	102	100.0
500	320	100.0
505	412	100.0
510	584	100.0
515	995	100.0
516	1139	100.0
517	1240	100.0
518	1292	100.0
519	1294	100.0
520	1248	100.0
522	1146	100.0
525	931	100.0
530	652	100.0
535	476	100.0
540	367	100.0
550	246	100.0
600	87	100.0
650	51	100.0
700	37	100.0
800	20	100.0

Tab. 5.15 - Valori efficaci di tensione in uscita al variare della frequenza nella prova dopo sette giorni dal primo trattamento termico effettuato sul campione.

5.6.7 Stima del parametro piezoelettrico nella prova svolta dopo sette giorni dal primo trattamento termico

L'analisi computazionale dei dati sperimentali, mostrati nel paragrafo precedente, ha fornito i seguenti risultati, visibili in Figura 5.17, dove è mostrato l'andamento della curva che meglio si adatta alle misure di tensione effettuate.

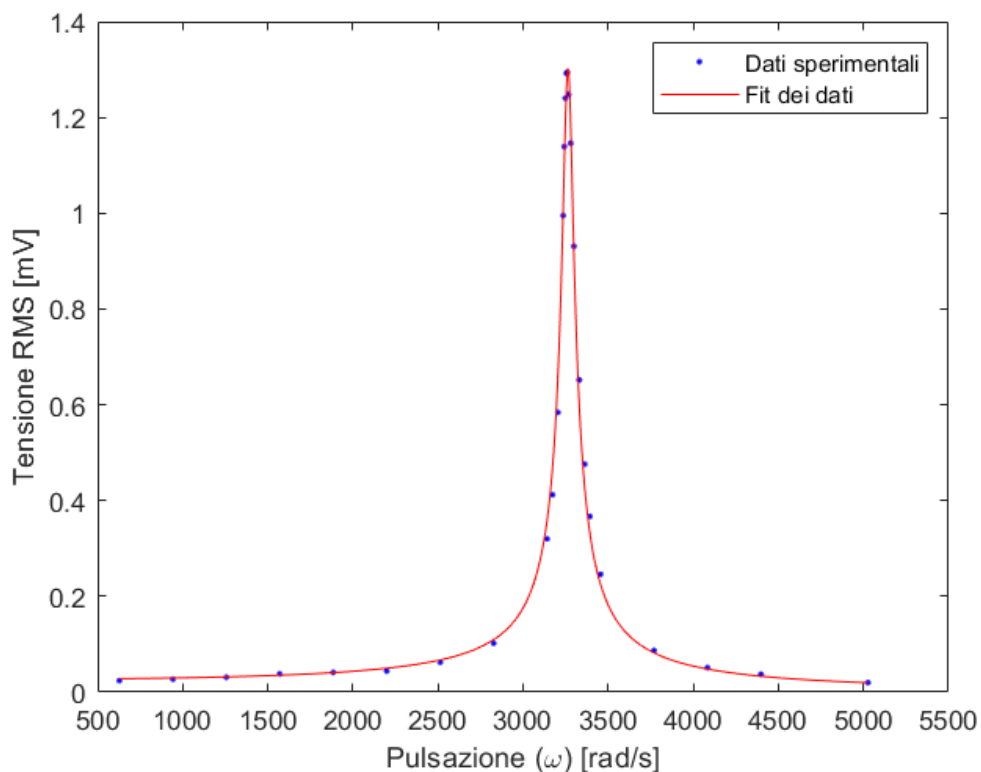


Fig. 5.17 - Dati sperimentali e fit dei dati della tensione in uscita dal convertitore al variare della frequenza nella prova svolta dopo sette giorni dal primo trattamento termico effettuato sul campione.

Nella Tabella 5.16 sono riportati i valori dei parametri che rappresentano il miglior adattamento ai dati sperimentali.

Valori dei parametri del modello
$m_1 = 0.02144$
$m_2 = 2.943 \cdot 10^5$
$m_3 = 3264$
$m_4 = 69.16$

Tab. 5.16 - Risultati ottenuti per i parametri del modello nella prova svolta dopo sette giorni dal primo trattamento termico.

Considerando i valori ottenuti per i parametri, le grandezze riassunte nella Tabella 5.6 e il valore di capacità misurato a 500 Hz, rispettivamente pari a $C_{p_{500\text{ Hz}}} = 1.09 [nF]$, si ottiene:

$$\varphi_1^* = \frac{m_2 C_p}{9.81 \cdot 0.783 \sqrt{mL}} = 758.69 \cdot 10^{-6}$$

Da cui:

$$|d_{31}| = \frac{\varphi_1^*}{Y_p \frac{h_s}{2} b \left. \frac{d\Phi_1(x)}{dx} \right|_{x_1}^{x_2}} = 0.543 \cdot 10^{-12} [C/N]$$

Prova	Valore $ d_{31} [pC/N]$
Dopo 2 ore	0.518
Dopo 7 giorni	0.543

Tab. 5.17 - Indicazione riassuntiva dei valori di $|d_{31}|$ ricavati rispettivamente nella prova dopo due ore e nella prova dopo sette giorni dal primo trattamento termico effettuato sul campione.

5.6.8 Secondo trattamento termico: riscaldamento manopola del termostato in posizione 1,5

Dopo aver appurato l'affidabilità del campione nella prova con temperatura massima attorno a 170 °C, si è deciso di procedere con un trattamento termico supplementare, esponendo il campione a temperature più elevate.

Anche questa volta il campione è stato posizionato appoggiato al centro sul piatto d'appoggio in pietra refrattaria e i fili di rame sono stati accuratamente disposti vicini al campione. Successivamente, il forno è stato chiuso e la temperatura è stata regolata girando la manopola del termostato in posizione 1,5, per raggiungere un valore massimo di circa 240 °C.

La procedura e le tempistiche di misurazione della temperatura sono rimaste invariate rispetto alla caratterizzazione del forno senza campione all'interno, con manopola del termostato in posizione 1,5 (si veda paragrafo 5.1.2).

L'intero ciclo del trattamento termico del campione ha avuto una durata approssimativa di tre ore. Dopo tale tempo si è ritenuto che ormai la temperatura fosse tornata a valori prossimi a quelli ambiente e si è aperto il forno.

5.6.9 Misurazioni con misuratore digitale di impedenza LCR dopo cinque giorni dal secondo trattamento termico

Dopo cinque giorni dal secondo trattamento termico, sono state eseguite le misurazioni utilizzando il ponte LCR per valutare possibili variazioni nell'impedenza del campione, in particolare nella sua capacità.

I risultati ottenuti sono riassunti nella Tabella 5.18.

Frequenza [kHz]	C_p [nF]	R_p [M Ω]
0.1	1.31	5.34
0.2	1.23	3.57
0.5	1.14	2.08
1	1.09	1.36
2	1.05	0.868
5	1.01	0.453
10	0.982	0.241
20	0.966	0.127
50	0.937	0.0426
100	0.906	0.0165
200	0.865	0.0061
300	0.829	0.0035

Tab. 5.18 - Valori $R_p - C_p$ misurati nella prova svolta dopo cinque giorni dal secondo trattamento termico effettuato sul campione.

I valori di capacità, specialmente alle frequenze più basse, risultano essere più alti rispetto ai valori misurati nelle prove precedenti.

Si segnala che l'ispezione visiva post-trattamento termico ha rivelato la presenza di piccole macchie più chiare sulla pasta in carbonio. Tuttavia, è interessante notare che dopo cinque giorni le macchie sono notevolmente ridotte o completamente scomparse.

In Figura 5.18 sono riportate le foto del campione subito dopo il secondo trattamento termico (a) e dopo sette giorni dal secondo trattamento termico (b).

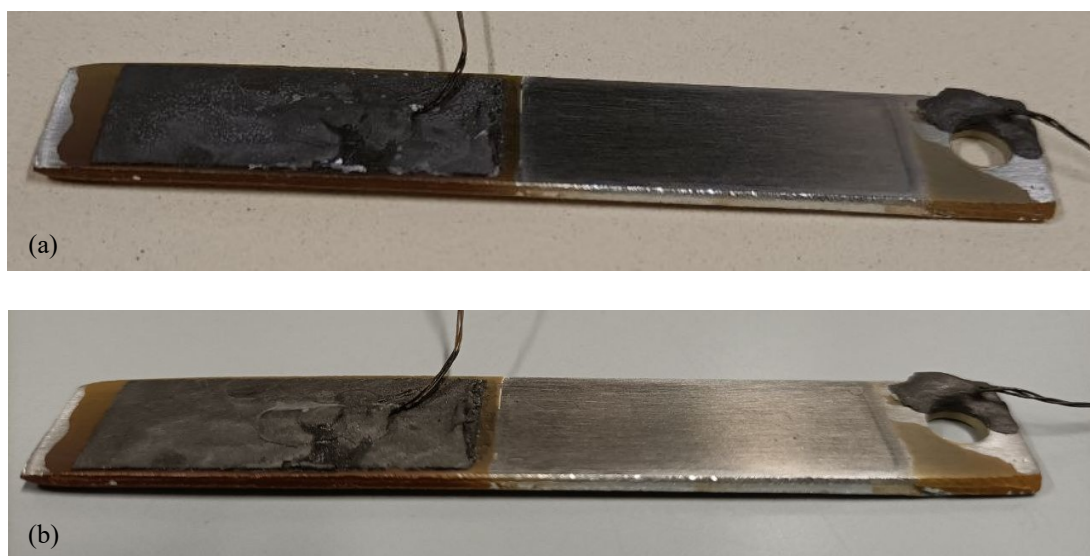


Fig. 5.18 - Variazioni cromatiche sulla verniciatura in carbonio: (a) campione subito dopo il secondo trattamento termico; (b) campione dopo sette giorni dal secondo trattamento termico.

5.6.10 Caratteristica della tensione in funzione della frequenza nella prova svolta dopo cinque giorni dal secondo trattamento termico

La tabella seguente riporta i risultati ottenuti a distanza di cinque giorni dal secondo trattamento termico effettuato sul campione, usando come sistema di prova la configurazione di trave a sbalzo.

Frequenza (Hz)	Tensione in uscita rms (mV)	Tensione accel. rms (mV)
100	28	100.0
150	29	100.0
200	32	100.0
250	37	100.0
300	37	100.0
350	44	100.0
400	59	100.0
450	97	100.0
500	292	100.0
505	374	100.0
510	522	100.0
515	869	100.0
516	987	100.0
517	1133	100.0
518	1279	100.0
519	1382	100.0
520	1402	100.0
521	1373	100.0
522	1300	100.0
523	1216	100.0
524	1128	100.0
525	1019	100.0
530	691	100.0
535	490	100.0
540	371	100.0
550	244	100.0
600	86	100.0
650	51	100.0
700	36	100.0
800	23	100.0

Tab. 5.19 - Valori efficaci della tensione in uscita al variare della frequenza nella prova svolta dopo cinque giorni dal secondo trattamento termico effettuato sul campione.

Come già osservato in altre prove, la frequenza alla quale si manifesta il picco di tensione varia leggermente rispetto alle prove già viste.

Inoltre il valore di picco della tensione, rispettivamente pari a 1.402 V, osservato in questa prova è leggermente superiore rispetto a quelli trovati nelle prove precedenti.

5.6.11 Stima del parametro piezoelettrico nella prova svolta dopo cinque giorni dal secondo trattamento termico

Di seguito sono presentati i risultati ottenuti mediante l'elaborazione MATLAB dei dati sperimentali raccolti per la tensione in funzione della frequenza a distanza di cinque giorni dal secondo trattamento termico effettuato sul campione con valore di picco previsto attorno a 240 °C.

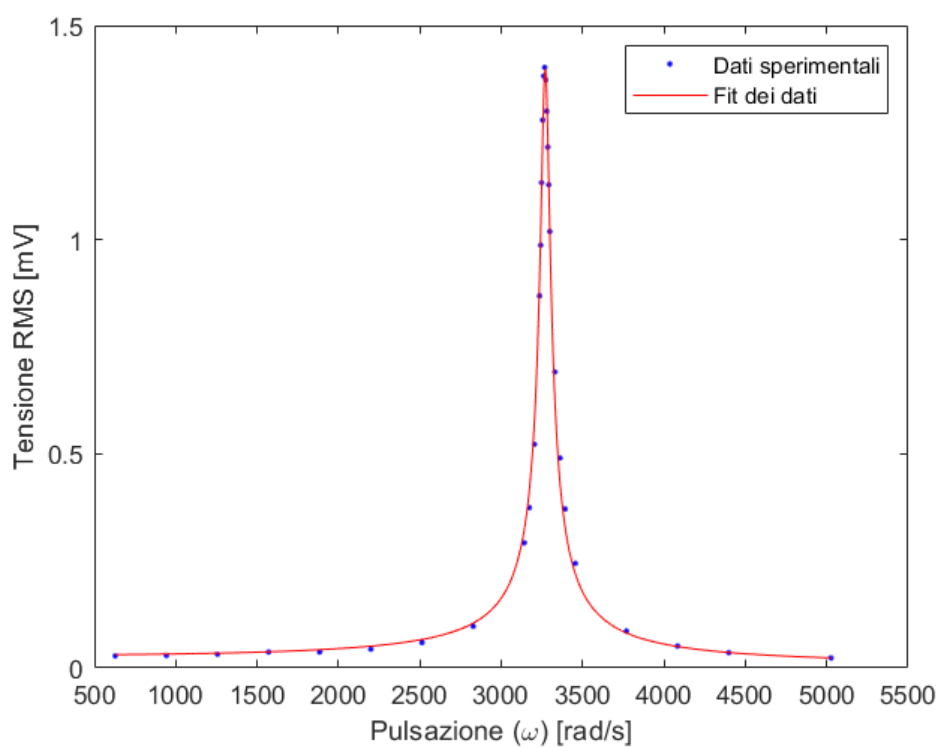


Fig. 5.20 - Dati sperimentali e fit dei dati della tensione in uscita dal convertitore al variare della frequenza nella prova effettuata dopo cinque giorni dal secondo trattamento termico effettuato sul campione.

Si è ottenuto:

Valori dei parametri del modello
$m_1 = 0.004825$
$m_2 = 2.702 \cdot 10^5$
$m_3 = 3271$
$m_4 = 59.17$

Tab. 5.20 - Risultati ottenuti per i parametri del modello nella prova svolta dopo cinque giorni dal secondo trattamento termico effettuato sul campione.

Utilizzando $C_{p_{500\text{ Hz}}} = 1.14 \text{ [nF]}$ e i valori delle grandezze riassunte in Tabella 5.6, si ricava:

$$\varphi_1^* = \frac{m_2 C_p}{9.81 \cdot 0.783 \sqrt{mL}} = 728.51 \cdot 10^{-6}$$

E sostituendo:

$$|d_{31}| = \frac{\varphi_1^*}{Y_p \frac{h_s}{2} b \left. \frac{d\Phi_1(x)}{dx} \right|_{x_1}^{x_2}} = 0.521 \cdot 10^{-12} \text{ [C/N]}$$

Il valore del modulo del parametro piezoelettrico è rimasto quindi sostanzialmente in linea con i valori ottenuti nelle prove precedenti. In Tabella 5.21 sono riportati i valori ottenuti nelle varie prove effettuate sul campione.

Prova	Valore $ d_{31} \text{ [pC/N]}$
Prima preliminare	0.499
Seconda preliminare	0.454
Dopo 2 ore dal primo trattamento termico	0.518
Dopo 7 giorni dal primo trattamento termico	0.543
Dopo 5 giorni dal secondo trattamento termico	0.521

Tab. 5.21 - Indicazione riassuntiva dei valori di $|d_{31}|$ ricavati nelle varie prove effettuate sul campione.

Capitolo 6

Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha riguardato l'analisi di un trasduttore piezoelettrico per applicazioni ad alta temperatura. Il campione analizzato si basa sul modello di un condensatore piano a facce parallele, con un elettrodo che è di alluminio, il dielettrico è il nitrato di alluminio (materiale piezoelettrico) e il secondo elettrodo è realizzato con una pasta di carbonio con elevata temperatura d'esercizio.

Il primo trattamento termico eseguito sul campione (temperatura massima di circa 170 °C) ha prodotto risultati incoraggianti. I valori di capacità e del parametro piezoelettrico d_{31} misurati dopo due ore e dopo sette giorni dal trattamento termico sono stati analoghi ai valori misurati prima del trattamento termico.

Il secondo trattamento termico (temperatura massima di circa 240 °C) ha prodotto delle modifiche sul valore di capacità. Dopo cinque giorni dal trattamento termico, le analisi effettuate hanno mostrato, rispetto ai valori misurati prima del trattamento termico, dei valori di capacità un po' più alti alle frequenze più basse e un valore circa uguale del modulo del parametro piezoelettrico d_{31} del nitrato di alluminio.

Si tratta di dati preliminari. Tuttavia sembra utile pianificare, con riferimento ad un trattamento termico, una serie di misurazioni periodiche della capacità e del parametro piezoelettrico d_{31} ad intervalli definiti, ad esempio dopo poche ore, dopo qualche giorno, dopo alcune settimane. Una volta completate, in presenza di dati stabili ed analoghi ai valori ottenuti prima del trattamento termico, bisognerà procedere ad un successivo trattamento a temperatura superiore, in modo da investigare i limiti in temperatura della configurazione.

Ringraziamenti

Ai miei genitori, Marco e Roberta, va il ringraziamento più grande. Grazie per la pazienza, l'amore e i sacrifici che avete fatto per permettermi di arrivare fino a qui e di diventare la persona che sono. Sperando che possiate essere orgogliosi di me quanto io lo sono di voi, questo traguardo è anche vostro.

A mio fratello Matteo, sono sicura che silenziosamente abbia sempre creduto in me.

Alle mie nonne, Marisa e Clara, e alla mia famiglia tutta. Un ringraziamento speciale va a nonna Clara, per avermi alleggerito il cuore in diverse occasioni e per la forza che continua a trasmettermi.

A Zeno, per essersi pazientemente preso cura di me. Mi auguro di poter crescere ancora assieme.

A Stefania, per esserci sempre stata ed aver condiviso con me gioie e dispiaceri, sei il mio porto sicuro.

Al prof. Daniele Desideri per avermi dato la possibilità di scoprire il mondo della ricerca e per la gentilezza e la disponibilità mostrata durante tutto questo percorso.

A Coral, per tutto quello che mi ha insegnato, che è molto più di quello che crede.

A tutti gli amici che hanno condiviso con me questi anni universitari. Un ringraziamento, in particolare, va ai coinquilini di via Navagero e a tutte le persone che, in un modo o nell'altro, hanno reso quelle mura... casa. Grazie a voi questa esperienza ha guadagnato un sapore inaspettatamente meraviglioso.

Appendice A

Codice scritto utilizzando il software MATLAB per l'analisi dei dati sperimentali

```
% Dati sperimentali
frequenza = [100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 505, 510,
512, 513, 514, 515, 520, 525, 530, 540, 550, 600, 650, 700, 800];

tensione_RMS = [24e-3, 27e-3, 31e-3, 37e-3, 39e-3, 43e-3, 60e-3, 102e-
3, 412e-3, 599e-3, 1007e-3, 1190e-3, 1206e-3, 1187e-3, 1127e-3, 794e-
3, 550e-3, 406e-3, 257e-3, 186e-3, 75e-3, 46e-3, 35e-3, 21e-3];

% Calcolo della pulsazione
omega = 2 * pi * frequenza;

% Definizione del modello
modello = fitype('m1 + m2 / sqrt((w^2 - m3^2)^2 + (w * m4)^2)',
'independent', 'w', 'dependent', 'tensione_RMS');

% Creazione di un oggetto di opzioni per il datafit
opzioni = fitoptions(modello);
opzioni.StartPoint = [0.001, 2.600e+5, 3200, 65]; % Stima iniziale
dei parametri m1, m2, m3, m4
```

```
% Eseguire il datafit
fit_curva = fit(omega', tensione_RMS', modello, opzioni);

% Visualizzazione dei risultati
disp(fit_curva);

% Creazione del grafico con i dati sperimentali e la curva fittata
figure;
plot(fit_curva, omega, tensione_RMS);
xlabel('Pulsazione (\omega) [rad/s]');
ylabel('Tensione RMS [mV]');
title('Datafit');
legend('Dati sperimentali', 'Curva fittata');
```


Bibliografia

- [1] X. Jiang, K. Kim, S. Zhang, J. Johnson, G. Salazar, “High-Temperature Piezoelectric Sensing”, *Sensors*, 14, pp.144-169, dicembre 2013.
- [2] R. Hou, D. Hutson, K. J. Kirk, Y. Q. Fu, “AlN thin film transducers for high temperature non-destructive testing applications”, *Journal of Applied Physics* 111, 074510, aprile 2012.
- [3] G.F. Iriarte, J.G. Rodríguez, F. Calle, “Synthesis of c-axis oriented AlN thin films on different substrates: A review”, *Materials Research Bulletin* 45, pp.1039-1045, giugno 2010.
- [4] A. Iqbal, F. Mohd-Yasin, “Reactive Sputtering of Aluminum Nitride (002) Thin Films for Piezoelectric Applications: A Review”, *Sensors* 2018, 18, 1797, giugno 2018.
- [5] M. Clement, E. Iborra, J. Sangrador, “Influence of sputtering mechanisms on the preferred orientation of aluminum nitride thin films”, *Journal of Applied Physics* 94, vol.94, n.3, pp.1495-1500, agosto 2003.
- [6] H.Y. Liu, G.S. Tang, F. Zeng, F. Pan, “Influence of sputtering parameters on structures and residual stress of AlN films deposited by DC reactive magnetron sputtering at room temperature”, *Journal of Crystal Growth* 363, pp.80-85, ottobre 2012.
- [7] J.P. Kar, G. Bose, S. Tuli, “Influence of nitrogen concentration on grain growth, structural and electrical properties of sputtered aluminum nitride films”, *Scripta Materialia* 54, pp.1755-1759, febbraio 2006.
- [8] K.-H. Chiu, J.-H. Chen, H.-R. Chen, R.-S. Huang, “Deposition and characterization of reactive magnetron sputtered aluminum nitride thin films for film bulk acoustic wave resonator”, *Thin Solid Films* 515, pp.4819-4825, dicembre 2006.

- [9] T. Kim, J. Kim, R. Dalmau, R. Schlessler, E. Preble, X. Jiang, “High-Temperature Electromechanical Characterization of AlN Single Crystals”, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol.62, n.10, pp.1880-1887, ottobre 2015.
- [10] X. Song, R. Fu, H. He, “Frequency effects on the dielectric properties of AlN film deposited by radio frequency reactive magnetron sputtering”, *Microelectronic Engineering* 86, pp.2217–2221, marzo 2009.
- [11] R. D. Gould, S. A. Awan, “Dielectric properties of AlN_x thin films prepared by RF magnetron sputtering of Al using a N_2/Ar sputtering gas mixture”, *Thin Solid Films* 469–470, pp.184-189, ottobre 2004.
- [12] A. Erturk, D. J. Inman, “A Distributed Parameter Electromechanical Model for Cantilevered Piezoelectric Energy Harvesters”, *Journal of Vibration and Acoustics*, vol.130, 041002, agosto 2008.
- [13] A. Erturk, D. J. Inman, “On Mechanical Modeling of Cantilevered Piezoelectric Vibration Energy Harvesters”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 19, pp.1311-1325, novembre 2008.
- [14] B. Narayanan K N, D. R. Nair, A. DasGupta, “Extraction of d_{31} piezoelectric coefficient of AlN thin film”, *IEEE 34th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, pp.623-625, gennaio 2021.
- [15] D. Desideri, E. Bernardo, A. J. Corso, F. Moro, M. G. Pelizzo, “Electrical Properties of Aluminum Nitride Thick Films Magnetron Sputtered on Aluminum Substrates”, *Materials* 2022, 15, 2090, marzo 2022.
- [16] K. Kishi, Y. Ooishi, H. Noma, E. Ushijima, N. Ueno, M. Akiyama, T. Tabaru, “Measurement of output voltage of aluminum nitride thin film as a pressure sensor at high temperature”, *Journal of the European Ceramic Society* 26, pp.3425-3430, ottobre 2005
- [17] Tesi di laurea magistrale in Ingegneria dell’Energia Elettrica di D. Nogara, “Prove di realizzazione mediante paste conduttive di un elettrodo di un trasduttore con film in AlN

depositato mediante magnetron sputtering per applicazioni ad alta temperatura”, relatore prof. D. Desideri, Università degli Studi di Padova, A.A. 2022-2023.

[18] R. Kazys, V. Vaskeliene, “High Temperature Ultrasonic Transducers: A Review”, *Sensors* 2021, 21, 3200, maggio 2021.

[19] K. J. Kirk, J. Elgoyhen, J. P. Hood, D. Hutson, R. S. Dwyer-Joyce, J. Zhang, B. W. Drinkwater, “Ultrasonic condition monitoring using thin-film piezoelectric sensors”, *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, vol.52, n.4, pp.184-191, aprile 2010.

[20] R. Hou, D. Hutson, K. J. Kirk, “Development of sputtered AlN thin-film ultrasonic transducers for durable high-temperature applications”, *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, vol.55, n.6, pp.302-307, giugno 2013.

[21] D. Desideri, Lectures of Electrical and electromagnetic micro/nanodevices, Italia, Università degli Studi di Padova, A.A. 2023-2024.

[22] A. Erturk, “Electromechanical modeling of piezoelectric energy harvesters”, PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2009.

[23] Tesi di laurea magistrale in Ingegneria dell’Energia Elettrica di D. Apolloni, “Realizzazione e caratterizzazione di un cantilever con film in AlN per raccolta di energia cinetica”, relatore prof. D. Desideri, Università degli Studi di Padova, A.A. 2018-2019.

[24] D. Desideri, E. Bernardo, A. J. Corso, A. Doria, A. Maschio, F. Moro, M. G. Pelizzo, “Transverse piezoelectric constant of aluminium nitride films deposited on aluminium substrate by reactive magnetron sputtering”, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* 64, pp.607-613, 2020.

[25] C. Stoeckel, C. Kaufmann, R. Hahn, R. Schulze, D. Billep, T. Gessner, “Pulsed DC magnetron sputtered piezoelectric thin film aluminium nitride – Technology and piezoelectric properties”, *Journal of Applied Physics*, vol.116, n.3, pp.1-7, Luglio 2014.

[26] P. Groen, *An Introduction to Piezoelectric Materials and Components*, Stichting Applied Piezo, 2018.

- [27] K. Kirk, C. K. Lee, S. Cochran, A. McNab, G. Shepherd, “Condition monitoring with ultrasonic arrays at elevated temperatures”, *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, vol.45, n.2, pp.130-133, febbraio 2012.
- [28] F. P. Branca, *Fondamenti di ingegneria clinica*, vol.2 ecotomografia, Italia, Springer, 2008.
- [29] M. T. M. Khairi, M. A. Md Yunus, M. Faramarzi, “Contact and non-contact ultrasonic measurement in the food industry: A review”, *Measurement Science and Technology*, 27 012001 dicembre 2015.
- [30] Sito internet “Ceramic Materials (PZT) - Boston Piezo-Optics Inc.”, <https://www.bostonpiezooptics.com/ceramic-materials-pzt>, Febbraio 2024.
- [31] “IEEE Standard on Piezoelectricity”, ANSI/IEEE Std 176-1987 An American National Standard The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1988.
- [32] Sito internet “Material: Aluminum Nitride (AlN), Bulk - MEMS Clearinghouse”, <https://www.memsnet.org/material/aluminumnitridealnbulk/>, Febbraio 2024.
- [33] Scheda tecnica Oscilloscopio YOKOGAWA DL9140 (710310) e sonda passiva di tensione YOKOGAWA 701943.
- [34] Scheda tecnica Generatore di funzioni Agilent 33120A.
- [35] Scheda tecnica Amplificatore SmartAmp POWER AMPLIFIER 2100E21-100.
- [36] Scheda tecnica Shaker elettrodinamico MODAL SHOP 2007E.
- [37] Scheda tecnica Accelerometro piezoelettrico PCB 352C65.
- [38] Scheda tecnica Condizionatore di segnale PCB 480C02.
- [39] Scheda tecnica Misuratore digitale di impedenza GW Instek LCR 6300.
- [40] Datasheet PELCO® High Temperature Carbon Paste, 50g Product n.16057, disponibile online: https://www.tedpella.com/technote_html/technote.aspx, Febbraio 2024.
- [41] Sito internet “Forno pizza Delizia - G3 Ferrari Trevidea s.r.l.”, <https://www.g3ferrari.net/delizia-red.html>, Febbraio 2024.

[42] D. Damjanovic, “Materials for high temperature piezoelectric transducers”, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, vol.3, pp. 469-473, Ottobre 1998.

[43] J. N. Caron, G. P. DiComo, S. Nikitin, “Generation of ultrasound in materials using continuous-wave lasers”, *Optics Letters*, vol.37, n.5, pp. 830-832, 2012.

[44] Tesi di laurea magistrale in Ingegneria Elettrica di M. Poggeschi Belloni, “Realizzazione e caratterizzazione di un film in nitruro di alluminio e prove di funzionamento di un cantilever commerciale”, relatore prof. D. Desideri, Università degli Studi di Padova, A.A. 2013-2014.

[45] Scheda tecnica Multimetro digitale Fluke 87 V.

[46] Scheda tecnica Termocoppia di tipo K RS Pro.