



Università degli Studi di Padova

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea in Ingegneria Meccatronica

tesi di laurea

# Sensori a microfilo magnetico: la nuova frontiera della sensoristica contactless

**Relatore:** Prof. Alessandro Sona

**Laureando:** Michael Gaborin

A.A. 2022-23

---

# Introduzione

La sensoristica è oggi più che mai un elemento centrale in diversi sistemi e un argomento trasversale a più discipline. Una branca dell'ingegneria che risulta pertanto in continua evoluzione, come si può notare dai risultati della sua ricerca. Negli ultimi tempi sono molto sentiti i temi dell'affidabilità, dell'efficienza energetica e della miniaturizzazione; tutte caratteristiche che ogni sistema di misura si trova a dover esprimere per essere competitivo. Da qui nasce l'esigenza di studiare e creare dei sensori sempre più semplici ed affidabili allo stesso tempo; che non presentino parti meccaniche in movimento e che permettano una lettura wireless, in grado quindi di scongiurare i guasti e offrire indubbi vantaggi. È in questa transizione tra vecchie e nuove tecniche di rilevamento che si inserisce una tecnologia alquanto innovativa che offre i vantaggi dei tradizionali sensori eliminando gran parte delle problematiche ad essi collegate. Si tratta di una tipologia di sensori più sottili di un capello umano, che possono essere impiegati nelle misure di temperatura, deformazione e campo magnetico. Questi ultimi sono elementi passivi che non necessitano di alimentazione e possono essere quindi annegati all'interno di materiali compositi o incollati addirittura su tessuti e ossa umani, alla ricerca di dati, misurabili con semplicità in maniera wireless.

Queste sono solo alcune delle peculiarità che caratterizzano i sensori amorfi a microfilo magnetico. Essi sono costituiti da un'anima in lega metallica e rivestiti da vetro borosilicato, inoltre hanno proprietà tecnologiche e fisico/chimiche che verranno in seguito esaminate nel corso di questa trattazione. Gli ambiti di applicazione di tali sensori sono svariati e spaziano appunto dalla scienza delle costruzioni, passando per la medicina e finendo con l'ingegneria civile, senza trascurare gli azionamenti elettrici o i materiali compositi.

Partendo da alcune premesse teoriche è obiettivo di questa tesi fornire un panorama di ampio spettro sulle possibili applicazioni dei sensori amorfi a microfilo magnetico, sottolineando gli aspetti salienti del funzionamento teorico del sistema di misura e le sue caratteristiche. Verranno in fine analizzati i principali vantaggi e svantaggi nell'utilizzo di questa tipologia di sensore, al fine di permetterne un impiego critico e consapevole. In particolare i contenuti presentati saranno suddivisi in quattro capitoli principali dei quali di seguito è riportata una breve descrizione:

- Microfilo magnetici e loro applicazioni: al suo interno saranno presenta-

ti i vari ambiti in cui vengono impiegati i sensori a microfilo magnetico, con riferimento alla letteratura scientifica ad essi collegata. Saranno anche citate le problematiche a cui essi rispondono in ciascun caso e verrà fornita una panoramica sulle nozioni teoriche necessarie alla comprensione del funzionamento.

- Principio di misura: verrà trattato il principio di raccolta dati del sistema di misura e la sua elettronica.
- RV Magnetics e microfilo commerciali: questo capitolo conterrà una breve presentazione dell'azienda produttrice dei microfilo a livello commerciale e verranno analizzati alcuni aspetti dei suoi prodotti per poi esaminare accuratamente un caso reale in cui venga applicato il prodotto.
- Sensori di deformazione a confronto: in questo ultimo capitolo verranno analizzati alcuni sensori dagli utilizzi affini, ma dalla tecnologia differente rispetto all'oggetto di studio. Il tutto al fine di permettere un rapido confronto tra diverse metodologie di misura.

*L'autore.*

Autore: Michael Gaborin

# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>III</b>
<b>1 MICROFILM MAGNETICI E LORO APPLICAZIONI</b>	<b>1</b>
1.1 Generalità . . . . .	1
1.2 Premesse teoriche . . . . .	3
1.3 Storia . . . . .	6
1.4 Produzione . . . . .	7
1.5 Principali impieghi dei microfilmi magnetici . . . . .	10
<b>2 PRINCIPIO DI MISURA DEI SENSORI A MICROFILO MAGNETICO</b>	<b>15</b>
2.1 Generalità . . . . .	15
2.2 Effetto Barkhausen . . . . .	15
2.3 Principio di misura . . . . .	16
2.4 Magnetoimpedenza e rilevazione del campo magnetico . . . . .	18
2.5 Elettronica del sistema di misura . . . . .	19
<b>3 RV MAGNETICS E MICROFILM COMMERCIALI</b>	<b>23</b>
3.1 Generalità . . . . .	23
3.2 RV Magnetics principale produttore mondiale . . . . .	23
3.3 Mercato di interesse . . . . .	24
3.4 Vantaggi di questa tecnologia . . . . .	24
3.5 Sostenibilità . . . . .	25
3.6 Sensore di allungamento, misura dello stress meccanico . . . . .	26
<b>4 SENSORI DI DEFORMAZIONE A CONFRONTO</b>	<b>33</b>
4.1 Generalità . . . . .	33
4.2 Estensimetri . . . . .	33
4.3 LVDT . . . . .	36
4.4 Sensore di posizione a microfilmo magnetico . . . . .	39
<b>Bibliografia</b>	<b>44</b>
<b>Elenco delle figure</b>	<b>47</b>

# Capitolo 1

## MICROFILI MAGNETICI E LORO APPLICAZIONI

### 1.1 Generalità

La tecnologia moderna richiede oggi più che mai l'impiego di componenti di misura sempre più affidabili, sensibili e miniaturizzati; senza trascurare in secondo luogo l'impatto ambientale e il risparmio energetico. Sensori in grado di offrire prestazioni ragguardevoli in ogni condizione, con alta reiezione ai disturbi e assenza di fastidiosi cablaggi. Un'ulteriore sfida giunge dall'industria 4.0 che attraverso l'Internet of Things raccoglie migliaia di dati al secondo provenienti da altrettanti sensori di svariate tipologie. Risulta facilmente intuibile quindi che i tradizionali sensori non sono in grado di soddisfare tutte le esigenze precedentemente descritte, e da qui nasce la necessità di creare nuovi materiali innovativi che portino lo stato dell'arte della sensoristica ad un livello superiore.

I microfilati magnetici sono dei fili in materiale composito che nascono appunto al fine di soddisfare queste esigenze, nell'ottica di creare dei sensori semplici ed economici ma dalle prestazioni ragguardevoli. Tali elementi sopra citati presentano un diametro paragonabile ad un capello umano e la loro struttura è composta da un nucleo in lega metallica e un rivestimento esterno in vetro borosilicato temperato come mostra l'ingrandimento in figura (1.1).

Le loro dimensioni ridotte unite al fatto di non richiedere un'alimentazione (sensore passivo), permettono di annegare spezzoni di filo in svariati materiali senza variarne significativamente le proprietà tecnologiche; inoltre la loro natura magnetica ne permette l'utilizzo contactless, cioè con rilevamento a distanza senza contatto. Il rivestimento in vetro costituisce un ottimo isolamento elettrico e offre la possibilità di lavorare in ambienti chimicamente aggressivi oltre a garantire la biocompatibilità. Il sensore deve la sua affidabilità alla propria

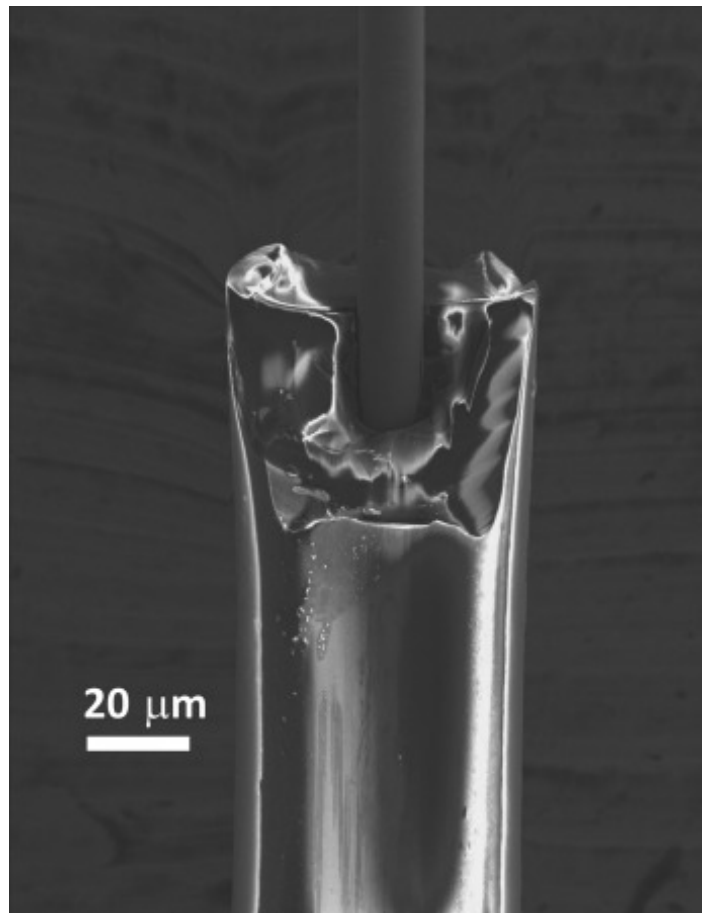


Figura 1.1: Microfilo magnetico composito con nucleo in lega metallica ricoperto da una guaina in vetro borosilicato temperato (PYREX) [1].

capacità di “auto-ripararsi”, infatti grazie alla natura amorfa del nucleo metallico, in caso di rottura del filo, i due fili bistabili che si generano appariranno come due sensori funzionanti indipendenti, almeno fintanto che la loro lunghezza rimane maggiore di 2mm. L’intervallo di temperatura d’impiego è compreso all’incirca tra 0-800 K con pressioni tra 0-150 MPa in base a dimensioni e composizione chimica della struttura. Un singolo sensore può rilevare essenzialmente tre grandezze fondamentali: campo magnetico, temperatura e stress meccanici. Risulta inoltre possibile misurare tutte quelle grandezze che sono riconducibili alle tre grandezze sopra riportate. I dati rilevati possono essere isolati per non influenzarsi reciprocamente, quindi un unico microfilo può ricoprire ruoli diversi nella misurazione.

La loro produzione risulta semplice e a basso costo: con pochi grammi di lega (in relazione al diametro del nucleo) si possono produrre alcuni Km di filo, in pochi minuti ( indicativamente 1 g per produrre 1 km di filo). Questi sono



solo alcuni dei vantaggi per molte applicazioni che verranno descritte in seguito.

## 1.2 Premesse teoriche

### Magnetismo

I materiali sono composti da atomi i quali a loro volta presentano svariati elettroni (cariche negative) che ruotano attorno ad un nucleo positivo. Gli elettroni oltre a ruotare attorno al nucleo ruotano anche attorno al proprio asse generando all'interno del materiale delle correnti microscopiche. Si può immaginare, in modo semplificato, che ad ogni atomo sia associato un dipolo magnetico.

Gli atomi e le molecole che compongono i materiali diamagnetici non possiedono dipoli magnetici. Tuttavia in presenza di un campo  $B$  esterno, al loro interno si generano dei dipoli che tendono a orientarsi in maniera opposta al campo, dando un contributo negativo di soppressione dello stesso. Per quanto riguarda i materiali paramagnetici i loro atomi possiedono dei dipoli magnetici che hanno orientazione disordinata. Tali dipoli tendono ad allinearsi con il campo  $B$  esterno in un dipolo complessivo che va ad aumentare  $B$ . I materiali ferromagnetici presentano atomi dotati di dipoli magnetici, organizzati in piccole regioni dette domini di Weiss (figura 1.2) in cui la magnetizzazione risulta uniforme e di verso univoco.

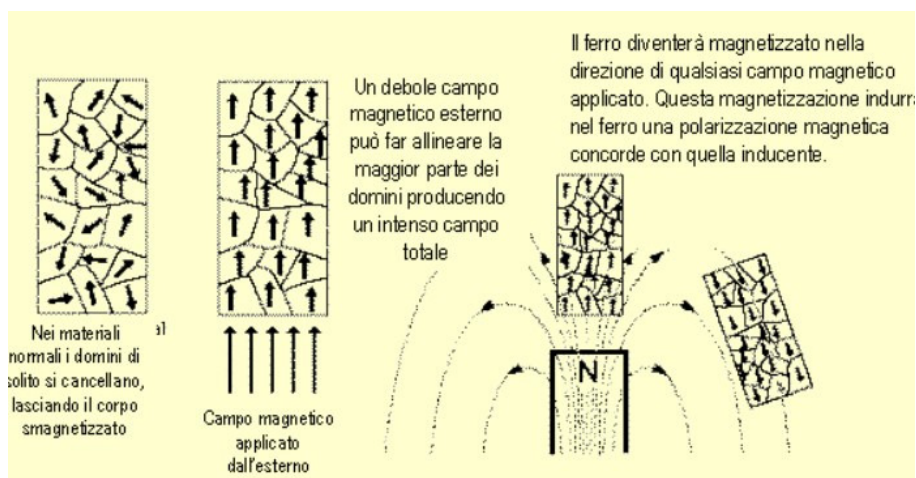


Figura 1.2: Domini di Weiss [2]

In condizioni normali i domini di Weiss non sono tra loro orientati precisamente e quindi non generano un campo  $B$  all'esterno; tuttavia anche in presenza di un campo di induzione piccolo si ha una forte risposta di amplificazione dello stesso dovuta alla natura ordinata dei dipoli.

**Isteresi magnetica** Una porzione di materiale ferromagnetico si trova usual-

mente in uno stato non magnetizzato, infatti i suoi domini sono disposti con orientazione casuale e complessivamente danno un contributo magnetico macroscopico di valore nullo. Applicando un campo magnetico esterno la magnetizzazione complessiva varia, infatti quest'ultima in un materiale ferromagnetico si modifica al variare del campo esterno ed è descritta dal suo ciclo di isteresi (figura 1.3). Lo stato di magnetizzazione del materiale in questo caso è dovuto al contributo del campo applicato e alle condizioni magnetiche pregresse.

Si definisce isteresi il fenomeno per cui una grandezza, descritta mediante altre grandezze caratteristiche del fenomeno stesso, risulta funzione dei valori presenti e passati di tali grandezze (fenomeno con memoria). In un certo senso si può dire che il sistema reagisce alle sollecitazioni con un certo ritardo. Indicando

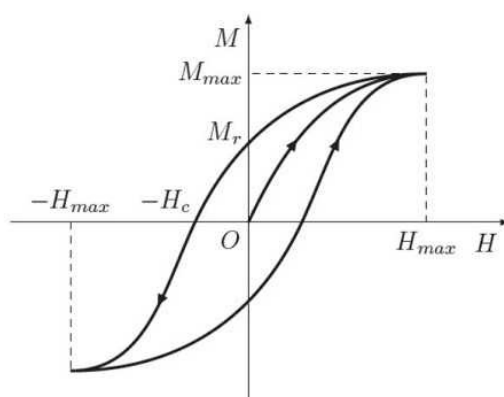


Figura 1.3: Ciclo di isteresi magnetica [3]

con  $\underline{H}$  il campo magnetico esterno, con  $\underline{M}$  la magnetizzazione del materiale e con  $\underline{B}$  il campo di induzione magnetica è possibile analizzare il fenomeno come segue. Nel grafico sono riportati i moduli di  $\underline{H}$  e  $\underline{M}$  con segno che indica il verso dei vettori in questione. Partendo da  $O$  con  $H$  e  $M$  nulli, aumentando  $H$  si nota che  $M$  aumenta lungo la curva di prima magnetizzazione fino al valore massimo  $M_{max}$  (valore di saturazione). Diminuendo poi  $H$  progressivamente fino ad  $H=0$  non verrà ripercorsa la stessa curva, bensì una curva che per  $H$  nullo fornisce una magnetizzazione residua del materiale  $M_r$ . Il materiale è stato magnetizzato creando un magnete artificiale. Per riportare  $M$  al valore nullo è necessario sottoporre il campione ad un campo  $H$  di verso opposto che viene detto campo coercitivo  $H_c$ . Ciò porta  $M$  ad annullarsi prima e ad aumentare poi in verso opposto fino alla saturazione con  $H$  pari a  $-H_{max}$ . Aumentando poi  $H$  fino a  $0$ ,  $M$  assumerà il valore residuo di  $-M_r$ ; ciò implica che per portare  $M$  a un valore nullo si renderà necessaria l'applicazione di un campo coercitivo  $H > 0$ .

Il ciclo se ripetuto segue l'andamento mostrato in figura, mentre l'area contenuta tra le curve di magnetizzazione rappresenta l'energia dissipata nei vari cicli di magnetizzazione.

### Magnetoelasticità

Conseguentemente al riallineamento dei domini magnetici e al loro ingrandimento ha luogo nel materiale in esame una variazione di dimensioni. Tale effetto, che si può dunque osservare nei materiali ferromagnetici, è definito effetto magnetoelastico diretto e inverso: infatti questa gamma di materiali se sottoposti ad un campo di induzione magnetica, sono in grado di magnetizzarsi ottenendo delle variazioni di dimensioni lineari fino a qualche mm. Viceversa, un materiale ferromagnetico sottoposto a deformazioni in uno stato di magnetizzazione costante subisce delle mutazioni dell'induzione magnetica.

Cercando di analizzare il fenomeno magnetostrittivo diretto (figura 1.4) si può facilmente notare come sottoponendo uno spezzone di materiale ad un campo di induzione variabile di tipo sinusoidale, a media nulla, la deformazione rimanga costante nel tempo. Essa infatti varia con frequenza doppia rispetto a quella del campo che la genera.

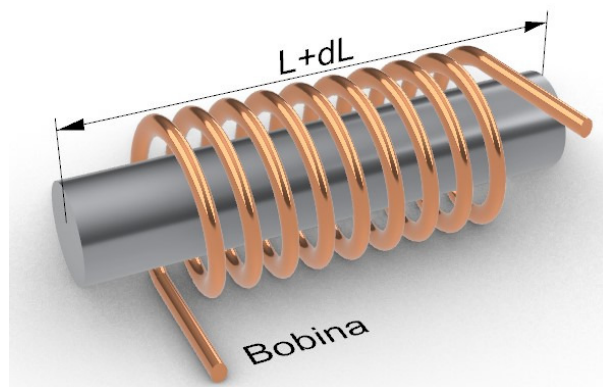


Figura 1.4: Magnetostrizione diretta

Un materiale con magnetostrizione positiva dunque si allunga sempre in presenza di un campo magnetico indipendentemente dal verso di quest'ultimo. Per far lavorare il componente magnetico in maniera armonica l'unico modo è creare un offset di campo costante attorno al quale oscillare. Ciò presuppone che il componente vari la sua deformazione iniziale senza mai annullarla del tutto. Al fine di analizzare l'effetto inverso (figura 1.5) risulta sufficiente introdurre il campione in un solenoide alimentato con corrente costante che genera un campo  $\underline{B}$  e un conseguente allungamento della barra. Sollecitando in un secondo momento il campione con uno sforzo di compressione armonico si assiste alla generazione di un campo di induzione aggiuntivo che si somma al campo costante.

Per misurare l'entità della deformazione è quindi sufficiente misurare la variazione del campo che ne consegue. La misurazione si effettua con una seconda bobina (concentrica alla prima e alla barra) che non è in questo caso alimentata, ma ai cui capi verrà misurata la differenza di potenziale indotta. Per la legge di Faraday-Neumann infatti ai capi di una spira che concatena un campo variabile si genera una differenza di potenziale pari alla derivata del campo con

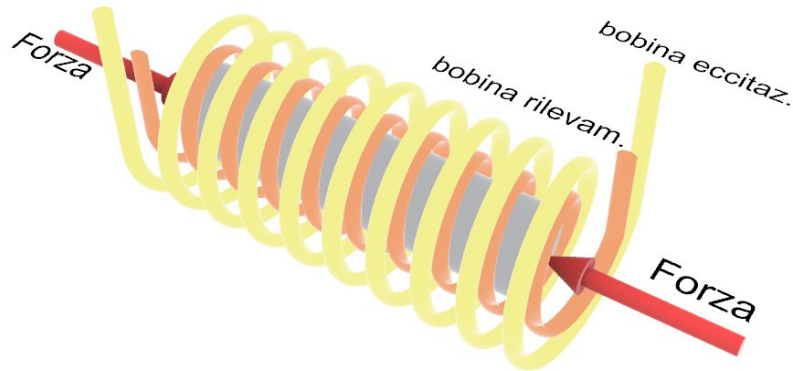


Figura 1.5: Rilevamento deformazione con magnetostrizione inversa

segno cambiato (il segno meno deriva dalla conservazione dell'energia). Questo permette tramite la misura di tensione, di isolare solamente la componente del campo derivante dalla deformazione, infatti l'induzione costante prodotta dalla prima bobina ha derivata nulla e non dà quindi luogo a contributi di tensione. Sfruttando queste due proprietà e in particolare quella inversa è possibile impiegare i materiali ferromagnetici come sensori. Dalla misura di tensione si può risalire alla deformazione e quindi indirettamente allo sforzo che ne è la causa.

### 1.3 Storia

La storia dei sensori in esame si può ricostruire facendo riferimento alla letteratura presente su di essi. Le prime pubblicazioni scientifiche a trattare questa tecnologia risalgono all'incirca alla metà degli anni Settanta del ventesimo secolo, come testimonia un articolo del 1975. [4].

La ricerca ha poi avuto un'evoluzione alquanto piatta e poco dinamica nel corso del ventennio successivo. A partire dalla metà degli anni Novanta tuttavia risulta evidente un notevole incremento dei lavori riguardanti questa tecnologia, in svariati ambiti tra quelli che saranno di seguito presentati.

Recentemente un'azienda in particolare si è distinta per l'industrializzazione di questo tipo sensori, per un loro impiego su larga scala. Si tratta di RV-Magnetics che ha sede in Slovacchia e propone diverse versioni del sistema di misura applicabili a diversi ambiti.

## 1.4 Produzione

La produzione dei microfilì magnetici risulta tecnologicamente semplice ed economica, essi infatti sono prodotti con la tecnica Taylor-Ulitovski (figura 1.6) [1][5] che impiega l'induzione magnetica per portare la lega del nucleo metallico alla temperatura di fusione. All'inizio del processo, la matrice metallica è contenuta

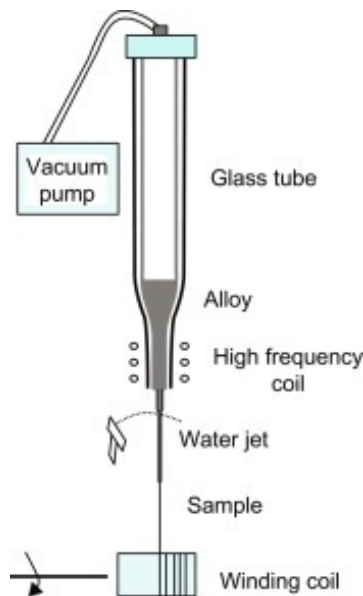


Figura 1.6: Produzione microfilì [1]

in un tubo vetroso, perciò quando il metallo fonde provoca il rammollimento del rivestimento in vetro che va a formare una guaina attorno al nucleo metallico. Tutto ciò dà vita ad una colata continua, di un sottile capillare in vetro con anima metallica, che viene fatto passare in un foro calibrato per determinarne con precisione il diametro esterno. Il filamento ottenuto viene poi rapidamente raffreddato da un getto d'acqua che effettua un processo paragonabile ad una tempra con il duplice scopo di:

- raffreddare il prodotto privandolo della sua plasticità e rendendo possibile il suo avvolgimento su bobine;
- generare delle tensioni interne in maniera controllata e opportuna a seconda degli utilizzi.

In questa fase della produzione risultano importanti le tensioni che si generano all'interno del materiale a seguito del processo di rapido raffreddamento subito dal filo. In particolare queste sollecitazioni sono dovute alla notevole differenza tra i coefficienti di dilatazione termica di vetro e lega e sono essenziali nella

determinazione delle proprietà magnetiche del filo. Questa tecnica di produzione presenta due vantaggi principali legati ai seguenti aspetti:

- possibilità di gestione e regolazione dei parametri geometrici e fisici durante la produzione
- capacità di produrre lunghi tratti di filo

### Velocità di colata

La tecnica Taylor-Ulitovski, se pur di facile realizzazione, presenta dei limiti legati alla velocità di colata, la quale come l'intervallo termico di lavorazione è dettata dalle proprietà dei materiali impiegati e dalla geometria. La velocità limite di produzione è limitata dalla forza di adesione metallo-vetro e si può in prima approssimazione calcolare con la seguente espressione (1.1). Eguagliando infatti l'energia cinetica del filo al lavoro compiuto dalla forza di adesione lungo lo spostamento in  $z$  si ottiene quanto segue.

$$\begin{aligned} 1/2(vd_m)Vc^2 &= Fz \\ Vc &= 6Fa/[\Pi d_m(R^2 + r^2 + Rr)] \\ v &= \Pi z(R^2 + r^2 + Rr)/3 \end{aligned} \quad (1.1)$$

dove:

$Vc$  = velocità di colata media  $\langle dz/dt \rangle$

$v$  = volume del cono di metallo

$F$  = forza che agisce sul metallo che corrisponde alla forza di adesione metallo-vetro  $F_a$

$z$  = spostamento verticale della lega

$d_m$  = densità media del metallo

Risulta facilmente intuibile come tale velocità sia direttamente proporzionale alla forza di adesione metallo-vetro e inversamente proporzionale al raggio dell'anima.

### Diametro del microfilo

Il diametro dell'anima metallica risulta limitato inferiormente e superiormente dalla velocità di colata e si attesta su valori di  $0,8 \div 30 \mu\text{m}$ , con spessori del vetro di  $2 \div 15 \mu\text{m}$ . In condizioni ideali lo spessore dell'anima e del rivestimento rimangono costanti per tutta la lunghezza del tratto di filo, tuttavia nella realtà le loro dimensioni subiscono delle lievi variazioni lungo tutta la lunghezza del prodotto finito. Dalle analisi di laboratorio appare evidente una correlazione tra la variazione delle dimensioni radiali del filo e la sua lunghezza (figura 1.7). Considerando spezzoni della lunghezza di alcuni cm, cioè con dimensioni consone ad un utilizzo pratico, le variazioni radiali risultano trascurabili.

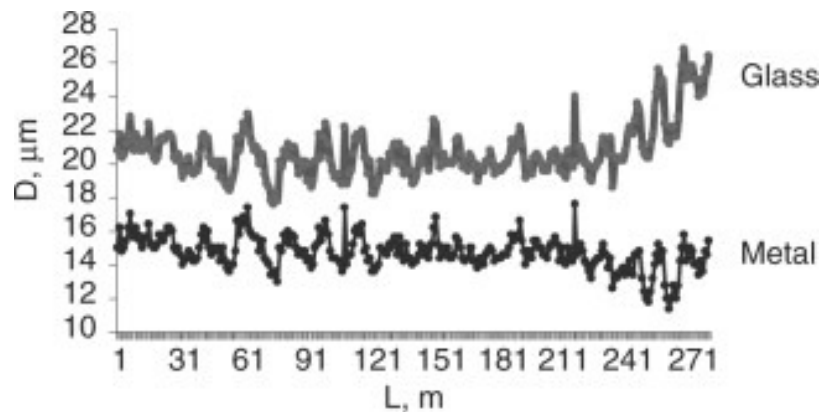


Figura 1.7: Variazione del diametro in relazione alla lunghezza del campione di filamento [5]

### Composizione dell'anima metallica

La composizione del nucleo è di natura metallica, in particolare esso è composto da leghe basso fondenti, frutto dell'unione di più metalli puri (Ag, Au, Cu, Ni, Sn, Pb e Pt). Possono essere introdotti anche semiconduttori come Ge, Si o Bi; tuttavia le percentuali di elementi in lega non sono del tutto libere ed indipendenti, ma presentano precise limitazioni. Un ulteriore limite è rappresentato dalla temperatura di fusione che non deve essere troppo elevata e dalla reattività di alcuni materiali con il vetro (Ti, Cr, Mo, W, Nb, Al, Na, La e Nd) che li rende inadatti a tale impiego. La produzione risulta principalmente rivolta a microfilamenti magnetici con caratteristiche magnetiche dolci nei quali Fe, Ni e Co risultano gli elementi principali della lega. Elementi come Si, B, C e Al vengono aggiunti per generare l'amorficità nelle leghe.

### Proprietà magnetiche del microfilamento

Tra le caratteristiche di interesse per i microfilamenti vi sono le loro caratteristiche magnetiche, che dipendono in primo luogo dalla loro anisotropia magnetoelastica dovuta dall'accoppiamento tra sollecitazioni interne e magnetostrizione e in secondo luogo dalla loro forma. Si possono riscontrare notevoli tensioni tra nucleo e rivestimento, dovute ai diversi coefficienti di dilatazione termica dei due materiali, esse in particolare dipendono dal rapporto tra il diametro del nucleo e il diametro totale del filo. A seconda del valore assunto da tali sollecitazioni e dalla magnetostrizione si riscontrano diverse forme del ciclo di isteresi (figura 1.8).

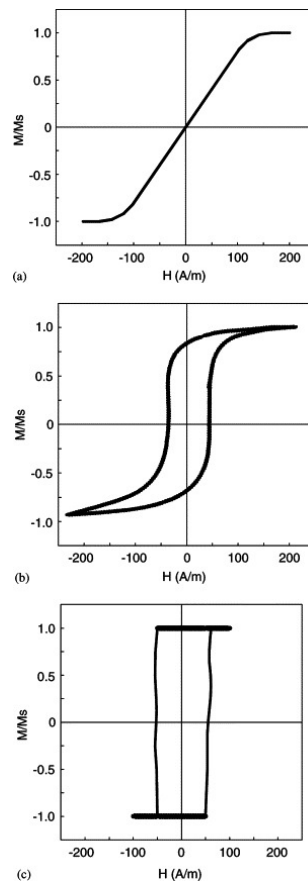


Figura 1.8: Forma del ciclo di isteresi (a) magnetostrizione negativa, (b) piccola magnetostrizione negativa, (c) magnetostrizione positiva [1]

## 1.5 Principali impieghi dei microfilì magnetici

### Misura del campo magnetico

La misura dei tradizionali sensori di campo magnetico è affetta da errori dovuti alla temperatura (compensati in post elaborazione software), inoltre essi risultano non lineari e quindi vi è la necessità di restringere il loro campo di misura al fine di eseguire una post linearizzazione (restringimento del campo di misura).

I microfilì bistabili impiegano lo spostamento del ciclo di isteresi per monitorare la presenza e l'entità di un campo magnetico esterno. (figura 1.9).

Nel caso il microfilò sia interessato da un campo  $H$  positivo il suo ciclo di isteresi trasla verso sinistra e viceversa. Tale fenomeno non è soggetto a saturazione, non viene influenzato dalla variazione di temperatura o di altri parametri ed è proporzionale al campo applicato anche per grandi valori di  $H$ . La bistabilità per-



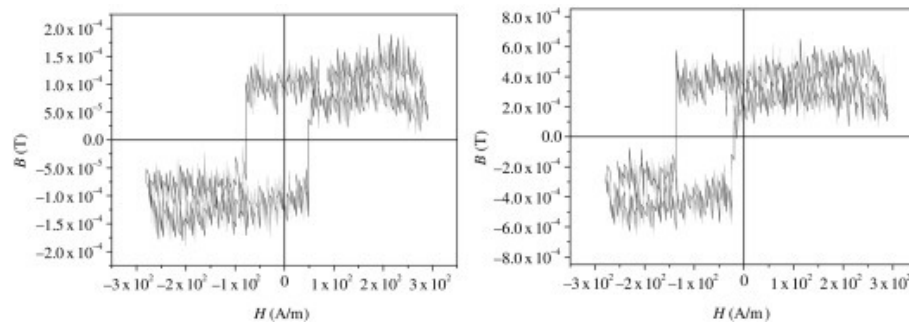


Figura 1.9: Ciclo di isteresi microfilato magnetico (sinistra senza campo magnetico esterno, destra con campo esterno applicato). [1]

mette quindi di ottenere sensori di campo magnetico termicamente indipendenti e lineari con ampio campo di misura.

### Monitoraggio delle deformazioni

#### Tensioni nei materiali compositi o stampati in 3D

Grazie alla forte anisotropia magnetoelastica, i microfilati possono essere impiegati come sensori contactless di stress meccanico, il loro campo di commutazione risulta infatti estremamente sensibile alle sollecitazioni meccaniche. Grazie a questa peculiarità includere tali sensori in materiali compositi o stampe 3D durante la produzione è utile al fine di monitorare la deformazione e lo stato di salute dei componenti con alta precisione (figura 1.10).

#### Rilevamento Stress in biomedicina

Il rivestimento in vetro garantendo la biocompatibilità permette l'utilizzo sicuro del sensore nella medicina moderna. Uno dei principali impieghi risulta il monitoraggio dell'osteomalacia (rammollimento delle ossa causato dalla mancanza di calcio). In questo modo risulta agevole misurare la deformazione subita dall'osso in questione, durante le varie attività quotidiane, in maniera non invasiva.

#### Misure di temperatura

#### Monitoraggio temperatura intracranica

Il range di temperatura entro il quale il sensore è in grado di operare risulta piuttosto variabile e dipende principalmente da due fattori:

- composizione chimica, da cui deriva la sua temperatura di Curie;

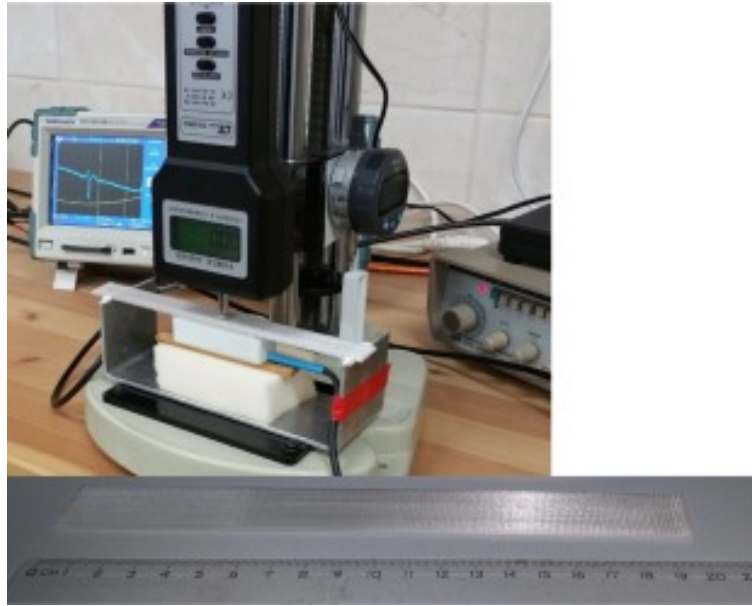


Figura 1.10: misura deformazione componente stampato in 3D) [1].

- dalla presenza o meno della proprietà di bistabilità nel range di temperatura.

La misurazione di temperatura grazie alla biocompatibilità è spesso utilizzata per misurare questa grandezza in punti di difficile accesso. Infatti grazie alle ridotte dimensioni il sensore è in grado di effettuare misure senza contatto, in zone in cui risulterebbe impossibile portare agevolmente il cablaggio di una tradizionale termocoppia. Ne è un esempio la misura della temperatura intracranica, nella quale uno spezzone di microfilo è installato sotto la parete ossea del cranio e dall'esterno si effettua agevolmente la misura della temperatura delle meningi (figura 1.11).

Risulta utile monitorare la variazione del tempo/campo di commutazione che varia notevolmente di oltre il 100% anche su intervalli di temperatura ristretti. Variazioni importanti dei valori di commutazione garantiscono una risoluzione pari a  $0,1^{\circ}\text{C}$  che risulta più che efficace in medicina. Il medesimo processo di misura può tuttavia essere applicato più genericamente ad altri ambiti tecnologici e ingegneristici.

### **Biocompatibilità**

Il rivestimento in vetro offre la possibilità di impiantare il microfilo nei tessuti di esseri viventi, come ampiamente dimostrato su diverse specie animali. Le possibilità di rigetto risultano praticamente nulle, infatti le cellule vive si sviluppano senza problemi attorno al filo includendolo nel tessuto grazie alle ridotte



Figura 1.11: Misura della temperatura intracranica con impianto in titanio e confronto con temperatura rilevata tramite termocoppia [1]

dimensioni. I microfilii risultano inoltre invisibili ai normali raggi X utilizzati nell'ambito medico perché molto sottili. La loro presenza non interferisce nemmeno con la possibilità offerta al paziente di effettuare la risonanza magnetica, che offre come noto una precisa distinzione dei tessuti in base alla loro composizione biochimica. La mancata interazione con questo genere di tecnologia diagnostica è da attribuire allo stato di permanente saturazione in cui giace il materiale che presenta bistabilità magnetica e ad altre proprietà per le quali si rimanda a letteratura più specifica.

### Sensori chimici

Grazie all'impiego dei MOF (metal organic framework), che sono una classe di materiali metallorganici dalla porosità molto elevata si possono rendere i microfilii funzionali alla rilevazione di sostanze chimiche.

I MOF presentano una struttura cristallina composta da ioni metallici coordinati a leganti organici rigidi, che assieme danno origine a strutture con alta porosità (figura 1.12). Tali strutture presentano un volume interno vuoto fino al 90% del volume complessivo, e superfici interne che raggiungono i  $6000 \text{ m}^2/\text{g}$ . La nomenclatura IUPAC definisce un MOF come un reticolo di coordinazione con leganti organici, contenente spazi vuoti potenziali.

Esistono svariate combinazioni di materiali organici e inorganici da cui sintetizzare i MOF ottenendo proprietà differenti. All'interno del volume intercristallino vuoto essi hanno la capacità di immagazzinare diversi gas e hanno quindi diverse applicazioni come: purificazione e separazione di gas, sensoristica ecc.

Una loro proprietà in particolare ne rende possibile l'utilizzo in combinazione con il microfilio. La respirazione dovuta all'adsorbimento di gas o solventi infatti modifica la struttura cristallina degli stessi MOF i quali si deformano modificando il loro volume. Includendo in una piccola porzione di MOF con proprietà respiratorie un microfilio, si può leggere l'adsorbimento della sostanza chimica, tramite la misura della deformazione del cristallo che cambia volume.

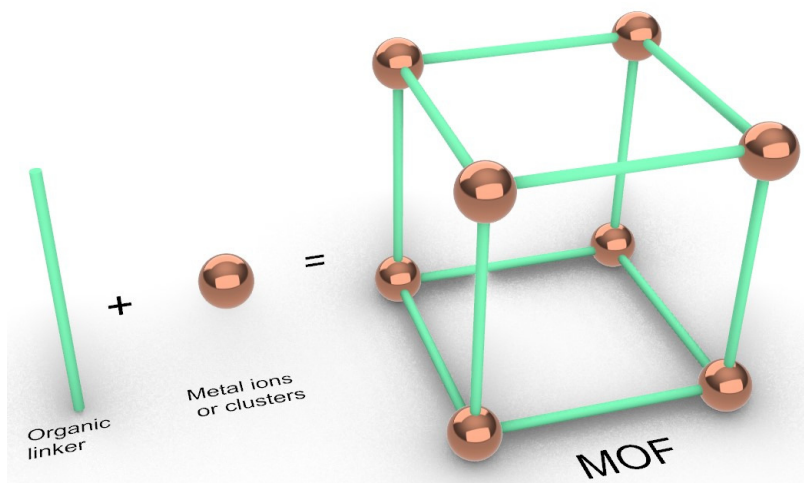


Figura 1.12: elementi base di un MOF

## Capitolo 2

# PRINCIPIO DI MISURA DEI SENSORI A MICROFILO MAGNETICO

### 2.1 Generalità

I sensori a microfilo magnetico si avvalgono del principio di induzione, in combinazione con le principali proprietà dei materiali ferromagnetici che in essi risultano particolarmente accentuate e importanti. Un'altra caratteristica fondamentale è la bistabilità del microfilo, legata al campo di saturazione e al suo raggiungimento in tempi diversi a seconda delle condizioni di lavoro.

Il sistema di misura si compone di pochi semplici elementi tra cui i principali risultano la bobina di eccitazione e la bobina di rilevamento. Queste ultime sono collegate rispettivamente ad un generatore di segnale e ad un oscilloscopio. Lo scopo di tale apparato sperimentale è quello di tradurre la variazione della grandezza misurata in un segnale elettrico al fine di eseguire misure accurate di determinati fenomeni fisici, mantenendo una bassa sensibilità ai disturbi esterni.

Il layout di laboratorio può essere tradotto in un'architettura dalla complessità non troppo elevata, riconducibile a circuiti analogici e digitali noti, per un utilizzo veloce e pratico.

### 2.2 Effetto Barkhausen

Il fenomeno fisico di Barkhausen che fu scoperto nel 1919 dall'omonimo scienziato di cui porta il nome ha luogo quando un materiale ferromagnetico è sottoposto ad un campo magnetico che varia nel tempo, infatti lo stato di

magnetizzazione del materiale non varia in maniera continua, ma con piccoli incrementi discreti (figura 2.1). Se il corpo soggetto al campo viene avvicinato ad una bobina di rilevamento quest'ultima vedrà ai suoi capi dei picchi di tensione, legati appunto alla brusca variazione della derivata del campo secondo la legge di Faraday-Neuman. Amplificando il segnale in uscita dalla bobina è possibile quindi rilevare in maniera precisa i cambiamenti del campo nel tempo e se tale segnale fosse portato come ingresso ad un altoparlante darebbe luogo al cosiddetto rumore di Barkhausen. I parametri che influenzano maggiormente questo comportamento sono lo stato tensionale del materiale e la sua durezza. Nei materiali magnetici duri il riallineamento dei domini di Weiss è più difficoltoso e questo porta a ridurre l'ampiezza dei salti magnetici e quindi il rumore ad essi collegato. Lo stato tensionale del componente influisce anch'esso sul fenomeno, infatti se il materiale è teso abbiamo un aumento del rumore e viceversa.

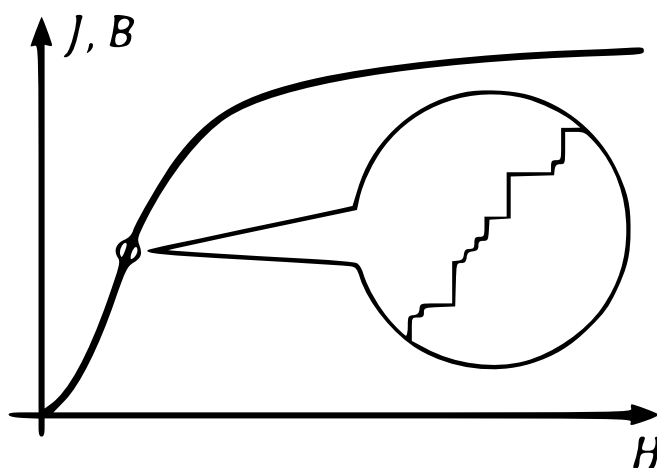


Figura 2.1: Salti di Barkhausen nello stato di magnetizzazione di un materiale ferromagnetico [10]

### 2.3 Principio di misura

Le misure effettuate mediante microfilì magnetici utilizzano molto spesso la proprietà di bistabilità del filo che in abbinata con l'induzione magnetica, permette di rilevare il raggiungimento del campo di commutazione e il passaggio da uno stato di saturazione all'altro. Passaggio il quale avviene in un unico salto di Barkhausen che genera nella bobina di rilevamento un picco di tensione.

Verrà di seguito analizzato nel dettaglio come applicare passo-passo questo principio, indicando le funzioni dei principali componenti impiegati. Un generatore di segnale in grado di produrre un'onda triangolare con ampiezza regolabile

è impiegato per alimentare la bobina di eccitazione con una tensione AC variabile nel tempo secondo un andamento triangolare. Tale segnale di alimentazione è in grado di produrre mediante la bobina un campo magnetico variabile nel tempo con andamento lineare crescente e decrescente. In questo modo è possibile magnetizzare e smagnetizzare lo spezzone di filo che si trova lungo l'asse o in prossimità delle bobine. Vi è una seconda bobina usata per la rilevazione, che rileva quando il microfilo commuta il suo stato dallo stato saturo inferiore a quello superiore. La bobina ai capi della quale si genera una tensione impulsiva dovuta al grande salto di Barkhausen è quindi connessa ad un oscilloscopio in grado di rilevare i picchi di tensione e il tempo che intercorre tra le varie commutazioni. Aumentando infatti la tensione di ingresso in maniera lineare anche il campo prodotto dalla bobina di eccitazione avrà andamento lineare monotono a tratti, e permetterà di avere una corrispondenza diretta tra tempo e campo applicato. In tal modo misurando il tempo che intercorre tra l'inizio della rampa del segnale di eccitazione e il punto in cui vi è un picco di tensione in uscita, ovvero il punto in cui viene raggiunto il campo di commutazione del ciclo di isteresi (figura 2.2) è possibile determinare il valore che assume quest'ultimo campo (equazione 2.1) e consapevoli della sua dipendenza dalle grandezze fisiche, giungere alla determinazione delle stesse.

$$H_{sw} \simeq (t_1 - t_2)/2 \quad (2.1)$$

L'equazione individua  $H$  come media dei tempi nel caso di campo magnetico esterno nullo, tuttavia nel caso non ideale, tale disturbo esterno va poi considerato in un secondo momento. Se sul microfilo oltre al campo prodotto dalla bobina di eccitazione agisce un campo esterno come quello terrestre o frutto di conduttori percorsi da corrente, allora esso può essere facilmente rilevato e non interferisce con il funzionamento del sensore nella gran parte dei casi. La presenza di un campo esterno infatti trasla il ciclo di isteresi del microfilo bistabile che non risulta più centrato sullo 0, ma spostato a destra o sinistra. Tale traslazione non ne modifica però la forma e quindi la funzionalità, a patto che il campo di eccitazione sia maggiore della somma di campo esterno e campo di commutazione.

Il valore del campo esterno potrà essere determinato come nell'equazione (2.2).

$$H_{ext} \simeq t_1 - t_2 \quad (2.2)$$

Un fattore che rende difficile isolare il campo esterno risiede nella frequenza di quest'ultimo, campi a bassa frequenza non creano problemi, mentre campi a frequenze più elevate non hanno contributi pienamente trascurabili.

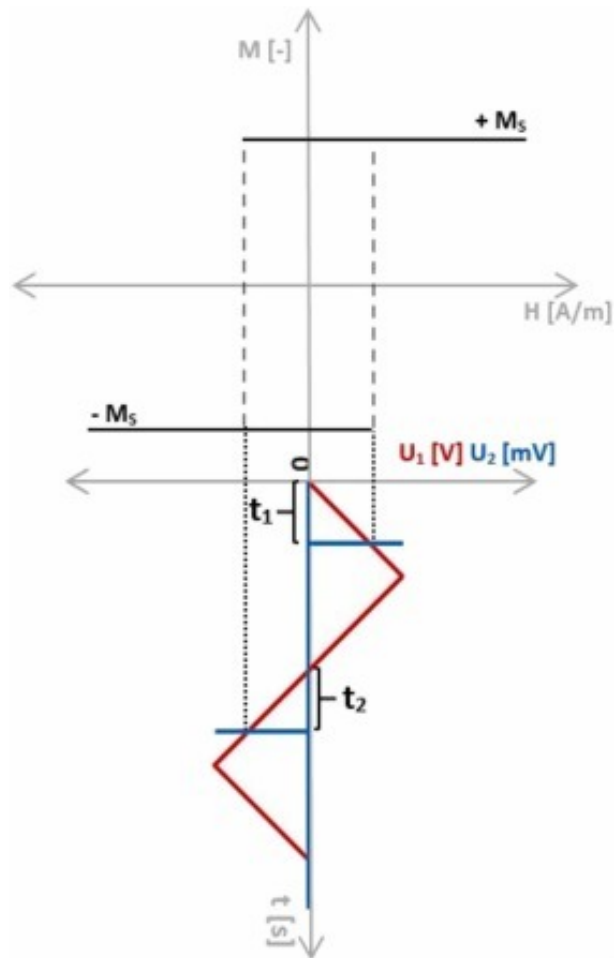


Figura 2.2: Tempi di commutazione corrispondenti ai salti di Barkhausen tra i due livelli di saturazione del ciclo di isteresi, con campo di eccitazione indicato sull'asse  $x$ . [6]

## 2.4 Magnetoimpedenza e rilevazione del campo magnetico

Oltre al metodo di rilevazione sopra descritto per l'acquisizione del campo magnetico si sfrutta talvolta una seconda metodologia basata sulla magnetoimpedenza, cioè sulla capacità del filo di variare la sua impedenza in base al campo magnetico che lo interessa. Tale proprietà è stata scoperta nel 1994 e da allora è stata largamente studiata, si basa infatti principalmente sulla variazione della profondità dell'effetto pelle. Quest'ultimo nei materiali magnetici si presenta a frequenze inferiori rispetto ai conduttori non magnetici e varia molto in funzione



del campo magnetico, dando origine a importanti variazioni di impedenza. Il microfilo in questione viene percorso da un piccolo segnale alternato a frequenza elevata e misurando la caduta di tensione su di esso è possibile determinare l'aumento di impedenza e quindi stabilire con precisione il valore del campo che lo ha generato (figura 2.3).

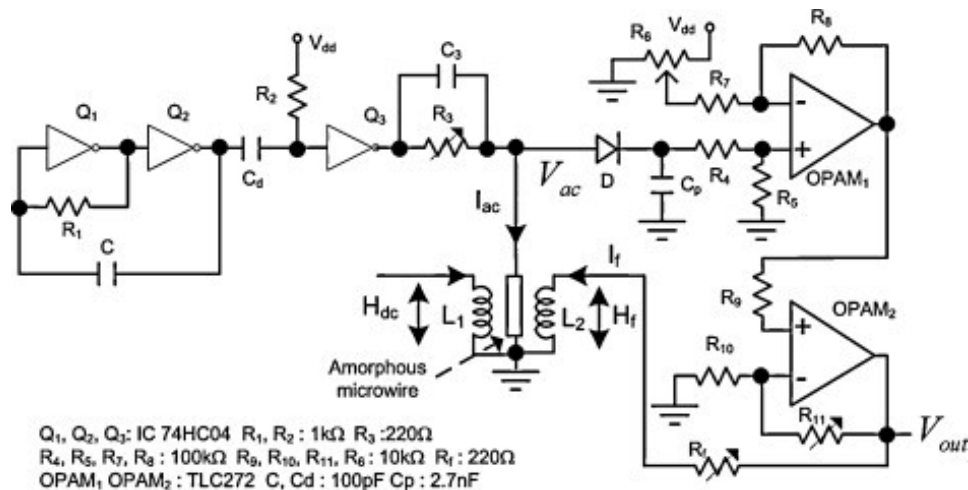


Figura 2.3: Schema di progetto sensore di campo magnetico GMI [8]

La risposta generalmente non è lineare, ma si possono apportare specifici accorgimenti al fine di linearizzare la risposta, ad esempio utilizzando due microfilari collocati in serie e polarizzati con due bobine in contro fase. Un altro dei problemi che si possono riscontrare, è la difficoltà di misurare campi elevati, perché si entra nella zona di saturazione del componente, per ovviare a ciò è possibile utilizzare una terza bobina di compensazione la quale circonda le due bobine e i microfilari precedentemente descritti e grazie all'applicazione di un campo continuo opposto a quello misurato permette di evitare la saturazione introducendo un offset noto che andrà poi sommato alla misura. Il campo di compensazione è dato da una corrente continua al fine di non generare tensioni nelle bobine di polarizzazione.

Tale tecnica sarà analizzata solamente in queste poche righe in quanto nella maggior parte delle misurazioni viene utilizzata la misura dei tempi di commutazione basati sulle proprietà di bistabilità del microfilo. Quest'ultima tecnica presenta maggior linearità e di fatto è la tecnica impiegata nella maggior parte delle applicazioni con microfilari magnetici.

## 2.5 Elettronica del sistema di misura

Da un primo approccio sperimentale in cui vengono utilizzati dei componenti

di dimensioni importanti (figura 2.4) e dalla praticità limitata si passa a componenti miniaturizzati e meno complessi, ma meglio implementabili nell'ottica dell'utilizzo reale.

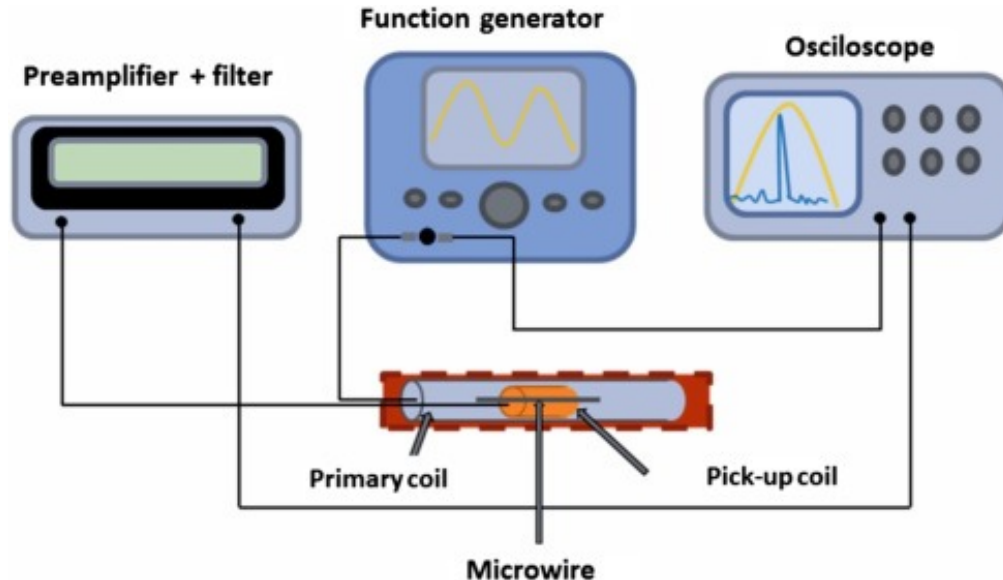


Figura 2.4: Rappresentazione del tipico layout di laboratorio impiegato[1]

Come si può notare la generazione del segnale è affidata a un generatore PWM presente a bordo di un microcontrollore collegato in cascata ad un opamp configurato come integratore che ha il compito di trasformare il segnale pulsato in uscita dalla PWM in una serie di rampe che rappresentano l'alimentazione per la bobina di eccitazione (figura 2.5). La raccolta del segnale di risposta è implementata attraverso un amplificatore operazionale con funzione di filtro passa alto con guadagno non unitario. Questo blocco infatti presentando un opamp in configurazione non invertente, con condensatore di disaccoppiamento in ingresso, permette solamente il passaggio delle componenti ad alta frequenza dando luogo ad un filtraggio passa alto congiuntamente ad un'amplificazione che può essere determinata mediante la definizione del ramo di retroazione. Il filtraggio ha il compito di rimuovere il rumore di fondo che entra nella bobina a causa di piccoli disturbi ambientali di origine magnetica. L'uscita dell'amplificatore operazionale viene posta in ingresso a una periferica di tipo timer del microcontrollore al fine di stabilire i tempi di commutazione del microfilo.

Le bobine verranno generalmente disposte in maniera concentrica, con il microfilo posto lungo il loro asse, infatti come noto, il campo magnetico di un solenoide lungo (dimensione assiale predominante su quella radiale) è concentrato lungo l'asse, perché le sue linee di campo si richiudono all'infinito con direzione

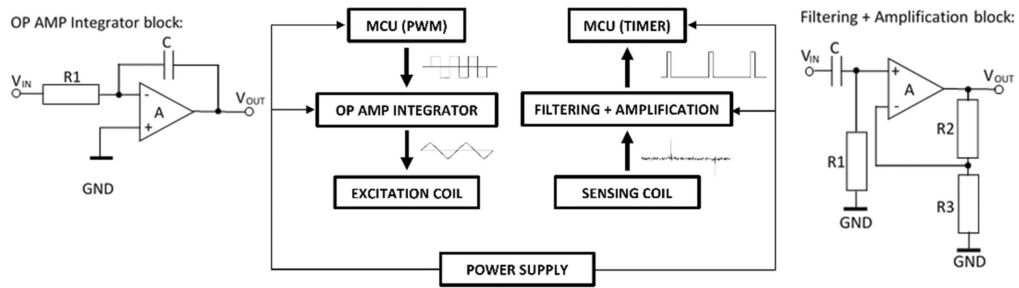


Figura 2.5: Esempio elettronica per sensore a microfilo magnetico [6]

pressoché lineare. Per applicazioni con solenoidi corti ci saranno delle dispersioni, perché alcune linee si richiudono fuori dall'asse, quindi il valore di induzione  $B$  sarà soggetto a delle riduzioni di un opportuno coefficiente.

È facile a questo punto intuire come il microfilo non necessiti di essere alimentato, ma gli altri componenti del sistema necessitano di un'alimentazione di potenza. Il microcontrollore e soprattutto gli amplificatori operazionali hanno bisogno di una tensione DC stabile e priva di armoniche per funzionare, quindi nel complesso il sistema richiede una fonte di energia per alimentare la sua elettronica. Tale alimentazione può provenire dalle porte USB del notebook o tablet a cui è connesso il microcontrollore, o da raddrizzatori connessi alla rete, ma nel caso più probabile e auspicabile di un utilizzo wireless, sarà fornita da un accumulatore al litio.



## Capitolo 3

# RV MAGNETICS E MICROFILI COMMERCIALI

### 3.1 Generalità

Nei capitoli precedenti è stato trattato l'aspetto teorico che si cela dietro un sensore tanto particolare quanto semplice nel suo principio di funzionamento. Lo sviluppo di tale sensore è tuttavia stato analizzato fin ora sotto un punto di vista prevalentemente legato alla ricerca e alle applicazioni universitarie o di laboratorio. Obiettivo primario e fondante di questo capitolo risulta quindi quello di analizzare il comportamento del sensore legato ad un'applicazione pratica e valutarne il funzionamento in rapporto alle aspettative teoriche.

L'analisi dei lavori e delle pubblicazioni dell'azienda leader in Europa nella realizzazione di sensoristica custom di questo tipo fornirà una visione più chiara degli aspetti salienti, permettendo una valutazione quanto più obiettiva e critica della tecnologia alla luce delle nozioni ingegneristiche apprese dall'autore.

### 3.2 RV Magnetics principale produttore mondiale

RV magnetics è una società di ricerca e sviluppo europea con sede in Slovacchia nata nel 2015 dalla volontà del professor Rastislav Varga e sviluppatasi poi grazie ad un team di ricercatori universitari che rappresentano più di metà del suo staff [15]. L'azienda infatti ha come colonna portante la ricerca di prodotti custom che interpretino al meglio le esigenze di misura del cliente tramite l'impiego del più piccolo sensore passivo la mondo. Il suo organico ha competenze trasversali che vanno dalla chimica, all'elettronica, passando per la fisica.

L'azienda ha ottenuto la certificazione ISO9001 secondo il modello 2015 nel 2018 e tra i suoi obiettivi primari risultano la soddisfazione delle aziende partner

e la massimizzazione del ROI (Return on Investment) dei propri clienti. Molti sono stati i premi legati al mondo delle start-up e all'innovazione a cui RV Magnetics ha partecipato ottenendo diversi riconoscimenti negli ultimi anni.

### 3.3 Mercato di interesse

I settori nei quali l'azienda opera sono molti, in particolare i seguenti sono quelli di maggiore interesse:

- biomedicale;
- monitoraggio strutturale;
- ingegneria civile e architettura;
- anticontraffazione;
- trasporti;
- aeronautica e automotive;
- petrolio e gas naturale.

### 3.4 Vantaggi di questa tecnologia

Nel breve elenco puntato che segue sono elencati i vantaggi dichiarati dall'azienda per i loro prodotti:

- dimensioni;
- versatile e multifunzione;
- sensore passivo e contactless: nessun cavo o batteria all'interno del materiale o paziente;
- sicuro con risonanza magnetica e raggi X;
- flessibile;
- basso consumo energetico;
- resistente e affidabile;
- monitoraggio in tempo reale;
- rilevamento senza scintille;

- biocompatibilità;
- trasferimento dei dati wireless.

### 3.5 Sostenibilità

I sensori, come ogni oggetto che nasce dall'ingegno umano, hanno un impatto ambientale dovuto all'estrazione delle materie prime di cui essi sono composti e ai processi tecnologici necessari alla loro produzione. Ultimo ma non meno importante il loro fine vita che ne determina una permanenza in ambiente più o meno nociva e processi di riciclo tra i più differenziati.

Gli oggetti fin qui trattati hanno un impatto ambientale che può essere analizzato sotto differenti aspetti. Facendo riferimento solamente al microfilo la sua composizione suggerisce come al suo interno siano presenti svariati metalli e del vetro borosilicato. La varietà di metalli presente è molto ampia e sono presenti anche materiali non comuni, tuttavia la quantità di lega impiegata nella produzione di lunghi tratti di sensori è di appena pochi grammi e questo contribuisce a rendere sostenibile ed economica la produzione di tali fili. In secondo luogo il rivestimento in vetro non è di facile riciclo; essendo la sua temperatura di fusione molto alta spesso esso finisce per non essere riciclato, ma smaltito come rifiuto non riciclabile. Gli unici motivi per cui potrebbe essere attuato un eventuale riciclo risiederebbero nel recupero dei materiali metallici, ma questo risulterebbe alquanto improduttivo e costoso vista la ridotta quantità e la forte adesione che anima e guscio presentano. In definitiva vista la piccola quantità di lega, nota anche la grande difficoltà di separazione e la lunga vita utile dei microfili (circa 1000 anni) è auspicabile pensare che il microfilo venga smaltito nella sua interezza come rifiuto secco. La biocompatibilità rende innocuo il sensore nel caso esso venga disperso in ambiente, questo sarebbe infatti in grado di mantenersi inalterato per migliaia di anni senza contribuire all'inquinamento del suolo con sostanze pericolose.

Nell'ottica della sostenibilità e del rispetto ambientale la presenza del solo filo annesso nei materiali compositi o incollato sulle strutture di veicoli rappresenta un peso trascurabile e contribuisce quindi a ridurre le emissioni mantenendo comunque la possibilità di monitorare i dati strutturali. Un ulteriore aspetto che rende il sensore sostenibile è la possibilità di rilevare più grandezze con un unico apparato, riducendo l'impiego di materiale e pesi ridondanti a bordo delle macchine.

### 3.6 Sensore di allungamento, misura dello stress meccanico

Alcune tra le applicazioni principali dei microfili prodotti dall'azienda, riguardano la misura delle deformazioni nelle strutture metalliche e nei materiali in genere. Nel caso in esame è stata effettuata una misurazione classica con prova di trazione su barra in alluminio di 140 x 15mm, con spessore 2mm [9]. La prova è stata eseguita con macchina di trazione universale calibrata secondo EN ISO 7500-1 con incertezza di spostamento di 1  $\mu\text{m}$  (figura 3.1).

Sulla lastra è stato incollato mediante collante (cianoacrilato) un microfilo di lunghezza pari a 20 mm e il sistema di rilevamento è stato posto sopra la zona di incollaggio (figura 3.2).

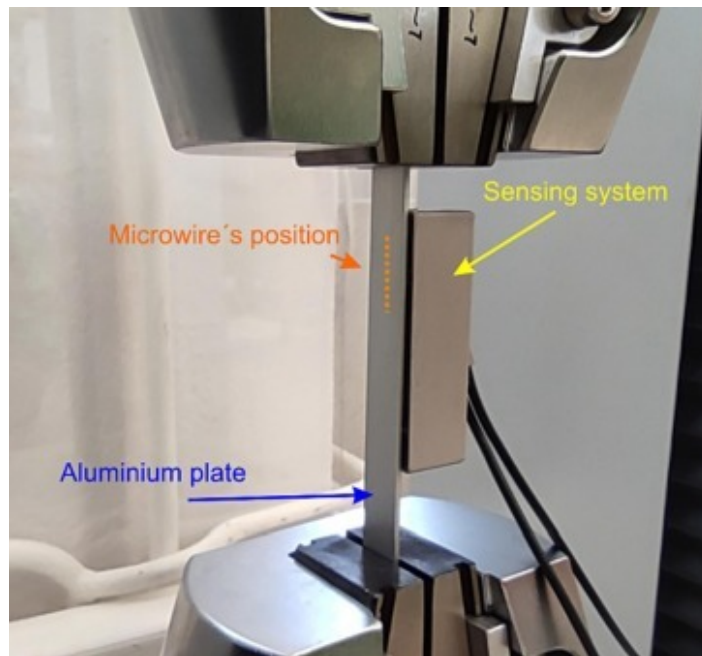


Figura 3.1: Prova di trazione universale sul provino in alluminio e raccolta dati [9]

Il carico applicato ciclicamente era di entità tra 12 N e 2000 N. Il segnale proveniente dalla bobina di rilevamento è stato analizzato mediante oscilloscopio e la rilevazione temporale della posizione dei picchi è stata effettuata manualmente con incertezza sulla scala temporale dell'oscilloscopio di 1  $\mu\text{s}$ .

È stata eseguita inoltre una prova di flessione su una barra metallica di lunghezza 600mm e sezione di 80x3 mm (figura 3.3) con modalità simili alle



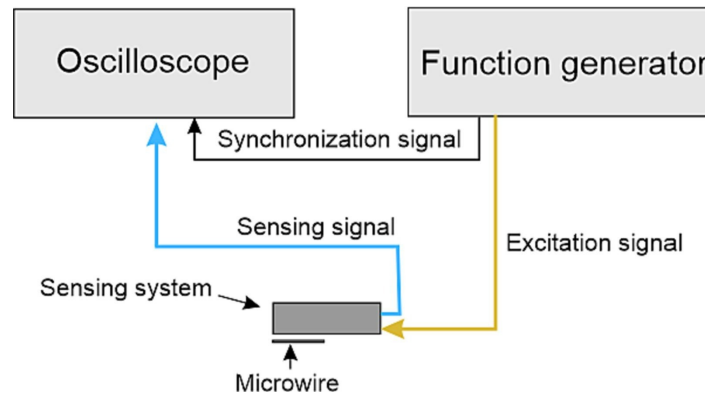


Figura 3.2: Schema di collegamento apparecchiature [9]

precedenti. La deformazione è stata mantenuta entro il limite elastico del materiale con il sensore posizionato ad una distanza di 100 mm dall'incastro della lamina a sbalzo. Per la prova di flessione è stato impiegato il microfilo Fe 75 Si 9 B 10 P 5 Tb 1 e le misurazioni sono state confrontate con i valori forniti dall'estensimetro FLAB-6-11 di dimensioni 4x11 mm (Tokyo Measuring Instruments Laboratory Co., Ltd.) [9] posizionato alla medesima distanza dall'incastro sopra citato e collegato a quarto di ponte.

La temperatura ambiente costante ha permesso di trascurare l'errore dovuto alla dilatazione termica. Oltre all'estensimetro e al sensore a microfilo sulla lamina è stato posizionato un comparatore a distanza di 50 mm dall'estremo libero della trave per monitorare la freccia. Tutti i dispositivi di misura sono stati azzerati con trave scarica per poi procedere gradualmente con il caricamento della struttura in maniera progressiva e discreta. La misurazione del tempo di commutazione del microfilo è stata eseguita nel medesimo modo della precedente prova di trazione.

### Risultati pratici delle misurazioni

#### Risultati prova di trazione

Dalla prova di trazione si denota una correlazione lineare tra carico e deformazione del provino in alluminio come mostrato nel grafico (figura 3.4). Ciò evidenzia come la deformazione in campo elastico sia correttamente rilevata dal sistema. Il tutto trova conferma anche nei valori rilevati mediante l'estensimetro a resistenza.

I dati raccolti sono stati riassunti come di seguito riportato (figura 3.5).

#### Risultati prova di flessione

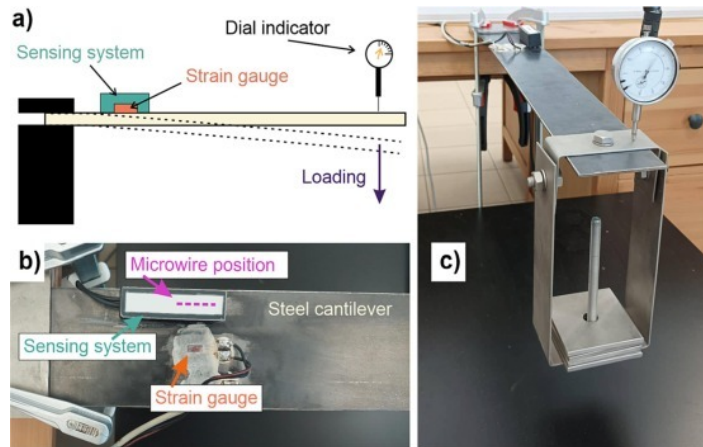


Figura 3.3: Strumentazione necessaria alle operazioni di test del sensore sperimentale [9]

La flessione conferma i risultati ottenuti in precedenza durante la prova di trazione (figura 3.6), con l'isteresi che risulta comunque entro valori bassi e accettabili.

L'analisi ha inoltre evidenziato che l'accuratezza della misura temporale di commutazione è di circa lo 0,05%. L'isteresi in alcuni punti può essere imputata anche a deformazioni residue, tuttavia i valori riscontrati risultano in linea con quelli della medesima tecnologia applicata ad altri materiali. Di seguito la sintesi dei dati raccolti nella prova di trazione (figura 3.7).

Dall'analisi dei valori raccolti è possibile stabilire la funzione di trasferimento del sensore (figura 3.8).

Importante sottolineare che la risoluzione e l'incertezza delle misure dipendono fortemente dalla risoluzione con cui vengono rilevati i tempi inoltre l'incertezza viene inficiata dalle eventuali fluttuazioni del campo di commutazione, dovute a disturbi esterni. Utilizzando un microcontrollore con una risoluzione pari a circa 10 ns, l'accuratezza del sensore di deformazione può raggiungere valori di  $6 \times 10^{-6} \text{m}$ .

### Conclusioni sul sensore esaminato

La prove sperimentali sui sensori prodotti dall'azienda dimostrano la possibilità di impiegare i sensori a microfilo su materiali ferromagnetici e non, con risultati di misura coerenti nei due casi, ma soprattutto confermati dal raffronto con le tradizionali tecnologie estensimetriche. La variazione del tempo di commutazione è legata in maniera proporzionale lineare alla deformazione con errori dello 0.05%. Fondamentale risulta la calibrazione del sensore, la quale può essere svolta tramite adattamento lineare della relazione tra ingresso e uscita del sensore.

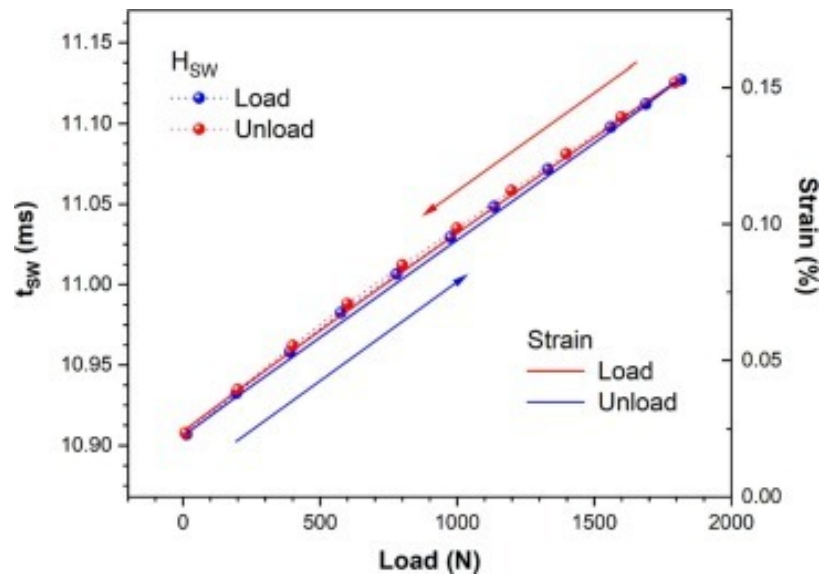


Figura 3.4: Risultati delle misurazioni sperimentali durante la prova di trazione con microfilo magnetico [9]

La natura bistabile del microfilo lo rende immune dai disturbi magnetici esterni nella misurazione. Un ulteriore vantaggio risiede nella possibilità di eseguire la misurazione senza contatto, con sistema acquisizione posto a diversi cm dal punto in cui è incollato sul materiale ferromagnetico lo spezzone di filo sensibile. Tutto ciò permette di eseguire misure su punti inaccessibili, o misure di deformazione interna dei materiali compositi, tuttavia la presenza di spessori di materiale ragguardevoli o di forti campi esterni (campi elevati o a frequenze importanti) può limitare l'impiego di tale tecnica.

Approccio alla misurazione	La variazione totale rilevata a 2 kN	Isteresi a 1 kN	Isteresi a 1 kN (%)
Indicatore di allungamento	0,21 mm	3,4 $\mu\text{m}$	1,7%
Sensore a microfilo	220 $\mu\text{s}$	2,82 $\mu\text{s}$	1,28%

Figura 3.5: Riassunto dei risultati della prova di trazione[9]

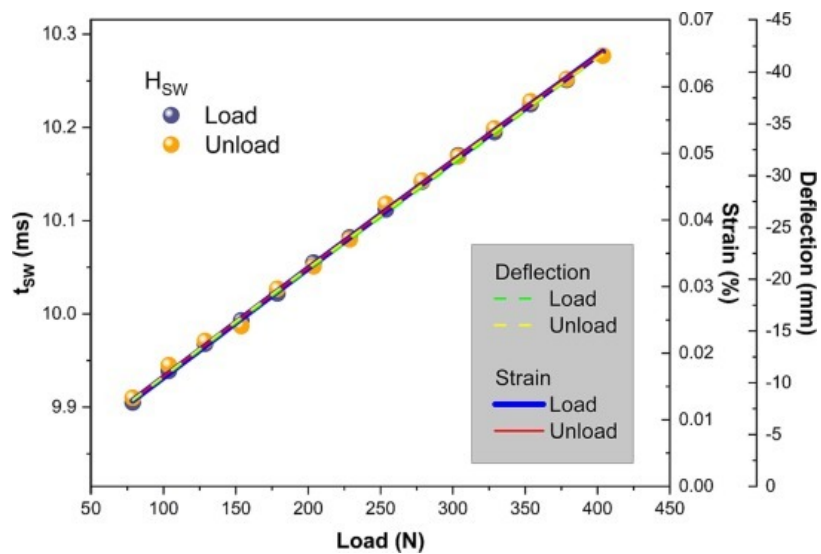


Figura 3.6: Sovrapposizione e raffronto dati delle due prove meccaniche [9]

Approccio alla misurazione	La variazione totale rilevata a 0,4 kN	Isteresi a 0,2 kN	Isteresi a 0,2 kN (%)
Indicatore a quadrante (deflessione)	41,7 mm	1,42 mm	0,27 %
Estensimetro	653 $\mu\text{m}/\text{m}$	0,2 $\mu\text{m}/\text{m}$	0,48%
Sensore a microfilo	338 $\mu\text{s}$	2,9 $\mu\text{s}$	0,85%

Figura 3.7: Tabella riassuntiva dei risultati della prova di flessione [9]

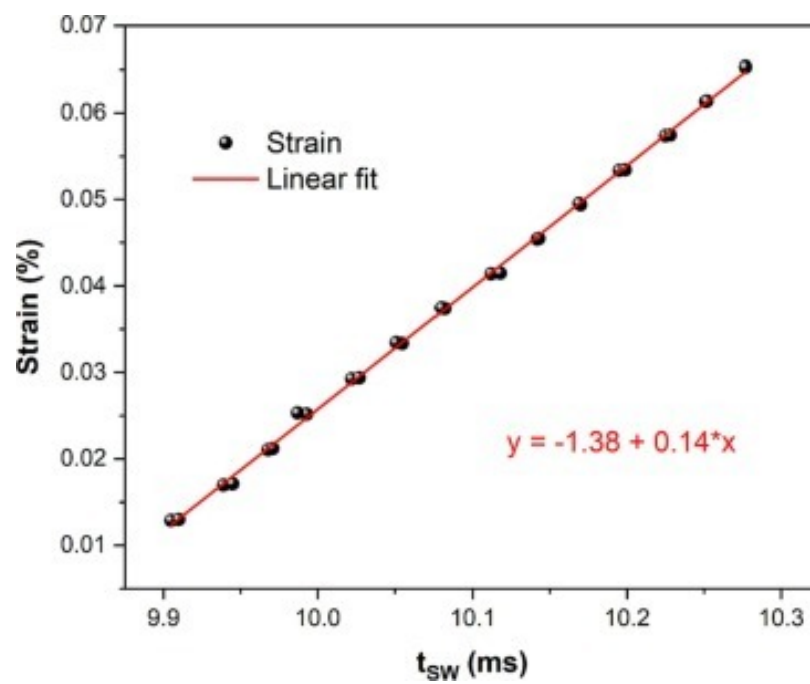


Figura 3.8: Fitting della transcaratteristica del sensore [9]



## Capitolo 4

# SENSORI DI DEFORMAZIONE A CONFRONTO

### 4.1 Generalità

In quest'ultimo capitolo della trattazione verrà inserito un confronto tra le proprietà di diversi sensori con le medesime funzionalità, ma con diverse caratteristiche e principi di funzionamento. In particolare l'obiettivo è quello di confrontare diversi sensori di allungamento con principi di misura diversi al fine di evidenziare vantaggi e svantaggi di ognuno di essi.

La scelta è ricaduta su sensori LVDT, estensimetri e i sensori di allungamento basati sui microfili.

### 4.2 Estensimetri

Gli estensimetri sono strumenti di misura adatti alla misurazione di piccole deformazioni di componenti dovute a dilatazioni termiche o sollecitazioni meccaniche. Tali misurazioni sono utili al fine di calcolare le tensioni a cui il materiale è sottoposto, infatti conoscendo lo stato della deformazione e le caratteristiche del materiale è possibile risalire al suo stato tensionale.

Nonostante ne esistano di diverse tipologie, quelli più utilizzati sono gli estensimetri a resistenza che si basano sull'impiego di diverse resistenze appositamente collegate. Un estensimetro si compone di due elementi principali, matrice e griglia (figura 4.1). La matrice è il supporto generalmente costituito da una resina rinforzata con fibre di vetro sulla quale giace la griglia composta da un conduttore di lunghezza variabile fino a qualche metro. Gli estensimetri saldabili presentano in aggiunta una piastrina metallica saldabile.

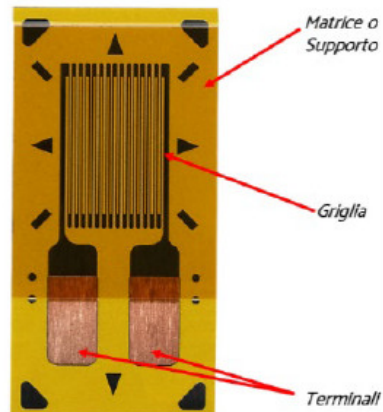
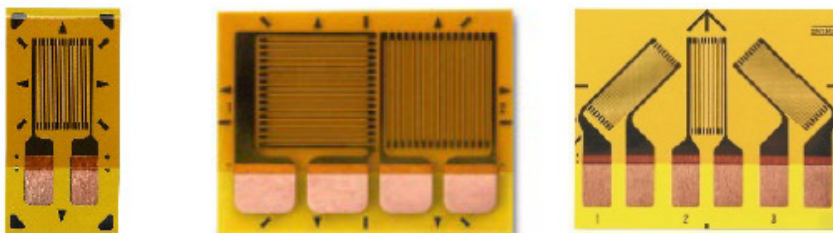


Figura 4.1: Parti costitutive di un estensimetro a resistenza [11]

La resistenza tipica di un estensimetro si attesta su valori di  $120 \div 350$  Ohm o  $1000$  Ohm. Altro dato importante nella scelta dell'estensimetro risulta il coefficiente di compensazione termica, che va scelto in base alla conducibilità termica del materiale su cui andrà applicato il sensore.

#### Tipologie di estensimetri

- Estensimetro singolo: presenta 1 sola griglia
- Rosetta estensimetrica: 2 o più griglie (figura 4.2)



*Da sinistra: estensimetro lineare, rosetta a T e rosetta rettangolare.*

Figura 4.2: Tipologie di estensimetri [11]

#### Principio su cui si basa la misura



In maniera semplificata si può affermare che la resistenza dell'estensimetro varia in maniera proporzionale alla deformazione, tuttavia anche le variazioni di temperatura rischiano di inficiare la misura. La variazione di resistenza è misurata a mezzo del ponte di Wheatstone che a seconda del numero di estensimetri disposti lungo i suoi rami darà luogo alle seguenti configurazioni:

- Quarto di ponte: una delle 4 resistenze del ponte è sostituita da un estensimetro al fine di utilizzare quest'ultimo per la misura di stress meccanici.
- Mezzo ponte: due estensimetri impiegati solitamente per la misura di flessione.
- Ponte intero: utilizza 4 estensimetri per realizzare misure di torsione.

Le resistenze impiegate nella costruzione del ponte hanno una tolleranza molto più ristretta delle normali resistenze commerciali al fine di garantire una risoluzione elevata.

#### **Principali cause degli errori di misura**

I principali errori nella misurazione sono riconducibili alle variazioni di temperatura e alla mancata compensazione delle lunghezze dei cavi che collegano il ponte all'estensimetro.

La correzione degli errori di temperatura può essere fatta con due principali metodologie. Può essere impiegato un secondo estensimetro compensatore sottoposto solamente al salto di temperatura in modo da poter sottrarre l'offset dovuto alla temperatura dalla misura. Al fine di attuare tale sottrazione è sufficiente collegare i due estensimetri a rami adiacenti del ponte (figura 4.3). Un secondo metodo consiste nell'impiegare le curve per la compensazione termica fornite dai costruttori, esse rappresentano la deformazione subita per effetto termico dal provino. In questo modo si può determinare la deformazione reale dovuta alle forze esterne sottraendo alla deformazione misurata il valore della deformazione di origine termica.

Gli errori dovuti al collegamento dell'estensimetro tramite cavi, sono riconducibili alla resistenza offerta dagli stessi conduttori che attenua il segnale. Per ovviare a tale inconveniente e compensare l'errore si può procedere alla misura della resistenza dei cavi, oppure si può impiegare una resistenza di shunt posta in parallelo a uno dei rami, la quale simula una ben precisa deformazione e nel caso in cui la deformazione dell'estensimetro risulti inferiore di quella imposta dalla resistenza si calcola un coefficiente di compensazione.

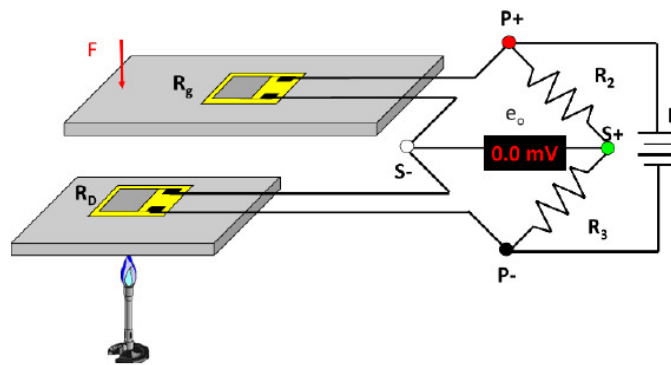


Figura 4.3: Correzione errori dovuti alla deformazione termica con estensimetro compensatore [11]

### 4.3 LVDT

Gli LVDT (Linear Variable Differential Transformer) sono sensori induttivi utilizzati per la misura di spostamenti lineari e deformazioni, caratterizzati da una buona accuratezza e dinamica (figura 4.4).



Figura 4.4: Esempio di LVDT commerciali [14]

Il sensore presenta 4 elementi principali (figura 4.5).

- Avvolgimento primario: è posto tra i due avvolgimenti secondari e viene alimentato tramite un generatore AC con un segnale di frequenza variabile a seconda della dinamica che vogliamo ottenere nella misurazione.
- Avvolgimenti secondari: sono posti ai lati del primario, avvolti in contro fase e collegati in serie tra loro. In questo modo ai loro capi si induce una fem che è la differenza delle fem indotte in ciascuno di essi.

Quando il nucleo risulta centrato tra essi la fem risultante e quindi l'uscita del sensore sono nulle, mentre se il nucleo si sposta la fem varia in maniera proporzionale in funzione dello spostamento.

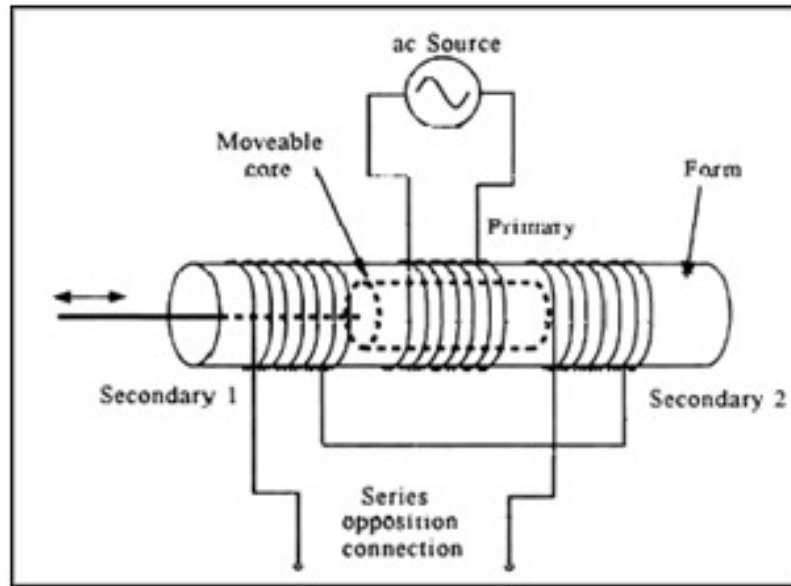


Figura 4.5: elementi costitutivi di un LVDT [13]

- Nucleo ferromagnetico: rappresenta la parte mobile del sensore e con la sua elevata permeabilità magnetica garantisce l'accoppiamento tra i vari avvolgimenti.

#### Tipologie di LVDT

- LVDT a nucleo libero: il nucleo è fissato alla parte in movimento mentre non risulta in contatto con la parte degli avvolgimenti e in tal modo si evitano attriti. Questa configurazione garantisce dinamica elevata per vibrazioni o spostamenti di entità limitata.
- LVDT a nucleo guidato: sono utilizzati per spostamenti più ampi e presentano cuscinetti a sfere lineari o boccole guida in teflon per mantenere in guida il nucleo.
- LVDT tastatore: quest'ultima tecnologia utilizza il medesimo layout del modello a nucleo guidato, ma presenta una molla che mantiene in contatto la parte mobile con l'oggetto da misurare. Tale layout funziona per misure statiche o per spostamenti lenti.

Una seconda distinzione possibile si basa sull'alimentazione del sensore, si possono infatti distinguere due tipologie.

- LVDT AC: La sua bobina primaria è alimentata direttamente da una portante AC tuttavia ciò costringe ad utilizzare un generatore ed un condizionatore di segnale esterni. Come vantaggio però si ha l'assenza di elettronica a bordo.

- LVDT DC: il sensore è dotato di elettronica a bordo cioè viene alimentata in Dc la sua elettronica che provvederà poi a generare il segnale AC per la sua bobina primaria. Questo rende il sensore di più più facile impiego tuttavia presenta anche degli svantaggi.

L' assenza di elettronica negli LVDT AC fornisce congiuntamente due vantaggi cioè dimensioni inferiori e una tolleranza alle vibrazioni nettamente superiore (come noto componenti di massa non trascurabile e saldature in generale tendono a dissaldarsi sotto l'azione di vibrazioni). La minor complessità del sensore rende quindi questa tipologia più affidabile e longeva della sua controparte DC. I componenti DC presentano tempi e complessità di installazione nettamente inferiori e permettono un'interfaccia facilitata con i sistemi informatici di acquisizione dati.

### Vantaggi

- Affidabilità: longevità del sensore grazie al funzionamento quasi privo di attrito.
- Resistente: mantenendo aperte le due estremità del sensore si evitano danni per misure fuori range, tuttavia questo porta ad esporre le parti interne del sensore a sporco e liquidi.
- Alta risoluzione: capacità di rilevare anche gli spostamenti più piccoli senza attriti con una risoluzione altissima.
- Stabilità dello zero: alta ripetibilità dello zero dovuta alle caratteristiche di costruzione dell'apparato.
- Ampio range termico di funzionamento: alcuni modelli sono in grado di operare con temperature tra i  $-200^{\circ}\text{C}$  e i  $650^{\circ}\text{C}$ .
- Bassa isteresi ed elevata precisione.
- Uscita assoluta: l'uscita del sensore fornisce un valore assoluto di posizione e anche nel caso venga disalimentato alla sua riaccensione fornirà il medesimo valore a patto che il componente non si sia mosso.

### Svantaggi

- Range di misura limitato: solitamente impiegati per piccoli spostamenti (massimo 1m).
- Risente dei disturbi magnetici: la presenza di campi magnetici esterni genera negli avvolgimenti secondari delle tensioni che possono invalidare le letture, si rende spesso necessaria un'ingombrante schermatura per ovviare al problema.

- I modelli AC richiedono una precisa eccitazione fornita da un condizionatore di segnale.
- I modelli LVDT DC hanno specifiche inferiori di shock, vibrazioni e temperatura rispetto ai modelli LVDT AC.

## 4.4 Sensore di posizione a microfilo magnetico

### Sensore LPS

Il sensore di posizione lineare (LPS) (simile a LVDT) si basa su un microfilo magneticamente bistabile ed è composto da due bobine come di consueto (figura 4.6).

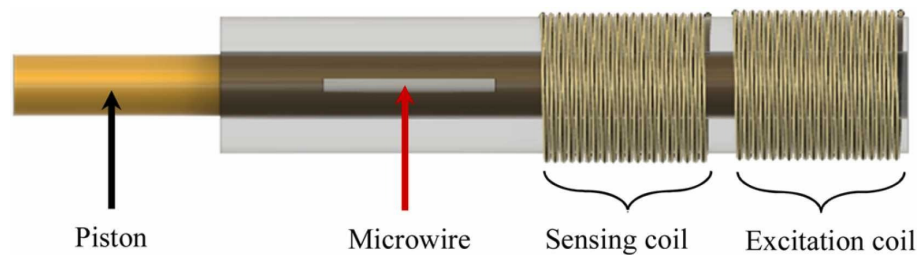


Figura 4.6: Rappresentazione schematica di un sensore LPS [6]

Per il sensore in esame è stato scelto un microfilo con composizione chimica Fe 77,5 Si 7,5 B 15 . Il microfilo utilizzato possiede magnetostrizione positiva e bistabilità magnetica. Il campione impiegato misura circa 30 mm, con diametro del nucleo di  $39 \mu\text{m}$ , e diametro totale del microfilo di  $71 \mu\text{m}$  [6]. Il microfilo è posto su un pistone di diametro 3mm in asse con le bobine, mentre la bobina di eccitazione è di  $\phi 10 \times 20$  mm. Accanto alla bobina di eccitazione è posta la bobina di rilevamento, la quale possiede le medesime dimensioni di quella sopra descritta. L'input range del sensore risulta pari a 20 mm.

A differenza dei tradizionali sensori LVDT il sensore in questione impiega la lettura a mezzo della variazione del campo di commutazione come descritto nel capitolo due, nella sezione riguardante il principio di misura (figura 4.7). Come di consueto fatte le dovute premesse valgono le condizioni di reiezione ai campi esterni. La dipendenza dalla temperatura per impieghi comuni è trascurabile o comunque facilmente isolabile utilizzando microfilo con elevata temperatura di Curie.

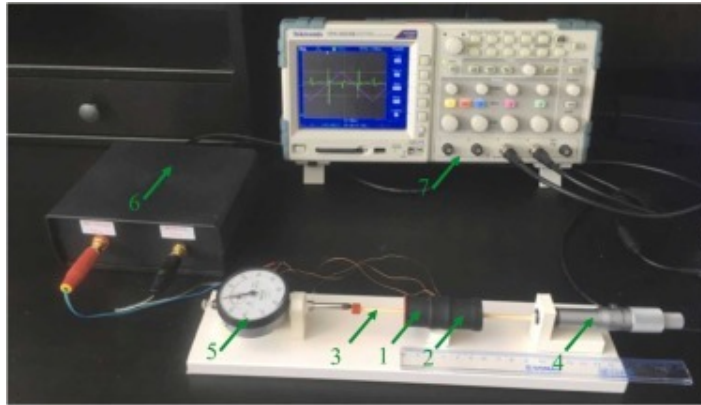


Figura 4.7: Strumentazione necessaria alle operazioni di test del sensore sperimentale [6]

Se il microfilo non è posto assialmente alle bobine, ma all'esterno, sarà necessario impiegare una corrente maggiore al fine di eccitare lo stesso come mostra il grafico seguente (figura 4.8).

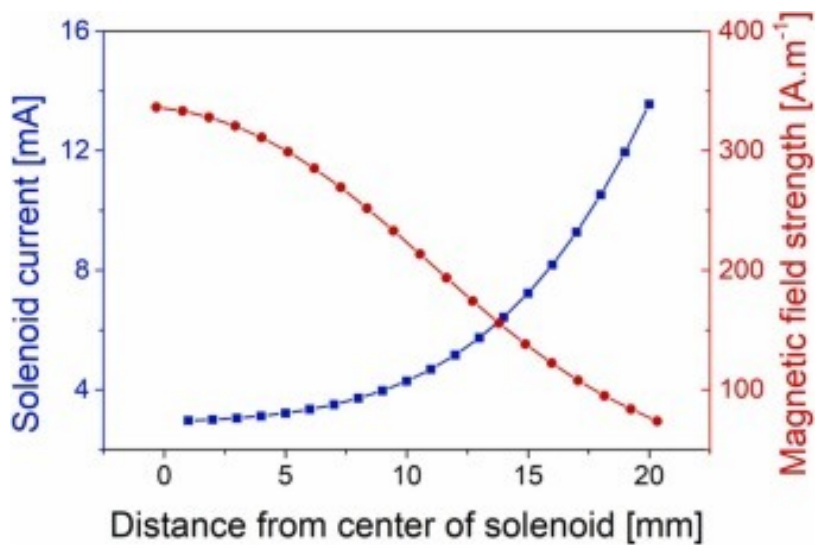


Figura 4.8: Dipendenza corrente-distanza del microfilo dal solenoide [6]

Nel presente sensore viene impiegata questa proprietà per cui la magnetizzazione di uno spezzone di filo risulta più debole e difficoltosa quando esso si allontana dalla bobina di eccitazione. Tutto questo essendo il sensore alimentato con una tensione di forma triangolare si traduce in un aumento dei tempi di commutazione. Tempi che danno quindi una diretta lettura della posizione assiale del pistone. La misurazione tiene conto solo dei momenti in cui vengono

rilevati i picchi di commutazione (figura 4.9), e non della loro ampiezza o forma. Questo porta ad una semplice costruzione della bobina che indipendentemente dalle dimensioni mostrerà in maniera nitida i picchi di tensione del segnale in uscita che appositamente filtrato e amplificato potrà essere collegato in ingresso all'elettronica dedicata.

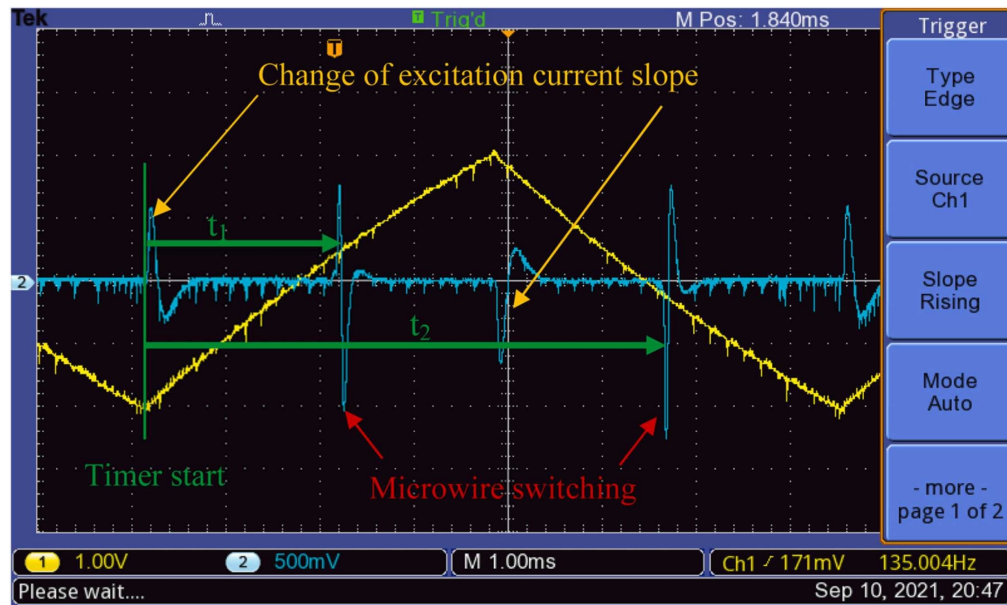


Figura 4.9: Segnale in uscita dalla bobina di rilevamento [6]

Al fine di dimostrare che il principio di misura rimane valido e il sistema è immune ai normali campi esterni sono state condotte diverse misurazioni con il sensore posto ad angolazioni differenti rispetto al campo terrestre. Sono state ottenute funzioni in uscita che rispecchiano la medesima equazione di riferimento ma traslata e questo sottolinea che il funzionamento è indipendente dal campo esterno. Le funzioni sono diverse per ogni angolazione dato che il campo esterno varia in ognuna di esse. Ciò permette all'LPS di misurare contemporaneamente campo magnetico esterno e posizione in maniera distinta e indipendente.

Impiegando un sensore con microfilo con elevata temperatura di Curie pari a circa  $440^{\circ}\text{C}$  si ottiene una variazione molto leggera del campo di commutazione (che è funzione anche della temperatura), soprattutto per valori di temperatura lontani dalla temperatura di Curie e nel range delle temperature ambientali dai  $15^{\circ}\text{C}$  e  $50^{\circ}\text{C}$  (figura 4.10). La perturbazione dell'uscita rilevata in seguito al cambio di temperatura da luogo ad uno scostamento/errore dello  $0.19\%$  corrispondente a  $37\ \mu\text{m}$ .

Riassumendo quanto sopra illustrato si tratta di un sensore di posizione lineare basato sulle caratteristiche dei microfilati magneticamente bistabili. In alternativa alla variazione di permeabilità con la posizione del pistone tra le due

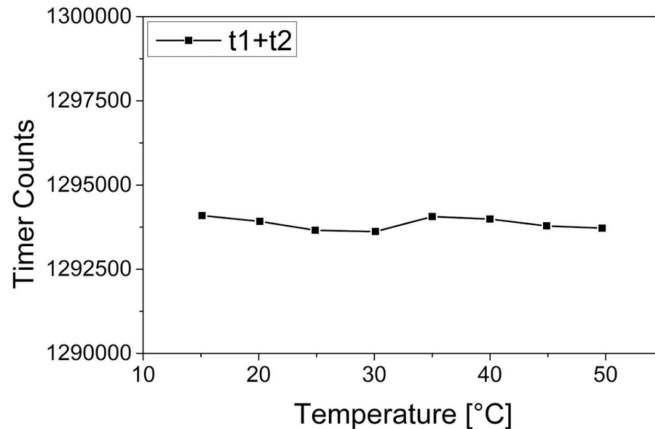


Figura 4.10: Segnale in uscita dalla bobina di rilevamento e relative variazioni dovute alla temperatura [6]

bobine (LVDT), esso sfrutta la dipendenza della corrente di commutazione dalla posizione del microfilo rispetto alla bobina di polarizzazione. Utilizzando una forma triangolare della corrente di eccitazione è possibile collegare proporzionalmente la variazione di corrente al tempo di commutazione, permettendo una rilevazione semplificata.

È possibile ottenere un'elevata risoluzione fino a 1  $\mu\text{m}$  con sistema LPS completamente indipendente dalla temperatura e dai campi magnetici esterni.

I principali vantaggi del sistema LPS rispetto a LVDT risultano pertanto:

- bassa dipendenza dalla temperatura;
- alta risoluzione;
- indipendenza dal campo magnetico esterno;
- possibile misura congiunta di posizione e campo esterno.

Da quanto sopra riportato emerge la netta superiorità del sensore LPS soprattutto in termini di reiezione ai disturbi e capacità di misurare più grandezze contemporaneamente.

Dal confronto tra i sensori di stress meccanico a microfilo e gli estensimetri risultano evidenti alcune differenze non tanto sulle proprietà metriche del sistema, bensì sugli ingombri più ridotti dell'estensimetro che tuttavia necessita di cablaggi e risente della temperatura. Estensimetro il quale va comunque applicato solo in superficie e non permette rilevazioni contactless o l'impianto su tessuti viventi. Nel complesso due tecnologie paragonabili, ma adatte talvolta ad impieghi differenti.



# Conclusione

La trattazione fin qui presentata ha avuto fin da subito lo scopo di analizzare in maniera quanto più approfondita, ma allo stesso tempo semplice, una tecnologia relativamente giovane. Un sensore moderno basato su solidi principi della fisica classica che promette e mantiene prestazioni ragguardevoli in tutti i campi d'impiego che lo caratterizzano. Le sue dimensioni risultano competitive almeno per quanto riguarda il microfilo, anima del sistema di misura che si compone tuttavia anche di altri elementi più tradizionali i quali limitano le virtù del prodotto complessivo. Alcuni tra i principali vantaggi riscontrati sono stati l'immunità ai disturbi elettromagnetici e la possibilità di rilevare diverse grandezze contemporaneamente anche con il sensore annesso nel materiale. La produzione del filo stesso è sostenibile e a basso costo come del resto l'implementazione della sua elettronica. Resistenza e durata del sensore sono innegabilmente superiori a qualsiasi altra tecnologia e i parametri dello stesso si attestano su valori almeno paragonabili con le tecnologie più tradizionali se non superiori.

Una domanda sorge presto spontanea dopo quanto appreso fin ora e riguarda la mancata diffusione di questa tecnologia su larga scala nonostante le sue innegabili qualità. La risposta verte principalmente su due aspetti ossia il fatto che ogni singola applicazione implica uno studio dedicato del sistema e del microfilo da impiegare e il costo di sviluppo che ricopre un ruolo importante, infatti la prototipazione di un nuovo sistema presso RV Magnetics ha un costo di circa 25000 euro per ogni mese di lavoro.

Nel complesso una tecnologia innovativa e giovane che regala molti vantaggi ad un costo oggi non così modico, ma che grazie alla frizzante ricerca promette importanti sviluppi futuri in diversi campi d'impiego.



# Bibliografia

- [1] R. Jurc, L. Frolova, D. Kozejova, L. Fecova, M. Hennel, L. Galdun, K. Richter, J. Gamcova, P. Ibarra, R. Hudak, I. Sulla, D. Mudronova, J. Galik, R. Sabol, T. Ryba, L. Hvizdos, P. Klein, O. Milkovic, Z. Vargova, and R. Varga, “28 - sensoric application of glass-coated magnetic microwires,” in *Magnetic Nano- and Microwires (Second Edition)* (M. Vázquez, ed.), Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, pp. 833–868, Woodhead Publishing, second edition ed., 2020.
- [2] “Il ferromagnetismo.” Online available <http://www.matematicaescola.it>, 2002.
- [3] “Isteresi.” Online available <https://it.wikipedia.org/wiki/Isteresi>, 2023.
- [4] W. Grodkiewicz, “Fused silica fibers with metal cores,” *Materials Research Bulletin*, vol. 10, no. 10, pp. 1085–1090, 1975.
- [5] V. Larin, A. Torcunov, A. Zhukov, J. González, M. Vazquez, and L. Panina, “Preparation and properties of glass-coated microwires,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 249, no. 1, pp. 39–45, 2002. International Workshop on Magnetic Wires.
- [6] P. Jacko, R. Jurč, L. Galdun, Ľudovít Hvizdoš, D. Kováč, and R. Varga, “Linear position sensor using magnetically bistable microwire,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 349, p. 114017, 2023.
- [7] A. Díaz-Rubio, H. García-Miquel, and V. M. García-Chocano, “In-plane omnidirectional magnetic field sensor based on giant magneto impedance (gmi),” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 444, pp. 249–255, 2017.
- [8] J. Olivera, C. de la Cruz-Blas, and C. Gómez-Polo, “Comprehensive analysis of a micro-magnetic sensor performance using amorphous microwire mi element with pulsed excitation current,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 168, no. 1, pp. 90–94, 2011.

- 
- [9] M. Al Ali, P. Platko, V. Bajzecerova, S. Kusnir, S. Kmet, S. Nalevanko, A. Spegarova, L. Galdun, and R. Varga, "Application of bistable glass-coated microwire for monitoring and measuring the deformations of metal structural members," *Measurement*, vol. 208, p. 112458, 2023.
- [10] "Effetto barkhausen." Online available <https://it.wikipedia.org/wiki>, 2021.
- [11] L. srl, "Nota tecnica nt-119." Online available <https://www.luchsinger.it/contents/products/estensimetri-elettrici-a-resistenza.pdf>.
- [12] "Misura di posizione e spostamento con sensori lvdt." Online available <https://dewesoft.com/it/blog/misura-di-posizione-e-spostamento-con-lvdt>, 2020.
- [13] "Misurazione di posizione e spostamento con lvdt." Online available <https://www.ni.com/it-it/shop/data-acquisition/measuring-position-and-displacement-with-lvds.html>, 2023.
- [14] "Panoramica del prodotto." Online available <https://www.waycon.biz/products/>.
- [15] "Azienda." Online available <https://www.rvmagnetics.com/about-us>.

# Elenco delle figure

1.1	Microfilo magnetico composito con nucleo in lega metallica ricoperto da una guaina in vetro borosilicato temperato (PYREX) [1]. . . . .	2
1.2	Domini di Weiss [2] . . . . .	3
1.3	Ciclo di isteresi magnetica [3] . . . . .	4
1.4	Magnetostrizione diretta . . . . .	5
1.5	Rilevamento deformazione con magnetostrizione inversa . . . . .	6
1.6	Produzione microfilati [1] . . . . .	7
1.7	Variazione del diametro in relazione alla lunghezza del campione di filamento [5] . . . . .	9
1.8	Forma del ciclo di isteresi (a)magnetostrizione negativa, (b) piccola magnetostrizione negativa, (c) magnetostrizione positiva [1] . . . . .	10
1.9	Ciclo di isteresi microfilo magnetico (sinistra senza campo magnetico esterno, destra con campo esterno applicato). [1] . . . . .	11
1.10	misura deformazione componente stampato in 3D) [1]. . . . .	12
1.11	Misura della temperatura intracranica con impianto in titanio e confronto con temperatura rilevata tramite termocoppia [1] . . . . .	13
1.12	elementi base di un MOF . . . . .	14
2.1	Salto di Barkhausen nello stato di magnetizzazione di un materiale ferromagnetico [10] . . . . .	16
2.2	Tempi di commutazione corrispondenti ai salti di Barkhausen tra i due livelli di saturazione del ciclo di isteresi, con campo di eccitazione indicato sull'asse x.[6] . . . . .	18
2.3	Schema di progetto sensore di campo magnetico GMI [8] . . . . .	19
2.4	Rappresentazione del tipico layout di laboratorio impiegato[1] . . . . .	20
2.5	Esempio elettronica per sensore a microfilo magnetico [6] . . . . .	21
3.1	Prova di trazione universale sul provino in alluminio e raccolta dati [9] . . . . .	26
3.2	Schema di collegamento apparecchiature [9] . . . . .	27

---

3.3	Strumentazione necessaria alle operazioni di test del sensore sperimentale [9] . . . . .	28
3.4	Risultati delle misurazioni sperimentali durante la prova di trazione con microfilo magnetico [9] . . . . .	29
3.5	Riassunto dei risultati della prova di trazione[9] . . . . .	30
3.6	Sovrapposizione e raffronto dati delle due prove meccaniche [9] . . . . .	30
3.7	Tabella riassuntiva dei risultati della prova di flessione [9] . . . . .	31
3.8	Fitting della transcaratteristica del sensore [9] . . . . .	31
4.1	Parti costitutive di un estensimetro a resistenza [11] . . . . .	34
4.2	Tipologie di estensimetri [11] . . . . .	34
4.3	Correzione errori dovuti alla deformazione termica con estensimetro compensatore [11] . . . . .	36
4.4	Esempio di LVDT commerciali [14] . . . . .	36
4.5	elementi costitutivi di un LVDT [13] . . . . .	37
4.6	Rappresentazione schematica di un sensore LPS [6] . . . . .	39
4.7	Strumentazione necessaria alle operazioni di test del sensore sperimentale [6] . . . . .	40
4.8	Dipendenza corrente-distanza del microfilo dal solenoide [6] . . . . .	40
4.9	Segnale in uscita dalla bobina di rilevamento [6] . . . . .	41
4.10	Segnale in uscita dalla bobina di rilevamento e relative variazioni dovute alla temperatura [6] . . . . .	42