



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

**CORSO DI LAUREA TRIENNALE
IN INGEGNERIA MECCATRONICA**

TESI DI LAUREA

**SENSORI DI FORZA E COPPIA PER MACCHINE
AUTOMATICHE**

**RELATORE:
CH.MO PROF. RICHIEDEI DARIO**

**LAUREANDO:
GOBBI ALBERTO 592054**

ANNO ACCADEMICO 2011/1012

Alla mia Famiglia

SOMMARIO

Questo elaborato si propone di selezionare, analizzare, catalogare e discutere i principali tipi di sensori che vengono oggigiorno utilizzati in ambito industriale per le misurazioni di forze e coppie. La trattazione si sviluppa in due filoni principali, il primo dedicato alle tecnologie già affermate, più note e con di vasta applicazione. Il secondo filone si propone invece di mettere in luce alcuni tra i sensori più innovativi e con maggiore potenziale. La stesura si focalizza infatti su quei sensori che dal punto di vista tecnologico ed applicativo offrono particolari sviluppi sia come applicazioni particolari sia come nuove frontiere di sviluppo.

Il tutto segue una logica schematica attraverso la quale si può capire il funzionamento, le caratteristiche, i problemi ed i limiti di ogni dispositivo citato. Si sono inserite inoltre considerazioni inerenti anche gli aspetti meno noti o di natura più pratica dei sensori quali possono essere i problemi legati all'installazione o ai disturbi esterni.

Come obiettivo ultimo, queste pagine vogliono essere un'utile guida per la conoscenza del mondo delle misurazioni di forza e coppia dal punto di vista teorico, applicativo, tecnico e di ricerca. Il fine è quello di rendere una chiara, completa ed approfondita visione dello stato dell'arte nei sensori per la misurazione di forze e coppie nelle macchine automatiche.

INDICE

1 MISURARE FORZA e COPPIA	1
2 TECNOLOGIE STD	3
2.1 Estensimetri resistivi	3
2.1.1 Struttura	6
2.1.2 Condizionamento	13
2.1.3 Dati tecnici	19
Produzione	
Limiti operativi	
Problemi	
Installazione	
2.1.4 Scelta dell'estensimetro.....	33
2.2 Sensori piezoelettrici	34
2.2.1 Struttura	35
2.2.2 Condizionamento	43
2.2.3 Dati tecnici	47
Produzione	
Limiti operativi	
Problemi	
Installazione	
2.3 Celle di carico	51
2.3.1 Analisi delle geometrie	51
2.3.2 Analisi dinamica	56
2.3.3 Criteri di scelta	60
2.3.4 Prodotti e caratteristiche	62
3 TECNOLOGIE INNOVATIVE	65
3.1 Celle di carico al silicio	65
3.1.1 Struttura	66
3.1.2 Poli e monocristallini.....	68
3.1.3 Carichi elevati.....	70
3.2 Sensori in fibra ottica	73
3.2.1 Analisi delle sollecitazioni	73
3.2.2 Fibra a griglia di Bragg.....	75
3.2.3 Caratteristiche tecniche	80
3.3 MEMS	81
3.3.1 Introduzione.....	81
3.3.2 Sensori mems.....	82
3.3.3 Mems piezoresistivi	83
4 CONCLUSIONI	89
BIBLIOGRAFIA	91

1 MISURARE FORZA E COPPIA

Lo sviluppo di dispositivi atti alla misurazione di forze e coppie nasce dalla necessità di determinare le iterazioni statiche e dinamiche cui ogni corpo è soggetto. La prima e più semplice applicazione si ha per la misura di peso quindi di forza statica di un oggetto, nata dalla necessità di quantificare un prodotto per assegnarne il relativo valore. Col progredire della tecnologia e delle scienze i metodi e gli strumenti hanno subito grandi cambiamenti passando dalla più elementare bilancia a sistemi più raffinati.

Oltre allo sviluppo degli strumenti e dei metodi di misura si sono ampliati gli ambiti in cui vi è la necessità di conoscere i valori di forze e coppie. Con l'avvento delle fabbriche e la sempre crescente attività industriale si sono moltiplicati gli ambiti in cui è necessaria una migliore e più accurata conoscenza delle iterazioni dinamiche tra componenti.

Oggi in ambito industriale vi sono numerosi casi in cui è richiesta tale conoscenza; si va dal settore automobilistico a quello alimentare, dal metalmeccanico al medico passando per quello aerospaziale. La costante trasversale a tutti i campi è la necessità di effettuare misurazioni sempre più accurate e precise al fine di mantenere uno standard qualitativo elevato.

Le misure di forza e coppia hanno ormai raggiunto un buon livello di qualità dato dall'approfondita conoscenza dei principi fisici stanti alla base del funzionamento dei sensori stessi. A tale riguardo si vuole citare l'applicazione per lo sviluppo di strutture in cui la rilevazione delle sollecitazioni è un parametro ormai fondamentale. Altro ambito applicativo è il controllo di qualità effettuato con prove distruttive e non su prodotti finiti allo scopo di rientrare nei parametri qualitativi imposti.

Le misure di forze e coppie sono inoltre effettuate a bordo di macchinari automatizzati in cui le sollecitazioni che si creano durante le fasi di lavorazione possono incidere sul prodotto o sul macchinario danneggiando o addirittura rompendo uno o l'altro.

Da queste necessità è nato un mercato atto a fornire tali strumenti di misura i quali vanno ad occupare un numero crescente di applicazioni. Questo perché la tendenza odierna delle macchine automatiche spinge verso una sempre maggiore installazione di sensori. Altro motivo è l'invasione dell'automazione in ambiti che fino a qualche tempo fa erano totalmente sprovvisti di qualsiasi tipo di automatismo.



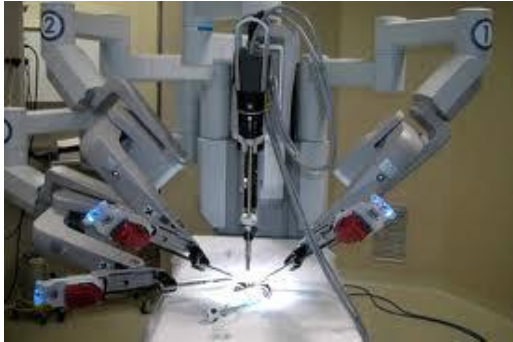
Seppur quest'ampia fascia di applicazioni vi sono alcune considerazioni da fare al riguardo. Come prima cosa si devono analizzare gli ambiti applicativi. L'impiego di sensori di forza e coppia potrebbe fornire dati assai utili anche in altri ambiti diversi da quelli menzionati. Si potrebbe considerare il loro impiego nel monitoraggio durante tutta o parte della linea produttiva andando così a controllare ed eliminare eventuali punti critici della stessa. Inoltre l'analisi durante le fasi di produzione permetterebbe innanzitutto di correggere eventuali malfunzionamenti i quali potrebbero danneggiare il prodotto in lavorazione. In secondo luogo uno studio più approfondito degli scambi di forze e coppie permetterebbe di eseguire un'analisi riguardante l'efficienza dell'automatismo portando così notevoli vantaggi produttivi ed economici.

In campo industriale vi sono parecchi ambiti in cui è necessario il controllo di tali parametri. Negli impianti automatizzati molto spesso il reparto di imballaggio ad esempio è completamente gestito da robot o macchinari automatici che prendono il prodotto finito e lo collocano negli imballaggi. Queste operazioni, soprattutto se eseguite su materiali fragili richiedono un fine controllo delle variabili dinamiche in gioco per salvaguardare l'integrità del prodotto stesso.

Un altro esempio applicativo in cui è richiesto il controllo di coppia e forza riguarda i macchinari di macinazione o lavorazioni meccaniche come tornitura e fresatura. Anche in questi casi risulta necessario

monitorare tali variabili in modo da garantire che macchinario o materiale in lavorazione non subiscano danni.

Vi è poi tutto l'universo della pesatura in cui l'accuratezza delle misurazioni è fondamentale.



2 TECNOLOGIE STD

2.1 ESTENSIMETRI RESISTIVI

SCHEMA INTRODUTTIVO

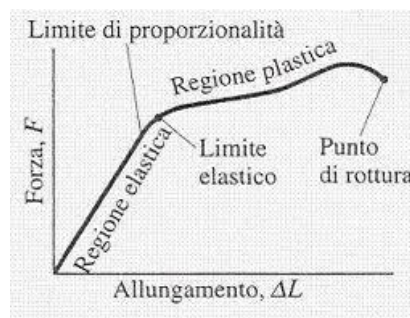
- Principio di funzionamento
- Tipologie di estensimetri
- Struttura
- Parametri caratteristici
- Estensimetri a semiconduttore
- Comportamento dinamico
- Condizionamento
- Aspetti tecnici
- Scelta dispositivo

Principio di funzionamento

Un elemento soggetto a carico sviluppa al suo interno delle tensioni le quali vanno a bilanciare la forza esterna agente. Tale stato di sollecitazione induce nel materiale delle deformazioni di tipo elastico o plastico. Le deformazioni che avvengono in campo elastico sono tali da permettere al materiale di ritornare alla sua forma iniziale una volta ripristinato lo stato di sollecitazione nulla.

Si identificano così dei termini rappresentativi le variabili presenti in tale configurazione. La tensione viene espressa come distribuzione di una forza su di una sezione interna del materiale secondo la formula $\sigma = \frac{F}{A}$. Altro parametro è la deformazione quantificata come rapporto tra la variazione di lunghezza nella direzione della forza indotta sul pezzo dal carico e la lunghezza dello stesso a riposo: $\varepsilon = \frac{\delta L}{L}$.

Seppur siano due parametri di natura differente, esiste una relazione che li lega in maniera proporzionale attraverso un coefficiente relativo al tipo di materiale: il modulo di Young. Sopracitato legame prende il nome di Legge di Hooke $\sigma := E\varepsilon$ la quale però ha validità unicamente in campo lineare elastico.



Da questa espressione scaturisce il concetto di misurazione della forza. Data la conoscenza delle caratteristiche fisiche e geometriche del materiale, dalla semplice misura della deformazione si può ricavare il valore della forza che l'ha generata. Così facendo non si ha più la necessità di conoscere ed esaminare la natura della sollecitazione che si vuole determinare ma risulta sufficiente conoscere il materiale su cui essa agisce potendola quindi quantificare univocamente.

Bisogna in ogni caso ricordare che questo metodo porta al risultato voluto ma in maniera indiretta poiché non si misura direttamente la forza ma bensì gli effetti che questa sorbisce su un corpo, tenendo ben conto del limite del campo di validità cioè rimanendo nel campo elastico dello stesso.

Introduciamo ora un altro principio fisico il quale permetterà di capire meglio la natura dei sensori per le misure di forza e coppia.

Considerando un elemento conduttore di lunghezza L , il cui materiale abbia un determinato valore di resistività ρ e la cui sezione A sia di valore costante, allora per tale elemento vale la seguente relazione:

$$R = \frac{\rho L}{A} \text{ nota come seconda legge di Ohm.}$$

La resistenza di un elemento conduttore è quindi legata al tipo di materiale e alle sue caratteristiche geometriche quali lunghezza e sezione.

Supponendo l'elemento a volume e resistività costanti, nel momento in cui si applica una forza di trazione elastica la sua lunghezza aumenta in misura proporzionale alla sollecitazione. Si ha quindi un incremento di lunghezza δL la quale, assunta l'ipotesi di volume totale costante, causa una diminuzione della sezione del materiale δA per cui: $V = (L + \delta L)(A - \delta A)$.

Di conseguenza la resistenza del conduttore diventa $R + \delta R = \rho \frac{L + \delta L}{A - \delta A}$ formula dalla quale si può ricavare il legame tra la variazione di lunghezza del materiale e la corrispondente variazione di resistenza:

$$\delta R = 2R \frac{\delta L}{L}.$$

All'atto pratico, l'applicazione di un carico su di un elemento conduttore causa una variazione della sua geometria implicando così una variazione del valore di resistenza. Se la deformazione del materiale avviene in campo elastico allora vi è una corrispondenza lineare tra la forza esterna applicata e la variazione di resistenza misurata.

Di seguito viene esplicitata tale relazione:

$$\delta R = 2R \frac{\delta L}{L} = 2R * \varepsilon = 2R \frac{\sigma}{E} = \frac{2R}{E} * \frac{F}{A} = \frac{2R}{E * A} * F$$

La proporzionalità appena evidenziata dipende unicamente dalle caratteristiche tecnologiche, elettriche e geometriche del materiale, cioè da valori noti quali il modulo di Young, o facilmente determinabili quali l'area della sezione e la resistenza.

Volendo esplicitare quest'ultimo parametro si può riscrivere la precedente formula in funzione della resistività del materiale ottenendo così la relazione:

$$\delta R = 2 \frac{\rho L}{EA^2} * F$$

Di conseguenza lo scopo di riuscire a quantificare una forza si può raggiungere in maniera indiretta tramite la misurazione di variazione della resistenza del materiale sul quale viene applicato il carico. Questa semplificazione risulta valida solo se la deformazione indotta rientra nel campo lineare elastico del materiale, del quale si devono conoscere i parametri tecnologici e geometrici.

Applicando al filo una tensione meccanica σ , la variazione di resistenza si può anche scrivere come:

$$\frac{dR}{d\sigma} = \frac{d}{d\sigma} \left(\rho * \frac{L}{A} \right) = \frac{\rho}{A} * \frac{\partial L}{\partial \sigma} - \frac{\rho * L}{A^2} * \frac{\partial A}{\partial \sigma} + \frac{L}{A} * \frac{\partial \rho}{\partial \sigma}$$

Riferendola alla resistenza iniziale R:

$$\frac{1}{R} \frac{dR}{d\sigma} = \frac{1}{L} * \frac{\partial L}{\partial \sigma} - \frac{1}{A} * \frac{\partial A}{\partial \sigma} + \frac{1}{\rho} * \frac{\partial \rho}{\partial \sigma}$$

Che diventa nella sua forma finale

$$\frac{dR}{R} = \frac{\partial L}{L} - \frac{\partial A}{A} + \frac{\partial \rho}{\rho}$$

Tale equazione evidenzia che la variazione di resistenza, rispetto al valore iniziale, dipende da tre fattori:

variazione di lunghezza: $-\delta L/L$;

variazione di area: $-\delta A/A$;

variazione di resistività: $-\delta \rho/\rho$.

Come conseguenza diretta di quanto esposto si ha la possibilità di sviluppare dei dispositivi in grado di interpretare e quantificare la forza come un segnale elettrico con tutti i vantaggi ed i problemi ad esso connessi.

Gli estensimetri (Strain gage) sono sensori in cui la deformazione elastica di un elemento viene riportata come variazione di resistenza. Essi si basano su due principi. Il primo è la legge di Hooke la quale mette in relazione la deformazione con la tensione attraverso il modulo di Young, con la limitazione della validità in campo lineare elastico. Il secondo principio sul quale si basano tali sensori è la seconda legge di Ohm la quale esprime la resistenza elettrica di un materiale in funzione delle sue caratteristiche geometriche (lunghezza e sezione) e della resistività. Di conseguenza la misurazione della forza avviene in maniera indiretta mediante la misura di piccole variazioni di resistenza proporzionali a piccoli spostamenti, deformazioni del materiale sul quale è applicata la sollecitazione.

Oggi giorno esistono quattro tipi di estensimetri:

- a) unbonded strain gage;
- b) filo metallico teso;
- c) deposito metallico su film;
- d) semiconduttore;

2.1.A

Sono sensori costituiti da una griglia metallica tesa tra un elemento fisso ed uno mobile. La forza esterna esercitata sulla parte mobile crea un moto relativo il quale incrementa la tensione su metà dei filamenti e decrementa sull'altra metà del dispositivo. Inoltre questa categoria di sensori non sono dotati del substrato isolante e la griglia metallica usualmente è costituita da filamenti in platino tungsteno.

2.1.B

Sono composti da una griglia di sottile filo metallico che costituisce la parte sensibile dello strumento, da un supporto, che funge da interfaccia e da isolante elettrico nei confronti del materiale su cui effettuare le misure e dai terminali elettrici che collegano la griglia resistiva agli altri elementi che costituiscono il circuito di misura.

La massima sensibilità dello strumento è nella direzione del proprio asse principale (longitudinale) ed il segnale elettrico ricavato è proporzionale alla deformazione secondo un coefficiente K (fattore di taratura) di progetto, verificato in sede di produzione. Il filamento di questi sensori è realizzato in rame o in leghe di alluminio, il quale è solidale con un supporto isolante costituito da un film plastico di ridotto spessore.

Un' alternativa tipologia non prevede lo strato isolante, bensì la diretta applicazione del conduttore all'elemento soggetto della misurazione.

2.1.C

In questa tipologia di sensori si utilizza la tecnica a vuoto per depositare il componente resistivo su un substrato di acciaio. La presenza del film garantisce una migliore aderenza ed un limite nella temperatura superiore di esercizio fino a 500°C .

2.1.D

Gli estensimetri a semiconduttore, detti anche estensimetri piezoresistivi, sono caratterizzati dal fatto che la variazione di resistenza, dovuta alla sollecitazione, è causata da una variazione di resistività, più che da una variazione del rapporto sezione/lunghezza.

Hanno il vantaggio, sugli estensimetri a conduttore, di avere una sensibilità maggiore, di non risentire di isteresi meccanica e di permettere la realizzazione di estensimetri integrati, provvisti anche di circuiti di amplificazione e di compensazione. Hanno, peraltro, l'inconveniente di essere influenzati in misura maggiore dalle variazioni di temperatura e di avere caratteristiche di linearità inferiori.

Generalmente costituiti da silicio, vengono realizzati con tecniche di diffusione eguali a quelle utilizzate per i circuiti stampati.

2.1.1 STRUTTURA

La struttura fisica del sensore è costituita da un filo conduttore a basso coefficiente di temperatura realizzato su un supporto di materiale non conduttore il quale viene incollato all'elemento soggetto a deformazione elastica sotto l'azione di una forza. In tal modo le dimensioni del filo vengono modificate provocando così variazioni del valore della sua resistenza. Si deve in ogni modo considerare che la resistenza vari all'interno del suo range di valori con legge lineare coprendo l'interno campo di deformazioni ammissibili per l'elemento elastico.

La variazione della resistenza è data da due effetti: la variazione della geometria del conduttore e la variazione della resistività ρ . La dipendenza della resistività dagli sforzi meccanici viene definita tramite il coefficiente di piezoresistenza:

$$\pi_1 = \frac{1}{E} * \frac{\delta\rho/\rho}{\delta L/L}$$

Di conseguenza la variazione della resistenza risulta:

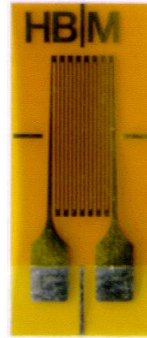
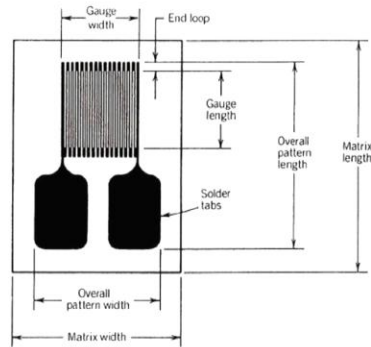
$$\frac{\delta R/R}{\delta L/L} = 1 + 2\nu + \pi_1 * E$$

dove ν è il coefficiente di Poisson.

La misura della deformazione deve essere valutata in un'area dell'elemento il più possibile limitata allo scopo di ottenere un valore di misura valido. Se si misurasse la tensione in una zona ampia, le deformazioni andrebbero ad influenzare negativamente il processo introducendo errori che renderebbero non realistici i valori misurati. Risulta quindi evidente che la rilevazione della forza deve essere effettuata in un punto e non su di un'area. Per fare ciò risulta necessario che le dimensioni del sensore siano il più possibile contenute per poter così effettuare delle misurazioni in cui gli errori siano limitati al massimo.

Si è appena dimostrato che la variazione della resistenza è direttamente legata alla lunghezza del conduttore e che per ottenere delle variazioni apprezzabili ai fini dell'elaborazione del segnale, il segmento deve avere dimensioni non troppo limitate. Risulta evidente che i due aspetti sono in contrasto e che la loro

coesistenza necessita di un compromesso. Per risolvere questo problema gli estensimetri presentano non un conduttore rettilineo ma bensì sviluppato come una serpentina. Così facendo la lunghezza del filamento arriva a valori tali da garantire una variazione di resistenza apprezzabile ed allo stesso tempo la superficie sulla quale si rileva l'effetto rimane contenuta. La geometria del conduttore può presentarsi in svariate forme ma tutte rispettano questo compromesso.



Una delle conseguenze derivanti dalla geometria del filamento conduttore è la zona di misura. Considerando come riferimento l'immagine 11.5, si può vedere come la parte di filamento interessata dalla deformazione principale e quindi di interesse per la misurazione, sia quella identificata come gauge length (lunghezza di gage). Questa parte di sensore è appunto quella atta alla rilevazione della deformazione ed è uno dei parametri fondamentali del dispositivo. La sua importanza deriva dal fatto che il sensore misura la tensione media che subisce sulla lunghezza di gage. Risulta quindi che tale parametro è fondamentale al fine di una buona misurazione poiché, se la lunghezza di gage non è proporzionata con i valori di sollecitazione da misurare, il risultato sarebbe del tutto privo di significato.

Continuando con le considerazioni inerenti la struttura degli estensimetri resistivi, l'attenzione si sposta ora al substrato di materiale isolante. La sua presenza fa sì che la parte sensibile del dispositivo sia elettricamente isolata dall'ambiente esterno. Questa necessità deriva dal fatto che una continuità elettrica con un corpo conduttore esterno andrebbe a variare la resistenza del dispositivo vista dai morsetti del sensore. Questo inconveniente renderebbe inutile qualsiasi valore di misura. Altra funzione del substrato è quella di isolare termicamente il filamento poiché il sensore è intrinsecamente influenzato dalla temperatura. Tale dipendenza deriva dal fatto che la resistenza di un materiale oltre ad essere in funzione della geometria del conduttore e del tipo di materiale (2° legge ohm), è anche legata alla temperatura dello stesso. Di conseguenza l'isolante deve garantire che non vi siano sul dispositivo interferenze termiche esterne. I materiali utilizzati garantiscono un isolamento termico del sensore per il campo di temperature compreso tra -270 e $+290$ °C. Inoltre deve avere un basso coefficiente di dilatazione termica così che non si inducano tensioni sul filamento dovute a variazioni della temperatura.

Oltre a queste due funzioni il substrato deve garantire una perfetta adesione tra il filamento e la base su cui viene montato. La forza di adesione deve essere tale da garantire la trasmissione della forza e soprattutto la trasmissione della deformazione. Necessario quindi che l'adesivo non sia eccessivamente elastico altrimenti parte della deformazione subita dalla base verrebbe assorbita dal substrato e quindi il sensore non la misurerebbe. Usualmente si utilizzano materiali epossidici quali nitrato di cellulosa o altri di varia natura.

Passiamo ora ad analizzare nello specifico le caratteristiche di maggior interesse riguardanti gli estensimetri.

Fattore di proporzionalità

In primo luogo la sensibilità del dispositivo. Essa viene quantificata come la variazione della resistenza in conseguenza alla deformazione del conduttore. Risulta quindi lecito esprimere la sensibilità come rapporto tra la variazione della resistenza e la variazione della deformazione del conduttore. Questo fattore è denominato fattore di gage e vale:

$$GF = \frac{\delta R/R}{\delta L/L}$$

Il valore del fattore di gage dipende dal materiale utilizzato per la realizzazione dell'estensimetro, più precisamente dipende dal coefficiente di Poisson, che per i metalli è indicativamente 0.3; di conseguenza il $GF \approx 2$.

Definito ora questo parametro si può ricavare l'espressione vera e propria della sensibilità, facendo riferimento alla variazione relativa di resistenza provocata dalla deformazione:

$$s = \frac{\delta R}{R} = GF * \frac{\delta L}{L} = GF * \varepsilon$$

Volendo quantificare, al fine di avere un'idea approssimativa della variazione di resistenza, consideriamo che la deformazione varia nell'ordine delle migliaia di micron e il GF nell'ordine delle unità. Di conseguenza si ottiene un valore di variazione indicativo per la resistenza nel campo dei millesimi.

Il fattore di gage rappresenta quindi la totale variazione della resistenza sotto opportune condizioni di carico. Solitamente però le sollecitazioni non sono monodirezionali bensì si sviluppano in più direzioni. La presenza quindi di sollecitazioni trasversali all'asse di misurazione del sensore instaurano degli effetti secondari i quali influenzano la misura. L'effetto di tale sollecitazioni viene riscontrato sulle sezioni di conduttore trasversali quindi la sua influenza è minima dal momento che lo sviluppo della griglia conduttrice segue una direzione longitudinale. La loro presenza in ogni modo giustifica un valore di gage factor diverso da quello che si è trovato per via analitica, appunto perché il dispositivo soffre le tensioni lungo la direzione trasversale.

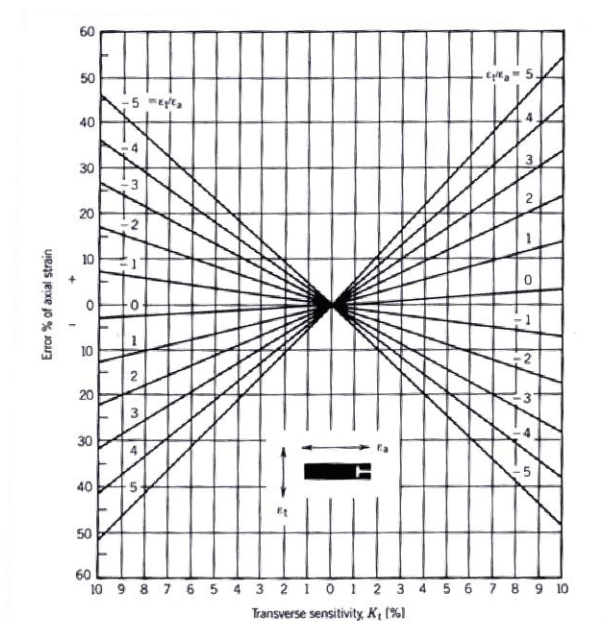
Per quanto possano sembrare ininfluenti, risulta comunque buona norma quantificarne l'errore percentuale.

$$e_t = \frac{k_t * (\varepsilon_t / \varepsilon_a \nu_{po})}{1 - \nu_{po} * k_t}$$

dove ε_t ε_a : deformazione trasversale ed assiale, rispetto all'asse dell'estensimetro;

ν_{po} : coefficiente di Poisson del materiale con il quale si è misurato il GF;

k_t : sensibilità trasversale dell'estensimetro. Range (0.05; -0.19).



Sono da fare ulteriori considerazioni inerenti il gage factor o fattore di taratura o di proporzionalità. Considerando la deformazione trasversale (del diametro del filo d) e longitudinale (della lunghezza del filo L), denominato coefficiente di Poisson ν , la contrazione del diametro d risulta:

$$\frac{\delta d}{d} = -\nu * \frac{\delta L}{L}$$

mentre quella sull'area :

$$\frac{\delta A}{A} = -2\nu * \frac{\delta L}{L}$$

Pertanto, sostituendo nella relazione fondamentale della variazione relativa della resistenza, si ottiene:

$$\frac{\delta R}{R} = \frac{\delta L}{L} + 2\nu * \frac{\delta L}{L} + \frac{\delta \rho}{\rho}$$

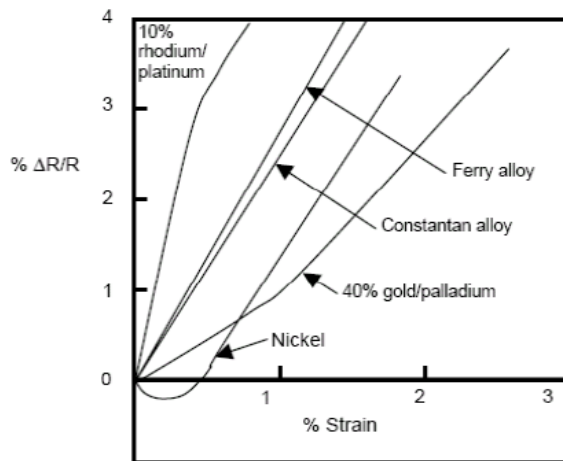
Questa, rapportata alla variazione di allungamento del filo fornisce il fattore di gage dell'estensimetro:

$$GF = \frac{\delta R/R}{\delta L/L} = 1 + 2\nu + \frac{\delta \rho/\rho}{\delta L/L}$$

Nel campo della deformazione elastica dei materiali, essendo il coefficiente di Poisson tipicamente 0.3 (per i metalli) risulta un fattore di gage mediamente 2, il che significa che nella deformazione elastica vi è un aumento di resistività del materiale.

Nel passaggio al campo plastico si nota che il fattore rimane invariato. Questo avviene poiché non essendovi variazioni di volume, le variazioni di sezione (area) compensano quelle di lunghezza. Risulta perciò che in campo plastico la resistività non subisce variazioni.

Di seguito sono riportati dei grafici che esprimono quanto appena spiegato.



Material	Gage Factor (GF)		Ultimate Elongation (%)
	Low Strain	High Strain	
Copper	2.6	2.2	0.5
Constantan*	2.1	1.9	1.0
Nickel	-1.2	2.7	--
Platinum	6.1	2.4	0.4
Silver	2.9	2.4	0.8
40% gold/palladium	0.9	1.9	0.8
Semiconductor**	-100	-600	--

Da questi grafici viene evidenziato l'andamento della variazione della resistenza in funzione di quella della lunghezza. I tratti rettilinei dopo il punto di spezzamento sono identificativi del campo plastico mentre quelli precedenti riguardano l'andamento del rapporto in campo lineare elastico. Si ponga l'attenzione sul terzo grafico riguardante il nichel puro. Questo evidenzia come tale materiale abbia una perdita di resistività nel primo tratto, quando la sollecitazione è ancora minima, andando poi a mantenere un rapporto costante della resistività.

I materiali più comunemente utilizzati, data la loro linearità del fattore di gage in regime elastico (e anche plastico) sono le leghe nichel-rame.

Di seguito è riportata una tabella dei materiali più diffusi con le relative caratteristiche di interesse.

Lega	Composizione	GF	ρ [$\Omega\text{m} \cdot 10^{-8}$]	α [ppm/°C]	σ_s [N/mm ²]
Costantana	60%Cu 40%Ni	2.0	48	20	460
Advance	55%Ni 45%Cu	2.1	45	20	---
Karma	75%Ni 20%Cr	2.1	125	20	1000
Nichrome V	80%Ni 20%Cu	2.5	100	100	800
Isoelastic	52%Fe 36%Ni	3.6	105	175	1250
Platino	---	4.8	10	4000	200
Nichel	---	-1.2	6.5	6800	500

I valori standardizzati delle resistenze degli estensimetri sono 120-350-700-1000 Ohm, con le lunghezze tipiche 1-5-10-50 mm.

Operando nel campo elastico del materiale, con variazioni di lunghezza inferiori a 1000 ppm [1ppm=10⁻⁶ cm/cm=1 $\mu\epsilon$ = microstrain=dL/L], le variazioni di resistenza sono molto modeste.

Di seguito viene riportato un esempio:

$$R=120\text{Ohm}$$

$$K=2$$

$$\delta L/L=1000\text{ppm}$$

$$\text{Risulta: } \delta R=R*(\delta L/L)*K=120*0.001*2=0.240 \text{ Ohm}$$

$$\text{Quindi: } \delta R/R=0.002= 2000\text{ppm}$$

Utilizzando un estensimetro di costantana avente $\alpha=20 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$, una variazione di temperatura $T= 50^\circ\text{C}$ comporta una variazione di resistenza di

$$T*\alpha = 50*20 = 1000\text{ppm}$$

Che equivale al 50% del segnale misurato a fondo scala dell'estensimetro. Come si può ben intuire, il problema della temperatura non può essere trascurabile.

Effetti della temperatura

La temperatura ha diversi effetti sugli estensimetri, il più evidente è legato alla variazione di resistività del materiale che costituisce la griglia. La resistività per i materiali metallici ha un andamento con la temperatura dato dalla relazione:

$$\rho = \rho_0 * (1 + \alpha_\rho * (t - t_0))$$

dove ρ_0 è la resistività del materiale alla temperatura di riferimento (20°C) ed è una costante del materiale stesso e α_ρ è il coefficiente di dilatazione termica legato alla resistività del materiale.

Sostituendo questa relazione nella formula della resistenza si evidenzia la componente di variazione della resistenza dovuta alla variazione di temperatura:

$$R = \rho * \frac{L}{A} = \rho_0 * \frac{L}{A} + \rho_0 * \alpha_\rho * (t - t_0) * \frac{L}{A} = R_0 + R_0 * \alpha_\rho * \Delta t$$

Risulta evidente come la variazione di resistenza sia direttamente proporzionale ai cambiamenti di temperatura. L'andamento viene caratterizzato dal materiale che costituisce la griglia del dispositivo attraverso il coefficiente di dilatazione termica. Tale corrispondenza implica la necessità di utilizzare materiali la cui dilatazione in funzione della temperatura sia la più limitata possibile. In questo modo si riduce l'influenza delle variazioni termiche del dispositivo sui valori di misura.

Bisogna altresì considerare anche l'effetto di dilatazione del materiale il quale implica una variazione della lunghezza dei segmenti che compongono la griglia. L'andamento è determinato dalla formula

$$\frac{\delta L}{L} = \alpha_g * \Delta t$$

in cui α_g rappresenta il coefficiente di dilatazione termica del conduttore dell'estensimetro.

Ulteriore effetto che va ad influenzare la misura è la dilatazione termica del materiale su cui è applicato l'estensimetro. Anche questo segue la legge sopraindicata, con un proprio coefficiente α_m .

La differenza tra i due coefficiente implica una diversa variazione della lunghezza dei due materiali creando così una deformazione relativa tra i due. Ne consegue che l'effetto complessivo visto dal sensore è dato dalla sovrapposizione delle due singole dilatazioni. Per questo motivo, se consideriamo la deformazione risultante, essa è determinata dalla differenza dei due singoli contributi. Ci si può così ricondurre alla formula complessiva

$$\varepsilon = \frac{\delta L}{L} = (\alpha_m - \alpha_g) * \Delta t$$

Come precedentemente dimostrato, la deformazione produce una variazione di resistenza esprimibile come:

$$\frac{\delta R}{R} = GF * \frac{\delta L}{L} = GF * (\alpha_m - \alpha_g) * \Delta t$$

Evidenziare tali effetti direttamente sulla variazione di resistenza e non su fattore di gage è una scelta che riguarda la natura di quest'ultimo. Essendo esso un fattore derivante dall'idealità del sistema, sarebbe improprio andare a modificarlo. Inoltre così facendo, si porta a diretta deduzione l'influenza dei diversi materiali sul parametro principale.

A tale riguardo si deve osservare che, come ovvio dedurre dalla formula, se il materiale del pezzo su cui si applica il sensore, ed il sensore stesso fossero uguali allora non si riscontrerebbe alcuna variazione della resistenza del dispositivo causata dalla differenza di dilatazione termica dei due materiali.

Un ulteriore effetto collaterale della temperatura riguarda la variazione del fattore di proporzionalità. Questo fenomeno viene compensato direttamente sul GF attraverso un coefficiente β denominato fattore di sensibilità alla temperatura del gage factor.

In ultima analisi si deve quindi esprimere la variazione di resistenza considerando tutti i fattori che la influenzano, ottenendo quindi la formula complessiva:

$$\frac{\delta R}{R} = [\alpha_\rho + GF * (\alpha_m - \alpha_g)] * \Delta t$$

Sono ora necessarie alcune considerazioni. Dato che la variazione di temperatura produce effetti negativi sul dispositivo, risulta evidente come l'annullamento o la compensazione di tali effetti sia alquanto necessaria. Detto ciò, analizzando la formula sopra esposta, si può considerare di trovare i valori dei parametri del primo addendo tali che si vadano ad annullare:

$$\frac{\alpha_\rho}{GF} + (\alpha_m - \alpha_g) = 0$$

In questo modo la differenza dei coefficienti di dilatazione termica dei materiali va a compensare il termine dovuto alla variazione di resistività del materiale della griglia. Questa tecnica viene definita autocompensazione poiché gli effetti della temperatura vengono annullati dalle caratteristiche dei materiali utilizzati. La sua efficacia comunque è molto limitata dato che la combinazione dei parametri risulta molto restrittiva in termini applicativi. In ogni modo è una tecnica utilizzabile in maniera parziale ed in un ristretto campo di valori attorno alla temperatura ambiente.

Per compensazioni migliori si ricorre a circuiti specifici i quali condizionano ed elaborano il segnale permettendo così una più ampia scala di intervento.

Estensimetri a semiconduttore

Questo tipo di sensori ha delle caratteristiche differenti seppur segua lo stesso principio degli estensimetri metallici. Anche i materiali semiconduttori, se sottoposti a deformazione manifestano variazioni di resistenza. Questi inoltre possiedono un elevato coefficiente di piezoresistenza, di conseguenza il fattore di gage risulta superiore.

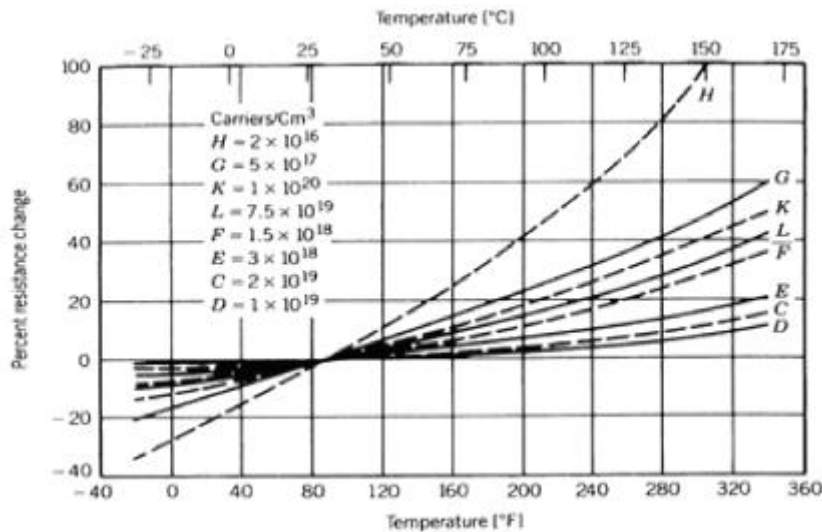
Altri aspetti interessanti sono l'elevata resistenza, una buona resistenza alla fatica ed una bassa isteresi, risentendo comunque degli effetti della temperatura.

Per comprendere meglio il loro funzionamento si deve considerare l'effetto che scaturisce dall'applicazione di una sollecitazione. La mobilità ed il numero delle cariche presenti nel materiale vengono modificate dalla

tensione meccanica indotta sulla struttura. Questo provoca una variazione della resistenza la quale è diretta misura della densità dei portatori di carica.

I cristalli di semiconduttore contengono una certa quantità di impurità le quali influenzano il numero dei portatori di carica e ne influenzano la mobilità. I valori di resistività per questo tipo di materiali destinati alla costruzione di estensimetri varia da 0.001 a 1.0 $\Omega \cdot \text{cm}$. La presenza di un'elevata densità di portatori determina inoltre una minore influenza della temperatura e delle tensioni sul fattore di gauge il quale subisce variazioni minime.

Di seguito viene riportata una tabella in cui si evidenziano gli effetti delle impurità sul materiale, in funzione anche della temperatura.



Come si può ben vedere, per temperature vicine a quella ambiente le impurità non si discostano molto fra di loro e dal valore di resistenza iniziale. Man mano che la temperatura tende ad aumentare la concentrazione di impurità determina un incremento di resistenza anche molto accentuato.

Parametri	Estensimetri metallici	Estensimetri semiconduttore
Campo di misura [$\mu\epsilon$]	0.1 – 40000	0.001 – 3000
Fattore di gauge	2.0 – 4.5	50 – 200
Resistenza [Ω]	120 – 350 – 750 – 1000	1000 – 5000
Tolleranza resistenza [%]	0.1 – 0.2	1 – 2
Dimensioni [mm]	0.4 – 150	1 – 5

2.1.2 CONDIZIONAMENTO

La resistenza non può essere misurata passivamente perciò è necessario fornire una grandezza di eccitazione all'estensimetro. Inoltre il segnale messo a disposizione dal dispositivo è molto piccolo per cui risulta necessaria una sua amplificazione. Il circuito più adatto allo scopo risulta essere il ponte di Wheatstone. Nel 1843 il fisico inglese Sir Charles Wheatstone (1802-1875) perfezionò un circuito a ponte per la misurazione di resistenze elettriche inventato da Samuel Hunter Christie.

Si tratta di un circuito costituito da due coppie di resistenze, messe a quadrato, in cui due nodi opposti sono alimentati da un generatore di tensione. Sui due nodi liberi viene a crearsi una differenza di potenziale, detta tensione di sbilanciamento, generata dalla variazione di resistenza.

La tensione di sbilanciamento vale:

$$U = E * \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right)$$

per cui, il ponte si trova in una condizione di equilibrio solo se vale la relazione:

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

quindi il potenziale misurato tra i due nodi liberi risulta $U=0$.

La peculiarità di questo circuito risulta quindi essere l'elevata sensibilità alle variazioni delle resistenze. La misurazione viene effettuata rispetto alla variazione di tensione U , permettendo così un elevato livello di precisione data la possibilità di stimare con accuratezza valori molto piccoli di δ .

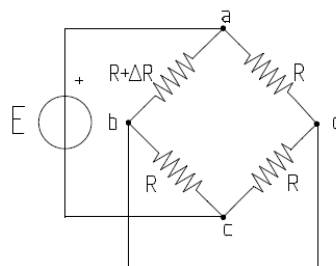
Si deve comunque evidenziare che il valore di tensione misurato risulta essere ancora piccolo e quindi non adeguato ad elaborazione e/o trasmissione. Questo implica che in uscita al ponte è necessaria la presenza di un circuito di amplificazione.

Prima però si rende necessaria una più approfondita analisi delle caratteristiche e dei comportamenti del ponte.

Supponendo che le quattro resistenze abbiano tutte lo stesso valore R , la tensione misurata risulta

$$U = E * \left(\frac{R}{2R} - \frac{R}{2R} \right) = 0$$

Nel momento in cui una sola resistenza subisca una variazione del proprio valore tale relazione varia e si ottiene



$$U = V_{bd} = E * \left(\frac{(R + \Delta R) * R - R^2}{(2R + \Delta R) * 2R} \right)$$

Identificando ora la variazione di resistenza $\Delta R/R = \delta$ si arriva a:

$$U = \frac{E}{4} * \frac{\delta}{1 + \delta/2}$$

che rappresenta il legame non lineare tra la tensione misurata sui due nodi liberi e la variazione di resistenza di un solo elemento del ponte. Si può ora affermare che solo per variazioni molto limitate si instaura un legame lineare, fin quando cioè vale la condizione $\delta \ll 1$.

In questo caso allora la formula può essere approssimata come

$$U = E * \frac{\delta}{4}$$

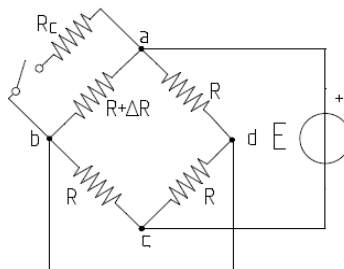
Questo aspetto, che a prima vista può sembrare negativo, risulta invece fondamentale per le applicazioni a quarto di ponte degli estensimetri. La motivazione risiede nel fatto che le variazioni di resistenza indotte sul sensore dalle deformazioni meccaniche sono del valore di qualche millesimo per cui viene garantita la linearità tra il segnale di tensione acquisito e la forza applicata sul pezzo.

Le considerazioni appena fatte valgono se sussiste la condizione di uguaglianza tra tutte le resistenze del ponte. Condizione oltretutto necessaria affinché l'estensimetro funzioni. Si intende cioè che se in condizioni di riposo le resistenze non sono bilanciate, si ha in uscita un valore di tensione non nullo il quale determina un errore di offset nella misura.

La condizione di resistenze sbilanciate non è poi così improbabile. Si deve considerare che la tolleranza dei valori, nel caso di componenti di buona qualità è comunque del $\pm 0.1\%$. Questo significa che, considerando esatto il valore di resistenza dell'estensimetro, comunque sul ponte si avrà nel peggiore dei casi uno sbilanciamento del 0.3% . Da qui nasce la necessità di inserire una resistenza variabile in grado di bilanciare il ponte.

Si esamini ora l'effetto provocato dalla presenza di una resistenza di calibrazione. Ponendola in parallelo ad un ramo, in condizioni di ponte bilanciato si ottiene:

La resistenza di calibrazione



$$\frac{U}{E} = \frac{(R + \Delta R) // R_c}{(R + \Delta R) // R_c + R} - \frac{R}{2R} = 0$$

Da cui si ricava:

$$\Delta R = \frac{R^2}{R + R_c}$$

Due parametri importanti dei ponti sono la sensibilità ed il guadagno.

La prima è intesa come rapporto tra la tensione in uscita U e la variazione di resistenza che l'ha prodotta ΔR , in riferimento alla tensione di alimentazione E:

$$S = \frac{U}{\Delta R} \quad \left[\frac{V}{\Omega} \right]$$

Il secondo viene definito come il rapporto tra lo sbilanciamento corrispondente alla massima variazione di resistenza e la tensione di alimentazione del ponte:

$$G = \frac{U}{E} \left[\frac{mV}{V} \right]$$

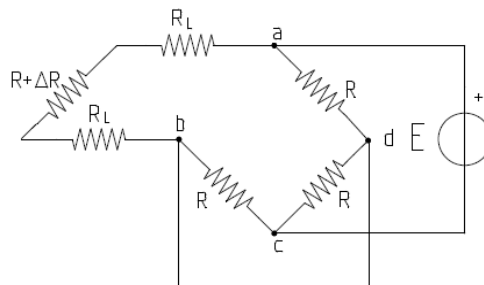
In ambito commerciale, questo parametro viene spesso utilizzato con riferimento al fondo scala del sistema.

Il ponte di Wheatstone può essere predisposto in diverse configurazioni ognuna con le proprie caratteristiche. Di seguito sono esposti i vari tipi di cablaggi utili.

Cablaggio a quarto di ponte attivo

Configurazione nella quale è presente un unico estensimetro, come nei circuiti precedentemente analizzati. Di questa tipologia se ne distinguono due tipi:

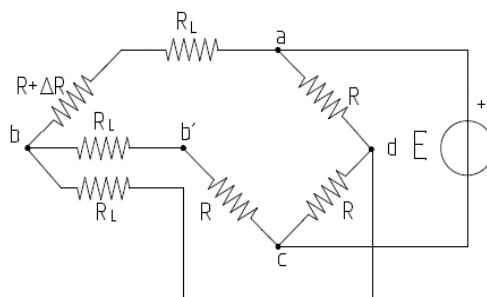
a 2 fili



L'unica differenza dai circuiti visti in precedenza consiste nell'aver considerato le resistenze dei fili che collegano l'elemento sensibile al ponte. Questa accortezza è resa necessaria dal fatto che i due elementi non sono quasi mai posti così vicini da renderle trascurabili. Di conseguenza bisogna quantificare l'influenza dei cavi sulla misura. Si deve infatti considerare che la resistenza dei fili produce degli errori dovuti soprattutto alla temperatura, oltre che agli stessi fenomeni meccanici che sono alla base del funzionamento dell'estensimetro.

Questo tipo di collegamento, seppur molto semplice è consigliabile solo per situazioni in cui estensimetro e ponte siano collocati a breve distanza o nei casi in cui sia $R \ll R_L$.

a 3 fili

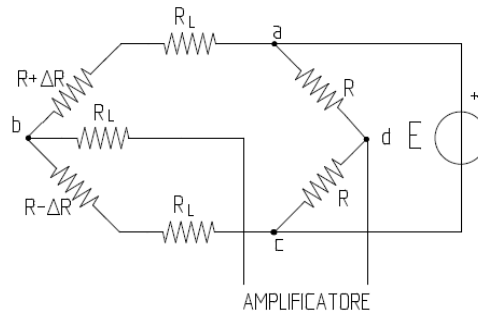


Questo tipo di collegamento permette di compensare completamente l'errore provocato dalla resistenza dei fili.

Un terzo cavo porta il segnale dello sbilanciamento all'amplificatore; così facendo le correnti di alimentazione presenti nel ponte si distribuiscono sui due rami contigui all'estensimetro annullando così i

propri effetti sulla misura. Se si hanno variazioni di R_L per effetto termico, lo si può supporre identico su entrambi i fili per cui la resistenza cambia in egual modo e non crea sbilanciamento. Questo sistema riesce ad eliminare gli errori solo se i fili sono uguali in materiale, sezione e lunghezza in modo da avere il medesimo comportamento termico e meccanico. La resistenza del terzo filo non viene considerata poiché la resistenza di ingresso dell'amplificatore essendo estremamente elevata la rende trascurabile. Infatti la corrente misurabile su tale ramo è e deve essere infinitesima.

Cablaggio a mezzo ponte attivo



In questo tipo di ponte si ha la presenza di due dispositivi sensibili posizionati sullo stesso ramo. Anche in questo caso l'effetto della resistenza dei fili viene completamente eliminato tramite l'utilizzo del terzo cavo. Una notevole differenza risiede nella sensibilità del ponte rispetto al cambiamento della variabile di ingresso.

Supponendo che i due estensimetri subiscano una egual deformazione ma di segno opposto, si ottiene come tensione in uscita un valore:

$$U = E * \frac{\delta}{2}$$

Il risultato appena ottenuto è facilmente dimostrabile. Partendo dalla condizione di equilibrio, si supponga che tutte e quattro le resistenze del ponte abbiano uguale valore R e che due di esse componenti un ramo subiscano una variazione ΔR di segno opposto. La tensione misurata all'uscita risulta quindi:

$$U = E * \frac{(R + \Delta R)}{(R + \Delta R) + (R - \Delta R)} - \frac{R}{2R} = E * \frac{(R + \Delta R)}{2R} - \frac{R}{2R}$$

Da qui si giunge all'espressione precedentemente esposta.

Confrontandola poi con l'equazione che caratterizza l'uscita della configurazione a quarto di ponte si vede immediatamente che a parità di variazione di resistenza e cioè a parità di δ , la tensione di uscita risulta raddoppiata. Di conseguenza il peso della variazione rispetto a U è aumentato implicando così un incremento di sensibilità. Si noti che anche in questa configurazione, il legame tra ingressi ed uscita risulta lineare per piccole variazioni.

Il sistema a mezzo ponte attivo permette inoltre un'autocompensazione degli effetti di dilatazione termica del materiale costituente l'estensimetro e del materiale su cui essi sono applicati. Per spiegare come tale comportamento sia possibile si deve considerare il presupposto da cui si è partiti. La variazione di resistenza è stata assunta di segno opposto. Questo significa che i due estensimetri sono soggetti alla stessa sollecitazione ma sono posizionati sul pezzo in modo tale che le deformazioni che subiscono siano inverse. Nel momento in cui i componenti ed il materiale subiscono una variazione di temperatura la quale innesca i fenomeni di dilatazione termica, la variazione di resistenza che si riscontra su entrambi gli estensimetri avrà la stessa intensità. Il fatto però che essi percepiscano le variazioni in maniera opposta fa sì che questo fenomeno indesiderato venga automaticamente annullato. Questa caratteristica è intrinseca alla topografia del ponte poiché le due parti attive occupano lo stesso ramo del circuito.

Di fatti una dei motivi per cui il ponte di Wheatstone risulta uno strumento così efficace risiede nella possibilità di sommare o annullare le variazioni delle resistenze semplicemente cambiando la posizione che occupano all'interno del circuito. Se ad esempio due resistenze variabili fossero poste in maniera adiacente ma su due rami opposti, la variazione del valore di una verrebbe annullato da una uguale variazione del valore dell'altra.

Questa osservazione ci permette di discutere il comportamento della configurazione a quarto di ponte attivo sotto gli effetti della temperatura. Analizzando il circuito si osserva che un singolo estensimetro risulta molto sensibile alla variazione termica provocando quindi degli errori di misura anche dello stesso ordine di grandezza del valore che si vuole esaminare. Per cui, volendo rendere indipendente il dispositivo dagli effetti termici risulta necessario utilizzare la caratteristica del ponte sopra citata. Di conseguenza si inserisce un ulteriore estensimetro adiacente a quello già esistente, ma sul ramo opposto. Il circuito così costituito non rappresenta una configurazione a mezzo ponte attivo ma bensì una semplicemente a mezzo ponte con quarto di ponte attivo. L'effetto che si manifesta è una riduzione dell'influenza della temperatura nella variazione di resistenza dell'estensimetro attivo poiché essa viene naturalmente compensata dal secondo dispositivo. Questa tecnica risulta efficace solo se il sensore aggiunto si trova in una posizione sul materiale tale da renderlo soggetto alla medesima variazione termica ma, totalmente non influenzato da alcun tipo di deformazione. Se così non fosse, tali componenti andrebbero ad aggiungersi a quella termica e di conseguenza entrerebbero a far parte della misura. Quindi, come risulta evidente il loro contributo andrebbe ad influenzare il valore della tensione di uscita rendendo sbagliata ogni misurazione. In conclusione, si deve porre particolare attenzione alla disposizione del secondo estensimetro al fine che non venga influenzato da alcun agente esterno se non quello termico che si vuole compensare. Si ricordi comunque che l'introduzione del secondo elemento sensibile collocato sul ramo di ponte opposto non va in alcun modo a modificare la sensibilità del dispositivo la quale resta quella dello schema originario a quarto di ponte attivo.

Cablaggio a ponte attivo intero

In questa configurazione le quattro resistenze del ponte sono date da altrettanti estensimetri. Nel caso in cui essi siano tra loro uguali e subiscano eguali deformazioni a due a due opposte, sui rami opposti del ponte, allora la tensione di uscita risulta:

$$U = E * \frac{\Delta R}{R}$$

con sensibilità doppia rispetto al caso con mezzo ponte attivo e con dipendenza ancora lineare. In questo modo vengono compensati sia gli effetti delle resistenze dei fili che gli effetti termici. Si noti però che non è sempre possibile realizzare questa configurazione rispettando le condizioni di simmetria della disposizione e dei carichi per cui la sensibilità in questi casi risulta inferiore rispetto al caso ideale.

Nelle quattro configurazioni esposte si è esplicitato il legame della tensione di uscita con la sensibilità attraverso la variazione delle resistenze. Al contrario non si è mai preso in considerazione la componente che rappresenta la tensione di alimentazione. Il motivo è presto spiegato. Per avere un segnale in uscita dal ponte con una ampiezza maggiore si potrebbe aumentare il modulo della tensione che lo alimenta. Questo approccio in prima analisi può sembrare vantaggioso ma, implica degli effetti secondari che non possono essere trascurati. In primis quelli causati da una corrente maggiore nel ponte. In secondo luogo la potenza assorbita dal dispositivo.

Il primo aspetto riguarda direttamente gli effetti che un aumento della tensione di alimentazione provocano sul comportamento fisico dell'estensimetro. Andando ad aumentare il valore di E, viste le formule, si otterrebbe un diretto aumento della tensione di uscita U, ma anche un aumento delle correnti circolanti nel ponte. Maggiore flusso di corrente significa quindi maggiore dissipazione di potenza per effetto Joule. La conseguenza diretta sarebbe un aumento della temperatura del sensore le cui

conseguenze sono già ben note. L'effetto sarebbe quindi quello di introdurre un errore nella misura dovuto alla dilatazione termica dei filamenti. Di conseguenza l'aumento della tensione di alimentazione può essere conveniente solo entro il limite fisico legato alla capacità dell'estensimetro di smaltire corrente senza dar luogo a problemi di auto riscaldamento.

Il secondo aspetto è legato al primo e riguarda l'ambito energetico. Un aumento di tensione ed il conseguente aumento di corrente causano un consumo più elevato di potenza da parte del dispositivo. Tale aspetto se preso singolarmente può risultare trascurabile, ma se inserito in un sistema più ampio e complesso, deve essere tenuto in considerazione al fine di una valutazione energetica completa.

Su ogni ramo del ponte è possibile dissipare un valore finito di potenza, senza però incorrere nei problemi dovuti all'auto-riscaldamento. Il suo andamento è proporzionale a $\frac{r}{r+1}$, funzione monotona crescente quindi, per aumentare l'efficienza del circuito si potrebbe massimizzare r in maniera tale da poter dissipare più potenza. Da prove sperimentali si è trovata come soglia un valore di r compreso tra 9 e 10 con il quale si ottiene un'efficienza attorno al 90%.

Ponti in alternata

Il ponte di Wheatstone, pur essendo lo strumento migliore per la misura delle variazioni di resistenza degli estensimetri, presenta un problema se alimentato in corrente continua. Di fatti si possono notare delle derive nei valori di tensione con il trascorrere del tempo. Queste causano errori nella misurazione e sono a loro volta causate da effetti termici. La soluzione migliore per evitare il manifestarsi di tale deriva termica risulta essere una modifica nell'alimentazione del ponte. Di fatti il problema si risolve alimentando il circuito in alternata. Così facendo però si va ad aumentare la complessità del circuito ed il numero di fattori che influenzano il condizionamento. Di fatti risulta necessario che si tenga conto sia dell'ampiezza che della fase che il segnale di sbilanciamento presenta.

2.1.3 DATI TECNICI

Gli estensimetri elettrici sono costituiti da una griglia metallica se appartenenti alla categoria dei resistivi, oppure da materiali polimerici conduttori o semiconduttori se appartenenti alla categoria dei piezoresistivi. La differenza dei materiali costituenti i sensori ne determina in maniera radicale le caratteristiche. Le dimensioni, la sensibilità, il coefficiente di temperatura e quello di proporzionalità sono tutti parametri determinati dal tipo di materiale con cui è costituito l'estensimetro.

Una prima sostanziale distinzione è necessaria per capire il motivo per cui si sono sviluppati questi due rami. Con riferimento al livello tecnologico necessario per il loro sviluppo si riscontra che la realizzazione di sensori metallici è quella meno onerosa e più economica. Contro però si ha una minore resa di prestazione da parte di quest'ultimi nei confronti dei piezoresistivi. In maniera indicativa si può considerare i valori riportati nella seguente tabella, come riferimento di massima per caratterizzare le due famiglie.

Parameter	Metal	Semiconductor
Measurement range	0.1 to 40,000 $\mu\epsilon$	0.001 to 3000 $\mu\epsilon$
Gage factor	1.8 to 2.35	50 to 200
Resistance, Ω	120, 350, 600, . . . , 5000	1000 to 5000
Resistance tolerance	0.1% to 0.2%	1% to 2%
Size, mm	0.4 to 150 Standard: 3 to 6	1 to 5

Analizzandola si riscontrano immediatamente delle sostanziali differenze.

La prima da evidenziare è la sensibilità espressa attraverso il fattore di gage. Nei semiconduttori esso risulta essere maggiore da uno a due ordini di grandezza rispetto al corrispettivo dei sensori metallici. Questa differenza risulta determinante nella scelta tra le due tipologie dato che è il principale parametro caratterizzante la misura.

Un elemento che varia in maniera evidente inoltre è il campo di misura. Con i metallici si coprono valori di deformazione più elevati; al contrario nei semiconduttori i valori massimi sono abbastanza limitati, ma per le piccole deformazioni si raggiunge un buon livello di ricezione.

Si deve tener conto che i valori riportati in tabella sono solo indicativi e non del tutto esaustivi.

Per una migliore trattazione degli aspetti caratterizzanti di un estensimetro resistivo si consideri la seguente tabella:

N°	Caratteristica	N°	Caratteristica
1	Resistenza elettrica	8	Tensione di alimentazione e deriva
2	Fattore di taratura	9	Rigidezza ed effetto rinforzante
3	Sensibilità trasversale	10	Isteresi meccanica
4	Sensibilità temperatura	11	Deformazione limite
5	Coefficiente di temperatura del fattore di taratura	12	Scorrimento
6	Resistenza di isolamento	13	Resistenza a fatica
7	Base di misura	14	Isteresi termica

1) La resistenza elettrica R_c [Ω] è la resistenza misurata ai terminali della griglia a temperatura ambiente e con l'estensimetro non installato e non deformato.

Di solito si indica invece con il simbolo R_0 la resistenza dell'estensimetro installato ma non deformato. I valori nominali più comuni sono 120,350,700 Ω . Per l'analisi sperimentale delle tensioni su materiali buoni conduttori si utilizza generalmente quella da 120 Ω . L'utilizzo di estensimetri con valori di resistenza più elevati è indicata nei casi in cui è necessario ridurre:

1. La generazione di calore per effetto Joule, cioè per prove su materiali cattivi conduttori di calore;
2. L'influenza della resistenza dei cavi sulla misura.

2)e3) La sensibilità alla deformazione dell'estensimetro non coincide in generale con quella del filo.

La variazione di resistenza elettrica dell'estensimetro è dovuta principalmente alla deformazione dei tratti longitudinali ed in misura minore a quella dei tratti trasversali, rispettivamente ϵ_l e ϵ_t . Di conseguenza vi sono due fattori di proporzionalità GF_l e GF_t . Il primo si ottiene dal rapporto tra la variazione di resistenza e la deformazione longitudinali con deformazioni trasversali nulle. Il secondo fattore si ottiene alla stessa maniera ma con componenti invertite. Da qui risultano le formule:

$$GF_l = \left. \frac{(\Delta R/R_0)_l}{\epsilon_l} \right|_{\epsilon_t=0} \quad GF_t = \left. \frac{(\Delta R/R_0)_t}{\epsilon_t} \right|_{\epsilon_l=0}$$

I produttori di estensimetri forniscono, al posto delle suddette caratteristiche, il fattore di taratura longitudinale GF e la sensibilità trasversale S_t . Questo secondo parametro è dato dal rapporto tra il fattore di gage trasversale e quello longitudinale cioè

$$S_t = \frac{GF_t}{GF_l}$$

Il fattore GF invece esprime la sensibilità dell'estensimetro alla tensione monoassiale nella forma:

$$GF = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon} \Big|_{\varepsilon_t = -\nu_0 * \varepsilon}$$

Si può inoltre verificare che tra i due fattori di gage sussiste un legame espresso dalla relazione

$$GF = GF_l * (1 - \nu_0 * S_t)$$

Un estensimetro ideale deve essere insensibile alla deformazione trasversale, deve cioè avere $GF_t = S_t = 0$; in tali condizioni $GF = GF_l$. In pratica il fattore di taratura trasversale, pur essendo piccolo rispetto a quello longitudinale è non nullo per cui si deve concludere che $GF \neq GF_l$.

Questo processo di determinazione dovrebbe essere eseguito a priori per ogni dispositivo. Il fatto però che non si possa recuperare il sensore una volta installato implica un approccio di tipo statistico. Di fatti la determinazione sperimentale del fattore di taratura viene effettuata utilizzando un campione di estensimetri dal quale si ricava un valore medio del fattore di gage associato ad un valore di scarto tipo s . Sulle confezioni dei sensori viene indicato il valore medio e la tolleranza relativa percentuale ad un livello di confidenza del 95%. Questo garantisce che 95 dispositivi su 100 rispettano il valore indicato entro la tolleranza che può variare tra 0.5 e 1%.

Da questo limite operativo si deduce che l'incertezza di misura estensimetrica non potrà essere inferiore a quella del fattore di gage.

Come riferimento per valori reali di sensibilità trasversale si può considerare una variazione di $\pm 1\%$, con la maggior parte dei valori compresi tra $\pm 0.5\%$. Si può quindi dedurre che nei casi in cui vi siano tensioni trasversali, la loro influenza rimane comunque abbastanza limitata.

- 4)** Un estensimetro installato su di un componente soggetto ad una variazione di temperatura ΔT e libero di espandersi manifesta una variazione di resistenza che dipende da due parametri. Il coefficiente di temperatura β della resistenza del materiale di griglia e la differenza dei coefficienti di dilatazione termica lineare della struttura (α_m) e della griglia estensimetrica (α_g).

La risposta termica del sensore, detta anche deformazione termica apparente, associata alla suddetta variazione di resistenza risulta:

$$\varepsilon_a = \frac{\beta_e}{GF} * \Delta T$$

dove $\beta_e = \beta + GF * (\alpha_m - \alpha_g)$ è il coefficiente di temperatura dell'insieme estensimetro-struttura.

La risposta termica del sensore ε_a può essere compensata, eliminata o corretta rispettivamente mediante l'impiego di estensimetri compensatori, auto compensati o la misurazione della variazione di temperatura ΔT .

- 5)** Il fattore di taratura degli estensimetri è in generale funzione della temperatura di prova. In prima approssimazione la legge di variazione è di tipo lineare:

$$GF_T = GF * (1 + \beta_{GF} * \Delta T)$$

dove

GF_T è il fattore di taratura alla temperatura di prova T;

GF è il fattore di taratura alla temperatura di riferimento (di solito temperatura ambiente 23°C);

ΔT è la differenza tra la temperatura di prova e quella di riferimento.

β_{GF} è il coefficiente di temperatura del fattore di gage e viene espresso come il rapporto tra la variazione relativa del fattore di taratura e la corrispondente variazione di temperatura.

I produttori di estensimetri forniscono, oltre al fattore di gage alla temperatura di riferimento, anche il coefficiente di temperatura β_{GF} . La sua conoscenza consente di calcolare il fattore di taratura relativo alla temperatura di prova. Essendo però un valore molto piccolo, perlomeno per i materiali più comuni quali costantana e karma, la suddetta correzione si rivela necessaria solo per temperature di prova molto discostate da quella di riferimento. In genere si applica per $\Delta T > 50^\circ C$.

6) La resistenza di isolamento R_i [M Ω] è la resistenza elettrica tra la griglia e il materiale, elettricamente conduttore, su cui l'estensimetro è installato.

Una elevata resistenza di isolamento è indice di una buona installazione del sensore per quanto riguarda la presa dell'adesivo sui componenti e per l'assenza di umidità, solventi o contaminanti. Inoltre un'elevata resistenza di isolamento riduce la deformazione apparente dovuta all'eventuale variazione del proprio valore e rende trascurabile l'attenuazione di deformazione dovuta al materiale di incollaggio.

Un elevato valore di tale resistenza quindi risulta benefico ai fini di una buona misurazione. Per questo motivo, in fase di installazione è consigliato verificarne il valore e controllare che sia il sensore che i cavi che portano il segnale al condizionamento siano isolati da fattori esterni quali l'umidità.

Un riscontro positivo lo si ottiene, per misure di precisione quando la resistenza di isolamento ha valore superiore a 10000 M Ω . Per prove meno accurate è sufficiente aver valori minimi non inferiori a 1000 M Ω .

Per una maggiore chiarezza a riguardo si può consultare la norma UNI 10478-3, di cui qui di seguito viene riportata una tabella indicativa

Condizioni di prova	R_i [M Ω]
Buone in laboratorio	10000
Usuali in ambiente chiuso	2000
Usuali in ambiente aperto	500

7) La base di misura L_0 [mm] coincide con la lunghezza della griglia che partecipa alla misurazione della deformazione.

Convenzionalmente la base di misura degli estensimetri con griglia a filo continuo comprende anche i raccordi trasversali, i quali sono esclusi nei sensori a lamina.

L'estensimetro misura la deformazione media lungo la base di misura L_0 . Tale deformazione non coincide in generale con la deformazione effettiva che si ha nel punto medio della base stessa.

In presenza di deformazioni variabili in maniera non lineare ed in particolare nelle zone di concentrazione delle tensioni risulta quindi necessario l'utilizzo di sensori a base corta ($L_0 < 3mm$).

In presenza di campi di deformazione uniformi o lineari invece si utilizzano estensimetri di lunghezza compresa tra 3 e 20 mm, di norma circa 6mm. Un ulteriore caso lo si ha per misurazioni su materiali che subiscono deformazioni medie ma sono costituiti da materiali non omogenei, quali ad esempio cemento e legno. In questi casi la base di misura deve essere grande rispetto alle dimensioni dei grani del materiale, pertanto si utilizzano estensimetri a base lunga i cui valori indicativamente variano tra 50 e 150 mm.

8) Durante il funzionamento l'estensimetro è soggetto ad una tensione di alimentazione E ed è attraversato da una corrente I. La potenza dissipata per effetto Joule dal sensore viene trasmessa sottoforma di calore e smaltita principalmente per conduzione. L'effetto principale è l'aumento di

temperatura del sensore e dipende dai valori di tensione di alimentazione, resistenza elettrica e dimensioni della griglia ed inoltre dalle caratteristiche termiche della struttura.

Un effetto secondario scaturente dall'aumento di temperatura è il fenomeno di deformazione apparente o di deriva.

Precisamente si definisce deriva $\Delta\varepsilon_0$ [$\mu m/m$] la variazione della deformazione indicata nel tempo da una installazione estensimetrica non deformata. Tale valore risulta nullo se il livello di alimentazione del ponte non supera un certo valore limite.

Il livello di alimentazione consentito per una data installazione si può determinare in base alla conoscenza della densità di potenziale ammissibile:

$$P'_e = \frac{P_e}{A_e}$$

dove A_e è l'area della griglia estensimetrica e P_e è il potenziale ammissibile.

Impiegando un ponte di Wheatstone per il condizionamento del segnale, la tensione di alimentazione E del ponte risulta:

$$E = \sqrt{P'_e * A_e * R_e}$$

I ponti commerciali sono in genere alimentati a tensione costante tra 0.5 e 5 volt. Se il valore di E disponibile risulta eccessivo allora si può ovviare al problema utilizzando una griglia più grande oppure un sensore con resistenza maggiore.

Si vuole riportare una tabella indicativa per i valori di densità di potenza ammissibile per estensimetri a lama. Si ricordi che il limite in densità di potenza è reso necessario dal fatto che l'aumento di temperatura indotto dalla dispersione di potenza per effetto Joule induce una dilatazione della griglia tale da modificarne la resistenza. Questo effetto andrebbe ad influenzare la misura per cui è necessario eliminarlo o perlomeno limitarlo in modo tale da renderlo compensabile o trascurabile.

Materiale	P'_e [mW/mm^2]	Note
Alluminio, rame	8 – 16	Provini spessi
Acciaio	3 – 8	Provini spessi
Resine rinforzate	0.3 – 0.8	Es: vetroresina
Resine non rinforzate	0.03 – 0.08	Es: resine acriliche

Costituzione di un estensimetro (Leghe utilizzate)

Costantana auto-compensata in temperatura: è la più anziana ma ancora la più usata in virtù della sua buona sensibilità alla deformazione. Ha una elevata resistività (anche con griglie piccole si possono avere resistenze elevate) e un coefficiente di temperatura non eccessivo. Ha una buona vita a fatica e una buona capacità di allungamento.

Difetti: Per temperature superiori a 65°C si ha una variazione permanente della resistenza ad ogni ciclo (deriva dallo zero).

Pregi: può essere trattata per l'autocompensazione termica.

Costantana trattata: utilizzata per misurare deformazioni superiori al 5%; è duttile: in griglie di 3mm può essere allungata del 20% o più.

Difetti: ha una variazione della resistenza ad ogni ciclo (zero non stabile); tendenza alla rottura se sottoposta a deformazioni ripetute. Mal si adatta all'impiego di deformazioni cicliche.

Legga isoelastica: si usa per misure puramente dinamiche perché ha una vita a fatica superiore rispetto alla lega in costantana e un migliore rapporto di taratura che migliora il rapporto segnale rumore.

Difetti: Non ha l'autocompensazione termica; ha una deriva dello zero; la sua risposta alla deformazione non è lineare

Legga Karma: ha una buona vita a fatica e un'eccellente stabilità. E' usata in misure statiche con un range di temperature da -260°C a +260°C circa. Se incapsulata in materiale inerte può essere fino a 400°C. Ha una curva termica più piatta quindi le correzioni di uscita termica sono più precise. Offre l'autocompensazione termica.

Materiali del supporto

Il supporto è quel componente dell'estensimetro sul quale è applicata la griglia. Esso svolge tre funzioni:

1. trasmettere la deformazione del provino alla griglia;
2. isolare elettricamente la griglia;
3. proteggere la griglia.

La scelta del supporto dipende dalle condizioni dell'ambiente in cui va ad operare il sensore. In genere sono realizzati in resine, ma possono essere utilizzati anche materiali ceramici o addirittura metallici.

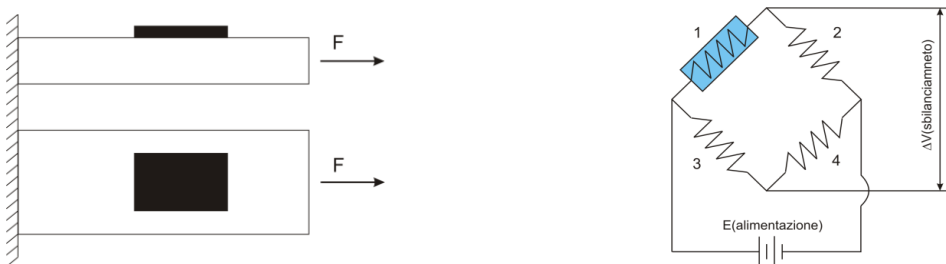
Supporto	ΔT [°C]	Note
Resina poliammidica	-200 ; +200	Di uso generale
Resina epossidica + fibra di vetro	-270 ; 230	
Resina fenolica + fibra di vetro	-200 ; +300	Per trasduttori e per Prove di lunga durata
Resina poliammidica + fibra di vetro	-200 ; +330	
Cemento ceramico	-200 ; +750	Per alte temperature
Piastrina di acciaio		ΔT dipende dal supporto primario

DISPOSIZIONE E MODALITA D'IMPIEGO

Sforzo assiale (trazione e compressione)

Il campione sottoposto ad uno sforzo assiale F produce sulla superficie A una sollecitazione $\sigma = \frac{F}{A}$ a cui è associata una deformazione assiale $\epsilon_a = \frac{F}{E \cdot A}$ nella stessa direzione di F, ed una deformazione trasversale $\epsilon_t = -\nu * \epsilon_a = -\nu * \frac{F}{E \cdot A}$ nella direzione normale ad F.

Nel caso di un unico elemento sensibile, la disposizione sul pezzo risulta come da figura.



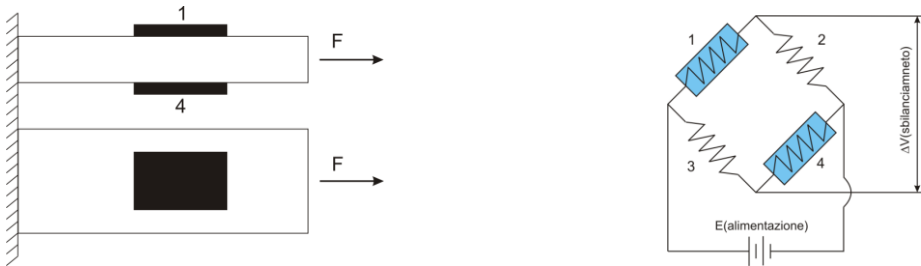
La configurazione a quarto di ponte risulta quindi la più immediata e semplice.

In questa situazione la tensione di sbilanciamento misurata risulta:

$$U = E * \frac{\delta}{4} = \frac{E}{4} * \frac{\Delta R}{R} = \frac{E}{4} * GF * \varepsilon_l$$

Data la sua semplicità, si va incontro a vari problemi. Il primo è la non compensazione di eventuali effetti termici per cui una variazione di temperatura del pezzo o dell'ambiente causerebbero errori di misura. Inoltre, nel momento in cui la sollecitazione non sia più solamente di trazione assiale subentrerebbero degli errori dati da effetti di deformazione trasversale o flessionale.

Si ricorre allora all'installazione di un ulteriore estensimetro, posizionato sulla superficie opposta .



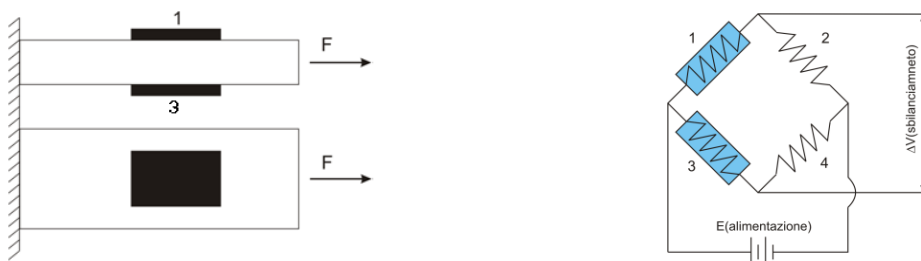
In questo modo il secondo sensore subisce la medesima sollecitazione assiale del primo. Nel caso di deformazioni dovute a flessione del pezzo esso risponde con una variazione di resistenza di egual modulo ma di segno opposto. Di conseguenza la sua naturale posizione all'interno del ponte è sul ramo opposto a quello occupato dal primo sensore. Il motivo è presto spiegato. Dal momento che le sollecitazioni di flessione vengono percepite in maniera opposta dai due estensimetri, collocandoli su rami opposti i loro effetti vengono a sommarsi. Si ottiene quindi la somma di due variazioni di resistenza con egual valore ma di verso opposto che va così ad annullare ogni effetto flessionale.

Si noti però che un eventuale variazione termica causa una dilatazione assiale del pezzo e quindi anche dei due sensori. Risulta perciò evidente che gli effetti della temperatura non sono compensati.

Utilizzando questa configurazione a mezzo ponte attivo si ha però il vantaggio di un incremento della sensibilità del ponte e la tensione misurata risulta:

$$U = \frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) = \frac{E}{4} * GF * (\varepsilon_1 + \varepsilon_4)$$

Se invece si ritiene di maggiore utilità compensare gli effetti della temperatura, mantenendo una configurazione a mezzo ponte attivo basta collegare il secondo sensore su uno dei due lati contigui a quello ove è stato cablato il primo



In questo modo, dato il naturale comportamento del ponte si ottiene una sottrazione degli effetti. Essendo la variazione di resistenza dovuta agli effetti termici identica per entrambi i sensori, la sua influenza sulla tensione di sbilanciamento risulta nulla poiché compensata dal ponte. Così facendo però si annullano anche i contributi di trazione per cui questo schema risulta inutile per la misurazione di forze assiali.

Consideriamo ora, allo stesso scopo di voler compensare gli effetti termici, di cambiare la disposizione del secondo sensore



Mentre il primo, disposto longitudinalmente subisce gli effetti dello sforzo assiale rispetto alla sua direzione principale, il secondo lo determina come variazione trasversale e quindi soggetta alla sensibilità trasversale la quale è notevolmente inferiore. Si rende così trascurabile l'effetto di F sul secondo sensore. Nel momento in cui subentra una sollecitazione di tipo termico entrambi i dispositivi subiscono la medesima dilatazione. Di conseguenza posizionandoli su rami adiacenti del ponte gli effetti termici vengono automaticamente compensati.

Come logica conseguenza, al fine di una più accurata misurazione si utilizza la configurazione a ponte attivo intero.



Sono applicati quattro estensimetri, 2 assiali e 2 trasversali, su due facce opposte del provino. In questo modo si ha compensazione degli effetti termici e flessionali.

Nello specifico i sensori 1 e 4 essendo installati longitudinalmente su facce opposte ed essendo cablati su lati opposti del ponte consentono di annullare gli effetti introdotti da sollecitazioni di flessione. Mentre il compito dei sensori 2 e 3 è quello di compensare le eventuali variazioni di resistenza introdotte da variazioni della temperatura.

La tensione misurata all'uscita risulta:

$$U = \frac{E}{4} * \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_4}{R_4} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) = \frac{E}{4} * GF * (\varepsilon_1 + \varepsilon_4 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3)$$

che si può esprimere anche come:

$$U = \frac{E}{4} * GF * \varepsilon_1 * 2(1 + \nu)$$

Flessione

La deformazione dovuta alla flessione prodotta dalla forza F agente a distanza L , dalla sezione di misura è:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{F * L}{W * E}$$

Dove W è il modulo di resistenza flessione della trave e ε è il valore dell'allungamento medio a distanza L da una sezione X-X. Esso è positivo sulla faccia superiore e negativo su quella inferiore.

Con il collegamento a quarto di ponte si riscontrano gli stessi problemi del caso soggetto a trazione.



Di fatti anche in questa situazione non si ha compensazione degli effetti termici ed anche eventuali sforzi assiali modificherebbero i valori di misura.

Se invece si passa alla configurazione a mezzo ponte attivo gli effetti termici e di trazione vengono compensati.



Di fatti sarebbero effetti concordi per entrambi i sensori per cui essendo posizionati su rami adiacenti del ponte verrebbero ad annullarsi a vicenda. Il valore della tensione di sbilanciamento per questa situazione risulta:

$$U = \frac{E}{4} * GF * (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)$$

Le due deformazioni sono di segno opposto quindi i contributi si sommano aumentando il livello di tensione in uscita.

Si deve però considerare un aspetto che introduce dell'errore nella determinazione della forza F : la distanza dei sensori dal punto di applicazione della forza. Il problema sussiste poiché la tensione interna al provino la quale causa la deformazione dello stesso è in funzione del momento flettente. In pratica essendo il sensore ad una certa distanza dal punto di applicazione della forza, subisce una deformazione in funzione della coordinata:

$$\sigma = \frac{F}{W} * L$$

Di conseguenza anche la deformazione subita dall'estensimetro varia a seconda della posizione che occupa sul provino dato che $\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$. Risulta perciò evidente che ai fini della misurazione è necessario conoscere tale coordinata. Come buona approssimazione si può misurare la distanza tra il punto in cui agisce la forza e il

punto medio della lunghezza della griglia estensimetrica. Per quanto però questa misura possa essere accurata è comunque affetta da un errore di fondo. Si intende cioè che su tutta la lunghezza della parte sensibile del componente la deformazione non è costante perciò la misurazione incorre in un errore sistematico. Al fine di poter affermare che tale influenza sulla misura possa essere considerata trascurabile si deve tener conto di due aspetti. Il primo riguarda il comportamento dello strumento. Infatti come noto l'estensimetro restituisce un valore medio delle deformazioni a cui è soggetto. Il secondo aspetto riguarda la geometria poiché anche la lunghezza della griglia dà il suo contributo all'errore. Pertanto si può affermare che un estensimetro più corto risponde in maniera più accurata.

Per avere una sensibilità maggiore del ponte, quando richiesta, si introduce la configurazione a ponte intero attivo



In questo modo si mantengono le compensazioni di eventuali effetti termici e di trazione andando inoltre a raddoppiare la sensibilità della misurazione rispetto al caso precedente. Di fatti la tensione di sbilanciamento contiene i contributi di deformazione di tutti e quattro i sensori il cui modulo ha il medesimo valore.

$$U = \frac{E}{4} * GF * (\varepsilon_1 + \varepsilon_4 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3) = \frac{E}{4} * GF * 4\varepsilon_1 = E * GF * \varepsilon_1$$

Torsione

In un elemento soggetto a torsione le tensioni principali sono disposte lungo l'elica assiale con inclinazione di 45° rispetto all'asse lungo il quale agisce lo sforzo torsionale. Perciò lungo tali direzioni si determinano lo scorrimento mutuo γ per cui la deformazione lineare ε determinata lungo l'elica risente del contributo di $\varepsilon_\tau = \gamma/2$. Quindi un primo approccio per la misurazione delle sollecitazioni di torsione può essere pensato tramite un estensimetro disposto sulla superficie del provino con una inclinazione di 45° rispetto all'asse sul quale agisce la sollecitazione. In questo caso si ricade nella configurazione a quarto di ponte data la presenza di un singolo sensore.



Con questo tipo di installazione si subiscono gli effetti termici e quelli introdotti da deformazioni di trazione e flessione rendendola inutilizzabile.

Per poter quindi effettuare delle misurazioni di torsione si rende necessario l'utilizzo di quattro estensimetri:



In questo modo si ottiene la misura della sola deformazione di torsione, mentre quelle spurie sono compensate. Per fare ciò è necessario che gli estensimetri disposti lungo la stessa elica siano inseriti sui lati opposti del ponte.

La medesima configurazione può essere utilizzata per la misurazione del taglio. Preso un elemento soggetto ad una forza T che produca flessione e taglio, le deformazioni principali sono disposte con la medesima inclinazione citata precedentemente (45°). In questo modo si può determinare lo scorrimento mutuo γ e di conseguenza determinare la tensione tangenziale causata dalla forza T :

$$\tau = G * \gamma$$

dove G è il modulo elastico trasversale.

Applicando poi la formula di Jourawsky si può risalire al valore della forza T. Per questo motivo risulta necessario che gli estensimetri quantifichino la deformazione di taglio del provino che risulta $\varepsilon_T = 4 * \varepsilon_\tau$.

Si noti che anche in questo caso la deformazione termica è compensata e che la misura non dipende dal punto di applicazione del carico.

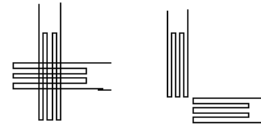
Rosette estensimetriche

Un limite che si evidenzia nella struttura degli estensimetri è la possibilità di effettuare misurazioni unicamente lungo una singola direzione. Questo aspetto dei sensori è molto limitante poiché in una vasta gamma di situazioni le tensioni sono multiple. Inoltre, ed è questo l'aspetto che si vuole evidenziare, molto spesso non si conosce la direzione principale delle deformazioni. Per questo motivo, data la necessità di dover misurare tensioni multi assiali con direzioni principali non note si ricorre all'utilizzo delle rosette estensimetriche. Questi sensori permettono di ricavare le tensioni su tre assi distinti. Essi sono costituiti da tre estensimetri disposti tra loro con un certo angolo e resi elettricamente indipendenti. Si possono avere due categorie di rosette: con griglie affiancate o con griglie sovrapposte. La differenza consiste nel fatto che, nel caso di griglie affiancate, la misura è relativa a tre zone adiacenti ma non coincidenti. Nel caso di griglie sovrapposte invece l'area di misurazione è più ristretta e riconducibile ad un unico punto. Questa seconda categoria di rosette presenta però dei problemi dal punto di vista termico. Di fatti la sovrapposizione di più sensori elettricamente isolati tra loro richiede un numero maggiore di strati di isolante. Di conseguenza insorgono problemi di smaltimento del calore i quali si pongono come limite operativo della rosetta. Inoltre la presenza di più strati di isolante creano dei microscorrimenti tra gli estensimetri generando delle componenti di errore nella misurazione.

Come criterio di selezione tra le due tipologie si deve considerare il comportamento dinamico delle deformazioni. Se quelle nel piano di misura variano rapidamente allora sono preferibile rosette a griglie sovrapposte. Se invece le deformazioni variano rapidamente nel piano ortogonale a quello di misura si preferiscano rosette a griglie affiancate.

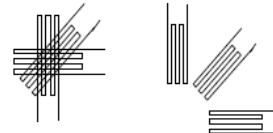
Di seguito sono elencati i tipi più comuni di rosette

.Rosetta rettangolare a 2 griglie: a 90° tra di loro



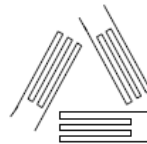
Utilizzate in condizioni di tensioni biassiali quando è noto l'orientamento delle deformazioni principali, i sensori vengono orientati nella loro stessa direzione.

.Rosetta rettangolare a 3 griglie: a 45° tra di loro



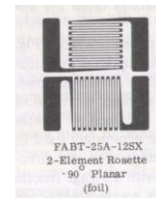
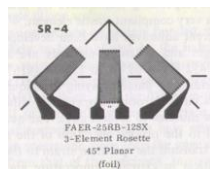
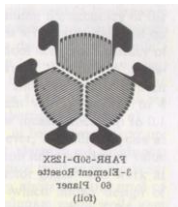
Utilizzate in condizioni di tensioni biassiali quando l'orientamento delle deformazioni principali è incognito.

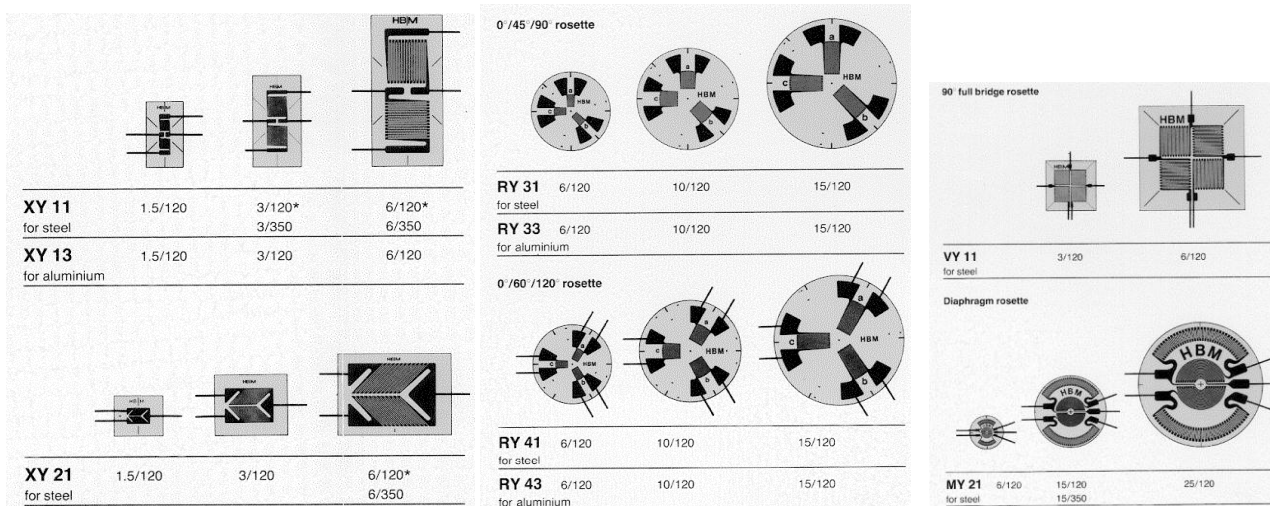
.Rosetta equiangola a 3 griglie (a delta): a 120° tra di loro



Utilizzate in condizioni di tensioni biassiali quando l'orientamento delle deformazioni principali è incognito.

Il risultato che si trova con la misurazione tramite rosette non è lo stato della deformazione, ma bensì le misure delle deformazioni subite dai sensori secondo le direzioni lungo le quali sono orientati. Risulta quindi necessario, al fine di determinare l'effettivo andamento delle tensioni reali sul provino, riportarsi alle direzioni principali. Per fare ciò si possono utilizzare i cerchi di Mohr oppure ricavare le espressioni per via analitica. Le relazioni forniscono i valori delle deformazioni principali le quali non dipendono dal materiale essendo derivate dalle formule di trasformazione dello stato di deformazione. Sussistono però delle condizioni da rispettare per poterle applicare. In primo luogo il materiale deve essere omogeneo a livello macro, in corrispondenza della rosetta. In secondo luogo, le deformazioni devono avere valori contenuti; indicativamente minori di $10000 \mu m/m$.





Incollaggio/installazione

Il buon incollaggio dell'estensimetro è fondamentale per l'attendibilità della misurazione, si rende dunque necessario seguire una specifica procedura ed una scelta oculata dei materiali da utilizzare.

Innanzitutto si deve scegliere il tipo di collante più adatto all'applicazione. A seconda della durata e dell'ambiente di lavoro si può scegliere tra vari tipi di collanti.

Il cianomonoacrilato è un adesivo monocomponente, senza solvente e di largo impiego per prove di routine a temperatura ambiente. Tale sostanza ha la caratteristica di polimerizzare rapidamente sotto una leggera pressione in presenza dell'umidità atmosferica che funge da catalizzatore. Si hanno poi adesivi a base epossidica, attualmente molto diffusi ma comunque, essendo a base organica, hanno un limite di temperatura abbastanza basso: tra -200 e +300°C. Per livelli termici superiori ai 350°C si ricorre quindi a materiali inorganici a base ceramica i quali possono sopportare temperature fino a 750°C.

Oltre al limite di temperatura si deve considerare la durata dell'installazione. Per prove a lunga durata si utilizzano adesivi ad azione lenta come le resine epossidiche o fenoliche. Se invece la durata dell'applicazione è breve sono consigliati materiali cianoacrilati.

Il primo passo della procedura di incollaggio degli estensimetri consiste nel preparare la superficie sulla quale si intende applicarli. Come prima cosa si deve pulire l'area con del solvente tipo clorotene o trielina. Successivamente è necessario trattare a secco con carta abrasiva e a seconda della classe di applicazione si deve avere una finitura superficiale specifica. Nella tabella seguente sono riportati i parametri:

CLASSE DI INSTALLAZIONE	FINITURA DELLA SUPERFICIE, rms
	micron
Analisi sperimentale delle sollecitazioni	1,6 - 3,2
Grande allungamento	> 6,4 a 45°
Trasduttori	0,4 - 1,6
Cemento ceramico	> 6,4

Una volta conclusa questa operazione si pulisca nuovamente la superficie con solvente e la si asciughi. Dopo aver segnato le linee di posizionamento togliere l'estensimetro dalla confezione e applicare una striscia di nastro adesivo. Posizionarlo sul punto desiderato e sollevarne un lembo ed applicare il collante senza abbondare. Lo strato di adesivo deve essere il minimo sufficiente per garantire la perfetta adesione col provino senza però risultare eccessivo. Il motivo risiede nel fatto che uno strato troppo spesso di collante consente delle deformazioni elastiche che falsano la misura. Una volta depositato l'adesivo

premere con forza sull'estensimetro e sulle zone attorno ad esso in modo da togliere eventuali bolle d'aria formatesi durante l'applicazione. Una volta terminata questa operazione si può rimuovere il nastro adesivo; cosa non obbligatoria dato che quest'ultimo può fungere da protezione per il sensore.

Lo step successivo consiste nel saldare i terminali dell'estensimetro ai cavi di collegamento con la centralina. Durante questa operazione fare attenzione a non danneggiare in alcun modo il sensore; è consigliabile quindi che lo strato di nastro adesivo rimanga applicato come copertura protettiva.

Si ricopra poi il tutto con del materiale protettivo al fine di ridurre le interferenze causate da umidità, oli, solventi ed azioni meccaniche esterne. Qui di seguito sono indicati alcuni tipi di materiali utili con i relativi campi di applicazione.

Protettivo	ΔT [°C]	Protezione da
Vernice uretanica	-50 ; +120	Umidità, olio, solventi
Resina siliconica	-50 ; +250	Umidità, olio, solventi
Resina nitrilica	-250 ; +150	Umidità, olio, solventi
Mastice	-50 ; +150	Azioni meccaniche, umidità, acqua anche in pressione
Gomma siliconica	-70 ; +250	Azioni meccaniche, umidità, acqua

Una volta terminata la procedura di incollaggio assicurarsi dell'integrità del sensore andando a misurarne la resistenza ai capi dei cavi della centralina. A seconda del tipo di ponte si avranno dei valori differenti sui vari fili.

Nel caso di ponte intero si possono avere due situazioni. I due fili appartengono ad una delle diagonali del ponte: il tester rileva due resistenze in parallelo entrambe formate dalla serie di due sensori dello stesso ramo. In questo caso se le quattro resistenze hanno valore 120Ω il tester mostra una misura di 120Ω data dal parallelo di due resistenze da 240Ω .

La seconda situazione si ha quando i due fili sui quali si effettua la verifica appartengono ai vertici del medesimo lato del ponte. La resistenza equivalente quindi è misurata come parallelo di una resistenza da 120Ω con una da 360Ω dando il risultato di 90Ω . Nel caso in cui i valori non siano coerenti si è eseguita una operazione di incollaggio errata.

Nel caso di mezzo ponte la misura può avvenire a cavallo di un lato o sulla diagonale. Nel primo caso si misura direttamente il valore di resistenza di un estensimetro, mentre nel secondo si misura un valore dato dalla serie di due resistenze.

Si verifichi inoltre l'isolamento elettrico tra sensore e provino.



2.1.4 SCELTA DELL'ESTENSIMETRO

I criteri di scelta dell'estensimetro sono basati sulle condizioni ambientali quali temperatura, umidità, campo magnetico e sulle condizioni di prova come valore e tipo di deformazione, durata della prova, materiale della struttura. In commercio esiste una grande varietà di estensimetri diversi per caratteristiche e prestazioni. Al fine di trovare il sensore più adatto si devono delle considerazioni riguardo :

1. la scelta della griglia:
 - materiale;
 - base di misura;
 - resistenza elettrica;
 - coefficiente di compensazione termica;
 - configurazione;
2. la scelta del supporto:
 - dipende essenzialmente dalla temperatura di prova;
3. la scelta dell'adesivo:
 - dipende essenzialmente dalla temperatura di prova, dalla compatibilità tra supporto e materiale del provino;
4. la scelta del protettivo:
 - dipende dalle condizioni ambientali e dalla durata della prova.

La determinazione di questi parametri deve essere fatta in base alle varie condizioni di lavoro. Per tale motivo si devono considerare un ampio numero di fattori la cui analisi permette di ricavare le caratteristiche ottimali che l'estensimetro deve avere per soddisfare i vincoli presenti.

Fattori che influenzano la scelta del sensore:

Condizioni meccaniche	Stato tensioni	Uni o bidirezionali		
		Direzione delle tensioni principali		
	Tipo carico	Statico		Ampiezza
				Direzione
	Dinamico			Numero di carichi
				Tipo
				Ampiezza
		Numero di cicli		
	Offset			
Condizioni elettriche	Circuito di misura	Configurazione ponte		
	Alimentazione	Tensione continua		
		Tensione alternata		
	Cablaggio	Resistenza		
		Isolamento		
		Capacità		
connessioni				
Condizioni ambientali	Durata	Vita del sistema		
	Temperatura	Valore		
		Variazioni		
		Coefficiente espansione materiale		
	Fattori esterni	Umidità		
		Pressione		
		Forze esterne		
		Elementi chimici		
Campi elettrici e magnetici				

2.2 SENSORI PIEZOELETTRICI

Principio piezoelettrico

La piezoelettricità è la proprietà di alcuni cristalli di generare una carica elettrica al loro interno quando soggetti a deformazione meccanica. La prima dimostrazione sperimentale di un collegamento tra i fenomeni piezoelettrici macroscopici e la struttura cristallografica è stata pubblicata nel 1880 dai fratelli Curie. Il loro esperimento consisteva nella misura conclusiva delle cariche superficiali che compaiono sui cristalli, preparati in modo particolare e sottoposti ad uno sforzo meccanico.

In pratica un cristallo piezoelettrico, se soggetto ad una sollecitazione meccanica su due facce opposte, accumula su di esse delle cariche di segno opposto. Si può quindi associare questo suo comportamento a quello di un condensatore al quale è stata applicata una differenza di potenziale. Se le due facce vengono messe in collegamento tramite un circuito esterno, su di esso circola una corrente denominata corrente piezoelettrica poiché direttamente causata dagli accumuli di cariche sul cristallo. Questo comportamento del materiale viene detto effetto piezoelettrico diretto. Si deve notare infatti che esiste un effetto piezoelettrico inverso, dedotto matematicamente dai principi termodinamici fondamentali da Lippmann nel 1881. Questo secondo aspetto, come viene appunto definito, corrisponde ad una variazione delle tensioni interne del cristallo quando esso è soggetto ad un campo elettrico.

In natura esistono vari materiali con caratteristiche piezo quali quarzo, tormalina, sale di Rochelle. Inoltre ne sono di natura sintetica come ad esempio i piezopolimeri ed i piezocompositi quali il titanato-zirconato di piombo (PZT) e il polifluoruro di vinile (PVF2).

Le proprietà piezoelettriche sono dovute alla struttura cristallina del materiale la quale ha un comportamento anisotropo. I cristalli di natura sintetica si definiscono tali poiché la loro configurazione originale non gode di alcuna proprietà piezoelettrica. Questo è dovuto alla simmetria della disposizione atomica della struttura cristallina per cui in assenza di sollecitazioni non presenta alcuna polarità di carica elettrica. Sotto l'azione di un campo elettrico o di una sollecitazione meccanica, l'atomo centrale si sposta causando uno squilibrio nelle cariche dando luogo alla formazione di un dipolo elettrico. Questo processo prende il nome di polarizzazione e consiste nell'orientazione dei dipoli elettrici all'interno del reticolo cristallino.

Per capire come un materiale con caratteristiche piezoelettriche possa fungere da sensore per la misurazione di forze è necessario capire il legame esistente tra le sollecitazioni meccaniche e l'accumulo di cariche interne al cristallo.

Con riferimento all'effetto piezoelettrico diretto, si consideri un cilindro di materiale piezo di lunghezza L e sezione A in cui le due facce alle estremità siano poste in cortocircuito. Il materiale in esame abbia un coefficiente di Young E ed una costante di deformazione piezoelettrica d noti. Se si applica una forza esterna la quale causi una deformazione in campo lineare elastico, allora valgono le seguenti relazioni:

$$\sigma = E * \varepsilon \quad e \quad D = d * \sigma$$

In queste formule σ rappresenta la tensione di sollecitazione interna al materiale espressa in $[N/m^2]$ e D invece la densità di carica in $[C/m^2]$.

Considerando ora l'effetto piezoelettrico inverso, applicando quindi un campo elettrico $U = V/L$ in cui V è la tensione applicata e L è la lunghezza del concio di materiale, si avrà:

$$\varepsilon = d * U \quad e \quad D = e * U$$

dove e è la costante di permittività elettrica $[C^2/Nm]$.

Si arriva quindi ad esprimere i legami in forma diretta ed inversa per i parametri caratterizzanti il fenomeno piezoelettrico.

$$\begin{pmatrix} \varepsilon \\ D \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & d \\ d & e \end{bmatrix} * \begin{pmatrix} \sigma \\ U \end{pmatrix} \quad \text{legame in forma diretta}$$

$$\begin{pmatrix} \sigma \\ U \end{pmatrix} = \frac{1}{1-k^2} \begin{bmatrix} E & -(Ed/e) \\ -(Ed/e) & 1/e \end{bmatrix} * \begin{pmatrix} \varepsilon \\ D \end{pmatrix} \quad \text{legame in forma inversa}$$

Dove $k = d \sqrt{\frac{E}{e}}$ è il coefficiente di accoppiamento piezoelettrico, il quale varia nel range (0;1).

La costante di deformazione piezoelettrica d è responsabile dell'accoppiamento elettromeccanico ed è proporzionale alla capacità del materiale di convertire energia meccanica in energia elettrica e viceversa. Il valore di tale costante si determina attraverso il rapporto:

$$d = \frac{\text{densità di carica di cortocircuito}}{\text{stress meccanico applicato lungo una direzione}}$$

Effettuando una prova meccanica di trazione a circuito aperto non si ha spostamento elettrico per cui la densità di carica $D=0$ quindi:

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{E}{1-k^2} * \varepsilon = E^* * \varepsilon \\ U &= -\frac{k^2}{d(1-k^2)} * \varepsilon \end{aligned}$$

Dove $E^* = \frac{E}{1-k^2}$ è il modulo elastico a circuito aperto.

Si osservi che $E^* > E$ e la differenza dipende dal coefficiente di accoppiamento k .

Si arriva quindi a stabilire con che legame tra tensione e sollecitazioni si manifesta l'effetto piezoelettrico. Questo risultato evidenzia come siano correlati i due aspetti e quindi anche come si possano sfruttare al fine di implementare dispositivi atti alla misurazione di grandezze meccaniche attraverso grandezze elettriche.

2.2.1 STRUTTURA

I materiali con caratteristiche piezoelettriche, come noto, se soggetti ad una forza esterna applicata su due superfici contrapposte generano una carica proporzionale distribuita sulle facce del pezzo. La differenza di potenziale che si viene così a creare permette di risalire alla misura della forza agente sull'elemento.

Per i sensori costituiti da materiali piezoelettrici la determinazione della forza avviene in maniera indiretta. Difatti dalla misura della tensione creatasi ai capi del pezzo si determina lo sforzo subito dal materiale. Essendo inoltre nota la sezione interna del pezzo allora si può arrivare a quantificare la forza esterna agente. Con riferimento al legame in forma diretta tra densità di carica e sollecitazione, cioè quando si applica una forza e si determina un accumulo di carica, si ottiene:

$$\sigma = \frac{k}{1-k^2} * \left[E^* * \varepsilon - \frac{E^* d}{e} * D \right]$$

con : σ = sollecitazione del materiale $[N/mm^2]$;

$k = d \sqrt{\frac{E}{e}}$ = coefficiente di accoppiamento piezoelettrico;

ε = deformazione $[\mu m/m]$;

E = modulo di Young;

$d = \frac{\text{densità di carica di cortocircuito}}{\text{stress meccanico applicato lungo una direzione}}$ = costante di deformazione piezoelettrica;

e = costante di permittività elettrica $[C^2/Nm]$.

Si deve inoltre considerare i parametri elettrici del materiale quali resistenza e capacità. Come può risultare evidente ogni materiale possiede un determinato valore di resistenza, costante e proporzionale alla geometria del pezzo. La capacità invece risulta direttamente proporzionale alla deformazione subita durante la sollecitazione. Da qui si evince come una forza esterna generi degli accumuli di cariche sui materiali con caratteristiche piezoelettriche.

Dato un pezzo di dimensioni noti, area A e spessore s risulta:

$$R = \rho * \frac{s}{A} \quad [\Omega]$$
$$C = \varepsilon * \frac{A}{s} \quad [C]$$

Gli elementi utilizzati come materiali piezoelettrici godono di una rigidezza del cristallo dell'ordine di $10^{11} [N/m^2]$ che essendo relativamente modesta, fa sì che una sollecitazione anche di piccola intensità generi un segnale di uscita apprezzabile.

Si può quindi capire come questi materiali siano utili per lo sviluppo di sensori di forza.

In via generale tali dispositivi presentano delle caratteristiche di grande utilità dovute al materiale stesso di cui sono composti. Per prima cosa bisogna evidenziare come un sensori piezoelettrici producano un segnale elettrico quando sottoposti a tensioni esterne pur considerando che l'elemento sensibile sul quale è applicata la forza non subisce deformazioni. Inoltre possiedono un ampio intervallo di valori in cui la risposta è del tutto lineare, assoluta insensibilità a campi magnetici e radiazioni che permettono così di effettuare misurazioni anche in ambienti ostili. Un ulteriore aspetto dei materiali piezoelettrici è l'impossibilità di utilizzarli per misurazioni statiche. Questo svantaggio deriva dal fatto che una forza statica crea un accumulo di cariche nel materiale finito e costante. Nel momento in cui si applica un circuito di misura, esso causa un assorbimento ed una dispersione di elettroni che innescano un processo di baseline wander. In pratica si tratta di un decadimento del segnale. Per rendere il concetto ancora più chiaro si pensi che il materiale soggetto a forze può essere comparato ad un condensatore. Nel momento in cui la forza è costante, la carica generatasi nel condensatore raggiunge un certo livello. Quando poi si collega ad un circuito esterno, nello specifico quello di misura, il condensatore inizia a scaricarsi per via dell'assorbimento della linea. Ne consegue una caduta di potenziale e quindi un decadimento del segnale di misura.

Per questo motivo l'utilizzo di dispositivi piezoelettrici viene limitato a misure dinamiche o al più quasi statiche.

Si vuole ora analizzare le caratteristiche principali dei materiali utilizzati ed i relativi pregi e difetti.

Innanzitutto si devono distinguere tre classi di materiali atti allo sviluppo di sensori piezoelettrici:

- 1) Cristallini;
- 2) Ceramiche;
- 3) Polimeri;

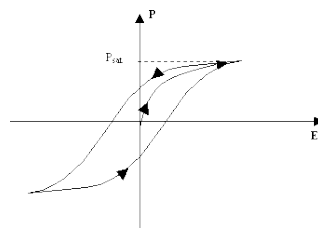
I materiali cristallini godono della proprietà piezoelettrica per loro natura. Sono elementi quali il quarzo ed i Sali di Rochelle che manifestano tale caratteristica a livello naturale.

Vi sono poi i ceramici ed i polimeri. Queste due categorie includono materiali che allo stato naturale non presentano alcuna caratteristica piezoelettrica. Di conseguenza al fine di poter essere utilizzabili necessitano di particolari trattamenti. Il maggiormente diffuso è il processo di polarizzazione o poling. La base teorica sulla quale è sviluppato riguarda la struttura dei cristalli.

I materiali policristallini sono costituiti da un gran numero di grani cristallini orientati in maniera casuale. Se ad essi si applica una forza esterna non si rileva alcun accumulo di cariche ordinate, cioè non godono dell'effetto piezoelettrico. Nel momento in cui però, si riesce ad orientare le cariche all'interno dei cristalli si può ottenere un comportamento del tutto simile ai materiali che posseggono tale caratteristica. La polarizzazione si basa proprio su questo concetto.

Applicando un forte campo elettrico al cristallo si ottiene un materiale nel quale si sono creati dei dipoli elettrici interni disposti in un'unica direzione. Il campo elettrico necessario al fine di innescare questa reazione deve essere molto elevato, indicativamente tra 1 e 4 MV su metro di materiale.

Mettendo a confronto l'andamento del campo elettrico con il livello di polarizzazione si riscontra che esistono un limite superiore ed uno inferiore entro i quali far variare E ed oltre i quali il livello di polarizzazione non cambia. Di fatti i materiali su cui si vuole orientare i dipoli hanno un limite fisico di polarizzazione ammissibile. Il comportamento relativo tra i due parametri risulta descrivibile come un ciclo di isteresi: applicando un campo elettrico crescente la polarizzazione aumenta fino ad arrivare al livello massimo. Se poi si diminuisce E, essa cala fino a raggiungere il livello massimo di polarizzazione opposta.



Il vantaggio di utilizzare materiali non piezoelettrici e indurre in essi tale comportamento, è quello di ottenere una elevata efficienza di trasformazione elettro-meccanica. Inoltre essi permettono di ottenere una vasto range di forme realizzabili poiché godono di una maggiore lavorabilità. Di conseguenza si può pensare anche ad uno sviluppo industriale di sensori ad effetto piezoelettrico.

Bisogna però tener presente alcuni aspetti negativi legati alla polarizzazione.

In primo luogo l'efficienza del processo che seppur elevata comunque varia tra l'83 ed il 91%. Un ulteriore svantaggio dell'utilizzo di materiali in cui l'effetto viene indotto è l'invecchiamento. Fenomeno questo, che si manifesta come perdita della proprietà piezoelettrica col passare del tempo, fino alla totale perdita di ogni caratteristica. Si tenga presente che, in ogni caso è possibile ri-polarizzare i materiali al fine di far riacquisire loro le caratteristiche.

Per questo tipo di materiali si deve inoltre tener conto della temperatura. La proprietà piezoelettrica permane nel materiale fino a quando esso non supera un ben definito limite di temperatura chiamata temperatura di Curie. Di fatti, nel momento che la si supera, il materiale subisce una transizione di fase nella struttura cristallina tale da determinare la perdita delle proprietà piezoelettriche.

Esistono anche altre cause di depolarizzazione del materiale dovute ad agenti esterni al sensore. Di fatti questo fenomeno può essere indotto da forti campi elettrici in direzione opposta a quella di polarizzazione, da forti campi elettrici alternati, o da forti stress meccanici.

Data la dipendenza della costante dielettrica dei materiali dalla temperatura risulta possibile, al fine di realizzare un processo di polarizzazione, diminuire il campo elettrico. Di fatti si distinguono due tipologie di processi di polarizzazione. Il primo avviene a temperatura bassa ed elevato campo elettrico, ad esempio 3KV/mm a 120°C per 40 minuti. Mentre il secondo al contrario utilizza una temperatura più elevata ed un campo elettrico inferiore ad esempio 40V/mm a 380°C per 5 minuti.

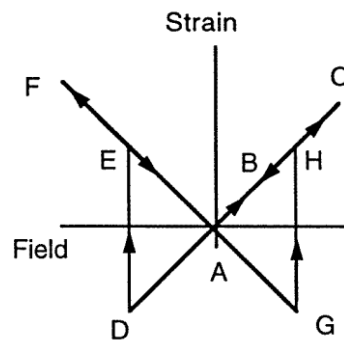
Si vuole ora analizzare il comportamento di un materiale piezoelettrico quando soggetto ad un campo elettrico esterno E.

Con riferimento al grafico ad ali di farfalla si vede che

A-C-B Applicando E nella direzione di polarizzazione il materiale subisce un allungamento cioè $\epsilon > 0$.

A-D-E Se si inverte E il materiale inizialmente si contrae $\epsilon < 0$ finché il campo non raggiunge un valore tale da far invertire la direzione di polarizzazione del materiale.

E-F Per valori di E minori di suddetto limite si ha l'inversione del dipolo e quindi il materiale torna ad allungarsi.



Il modo in cui si deforma il materiale dipende inoltre dalla forma geometrica che possiede e dalla direzione della forza esterna applicata. Si possono quindi distinguere tre effetti principali.

Effetto trasversale

Applicando una forza lungo un asse neutro y, si viene a creare un accumulo di cariche lungo l'asse ad esso perpendicolare (x). La quantità di carica accumulabile dipende dalle caratteristiche geometriche del pezzo. Definendo le dimensioni come a, b e c si ha la relazione:

$$C_x = d_{xy} * F_y * \frac{b}{a}$$

Dove a è la dimensione lungo la quale agisce la forza, mentre b è quella sulla quale si crea l'accumulo di cariche. d_{xy} è il coefficiente piezoelettrico corrispondente.

Effetto longitudinale

In questo caso la quantità di cariche prodotta è strettamente proporzionale alla forza applicata ed indipendente dalla dimensione e dalla forma del pezzo. Di conseguenza, per aumentare l'effetto piezoelettrico e quindi la quantità di cariche accumulabili si devono porre in serie più elementi i quali devono essere collegati in parallelo. La carica quindi risulta:

$$C_x = d_{xx} * F_x * n$$

Dove d_{xx} il coefficiente piezoelettrico per una carica lungo la direzione x, generata da una forza applicata sul medesimo asse. F_x è la forza lungo la direzione x ed n corrisponde al numero di elementi piezoelettrici sui quali la forza agisce.

Effetto di taglio

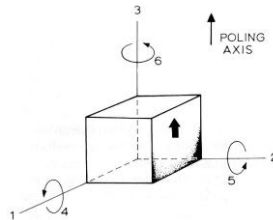
Anche in questo caso la quantità di carica dipende dalla forza applicata ed è indipendente da forma e dimensioni del pezzo. Dati n elementi posti in serie e collegati in parallelo risulta:

$$C_x = 2 * d_{xx} * F_x * n$$

Risulta evidente come si possa sfruttare l'effetto trasversale, diversamente da quello longitudinale e di taglio, al fine di permettere una calibrazione della sensibilità tra la forza applicata e la quantità di cariche prodotte attraverso la modifica dei parametri geometrici del materiale piezoelettrico.

Coefficienti e parametri piezoelettrici

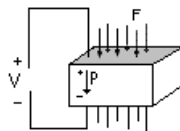
Normalmente nello studio delle proprietà dei piezoelettrici si utilizzano dei coefficienti standardizzati (tensori dipendenti da temperatura, pressione e campo elettrico) ed un sistema di assi di riferimento. Per convenzione si adotta, come evidenziato in figura, l'asse 3 come l'asse coincidente con la direzione di polarizzazione ed 1 e 2 sono gli assi ad esso normali. Inoltre con i numeri 4,5,6 si identificano i vari piani di taglio.



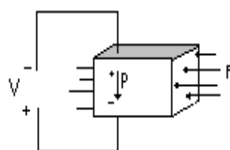
I coefficienti piezoelettrici d [C/N], esprimono il rapporto fra la carica generata e la sollecitazione meccanica applicata. Dato che i due parametri agiscono lungo degli assi, risulta evidente come il coefficiente debba contenere un doppio pedice al fine di esprimere le direzioni dei due effetti. Il primo pedice si riferisce alla carica prodotta, mentre il secondo è relativo alla direzione della sollecitazione meccanica applicata.

Si ottengono quindi dei coefficienti differenti a seconda del tipo di deformazione che il materiale subisce. Di seguito si riportano i tre principali, legati agli effetti sopraelencati.

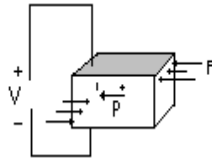
d_{33} : relativo all'effetto longitudinale. La forza è diretta lungo l'asse di polarizzazione ed agisce sulla stessa superficie su cui si accumulano le cariche. Essendo la sollecitazione parallela al momento di dipolo, si ha un incremento della polarizzazione spontanea lungo l'asse .



d_{31} : relativo all'effetto trasversale. La forza è diretta lungo l'asse 1, ortogonale alla carica che si accumula sulla superficie 3.



d_{14} : relativo all'effetto di taglio. La forza applicata è di taglio e la carica si accumula sulla superficie 1.



Un ulteriore fattore che caratterizza lo studio dei materiali piezoelettrici è il coefficiente di tensione. Esso viene definito come il campo elettrico prodotto nel materiale da uno stress meccanico unitario ed indica la sensibilità del materiale alla piezoelettricità. Esso deve avere un valore sufficientemente elevato in modo da poter rilevare il segnale generato.

$$g = \frac{\text{campo elettrico a circuito aperto}}{\text{stress meccanico applicato}} \quad \left[V * \frac{m}{N} \right]$$

Anche questo coefficiente è legato al tipo sollecitazione che subisce il materiale:

g_{33} : relativo all'effetto longitudinale. Il campo elettrico e la sollecitazione meccanica sono Entrambi lungo la direzione di polarizzazione.

g_{31} : relativo all'effetto trasversale. La forza è diretta lungo l'asse 1 ed è ortogonale alla tensione che si sviluppa lungo l'asse di polarizzazione (3).

g_{14} : relativo all'effetto di taglio. La forza applicata è di taglio e la tensione si sviluppa sul primo asse.

Questi due coefficienti sono legati da una relazione lineare per mezzo della costante dielettrica assoluta ϵ :

$$d_{ij} = \epsilon * g_{ij}$$

Il fattore di accoppiamento elettromeccanico k invece è l'indice di conversione di energia da elettrica a meccanica. Viene definito come radice del rapporto tra energia elettrica prodotta ed energia meccanica data dalla sollecitazione esterna. Si può quindi scrivere:

$$k_{ij} = \sqrt{\frac{W_i^e}{W_j^m}}$$

dove W_i^e rappresenta l'energia elettrica sviluppata lungo l'asse i e W_j^m l'energia meccanica lungo l'asse j . Tale fattore di accoppiamento generalmente viene anche considerato come semplice rapporto, escludendo la radice. Si deve inoltre considerare che l'energia in ingresso non è mai totalmente convertita quindi il coefficiente k_{ij}^2 risulta costantemente inferiore all'unità. Inoltre esso definisce la larghezza di banda per filtri e trasduttori che il materiale riesce a garantire. Valori tipici sono:

materiale	k_{ij}^2
Quarzo	0.01
Titanato di bario	0.4
Ceramiche PZT	0.5 ; 0.7

L'efficienza di conversione per un elemento piezoelettrico sollecitato in compressione alla sua frequenza di risonanza è data dalla seguente formula:

$$\eta = \frac{\frac{k^2}{2 * (1 - k^2)}}{\frac{1}{Q} + \frac{k^2}{2 * (1 + k^2)}}$$

dove risulta evidente il legame con il coefficiente di accoppiamento e quello di merito. Quest'ultimo si esprime come rapporto tra la reattanza e la resistenza del circuito equivalente:

$$Q = \frac{1}{2\pi * f_R * RC}$$

con f_R frequenza di risonanza del materiale. Il fattore di merito occupa un range di valori tra 50 e 10^6 .

Come risulta evidente, l'efficienza del materiale è quindi in funzione della frequenza di risonanza anche se essa dipende in misura maggiore dal coefficiente di accoppiamento elettromeccanico.

L'efficienza dei materiali piezoelettrici è determinata dal fatto che essi presentano delle perdite di tipo dielettrico e meccanico se sottoposti a sollecitazioni alternate. Per poter quantificare questi fenomeni si utilizza l'angolo di perdita δ_e . Per determinarlo si devono fare alcune considerazioni utilizzando l'analogia dei materiali piezoelettrici con i condensatori. Se infatti si pensa al dielettrico come ad un condensatore a facce piane parallele, di dimensioni finite e distanza limitata, se si applica una tensione di alimentazione alternata ad una frequenza f , la corrente non è in quadratura ma bensì presenta una componente di fase con la tensione stessa. Di conseguenza lo sfasamento risulta minore di $\pi/2$ ed il suo complementare a 90° è appunto δ_e .

Di conseguenza ogni materiale piezoelettrico presenta un angolo di perdita specifico e quindi un fattore di perdita dielettrica definito come $\tan \delta_e$. Questo coefficiente è adimensionale ed indica il rapporto tra la potenza attiva dissipata e quella reattiva totale.

Allo stesso modo, applicando al materiale una sollecitazione alternata, si riscontra un fattore di perdita meccanica $\tan \delta_m$.

Al fine di rendere più comprensibile la trattazione dei vari coefficienti e fattori che caratterizzano i materiali piezoelettrici, di seguito viene riportata una tabella esemplificativa.

	Titanato di Berio BaTiO ₃	Titanato di Piombo PbTiO ₃	Soft PZT	Hard PZT	Metaniobato di Pb modificato (BaPb)Nb ₂ O ₆	Titanato di Bismuto Ne _{0.5} Bi _{4.5} Ti ₄ O ₁₅	Quarzo SiO ₂
Struttura cristallina	Perovskite	Perovskite	Perovskite	Perovskite	Tungsten-Bronze	Bismuth	α -Quartz
Temperature di Curie [°C]	120	430	220	350	400	675	573
Permittività ϵ	1070	200	2700	1000	300	165	4.5
Coefficiente piezoelettrico di deformazione *10 ⁻¹² [C/N]							
d_{33}	133	58	490	220	85	≥ 18	-
d_{31}	-44	-7	-230	-100	-15	-	-
d_{15}	-	71	670	320	105	14	-
Coefficiente piezoelettrico di tensione 10 ⁻³ [Vm/N]							
g_{33}	14	33	21	25	32	14.5	50
g_{31}	-5	-4	-10	-11	-7	-3	-
g_{15}	-	32	28	36	31	9	-
Coefficiente di accoppiamento elettromeccanico %							
k_{33}	44	48	70	61	30	15	-
k_{31}	15	6	36	30	1	2	-
k_{15}	-	35	67	54	2	8	-
Fattore di perdita meccanico Q_m	720	2000	75	900	15	100	10 ⁶
Fattore di dissipazione $\tan\delta$ %	0.5	0.6	2	0.4	0.01	0.01	-

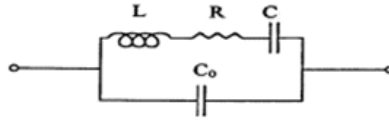
Come si è potuto vedere i sensori piezoelettrici sono maggiormente impiegati per misurazioni dinamiche con frequenze anche molto elevate (nell'ordine delle decine di KHz). Risultano invece poco sfruttati per misurazioni statiche. Molti produttori di questa tipologia di sensori di fatti molto spesso omettono di caratterizzare i propri prodotti sotto tale aspetto anche se consentono un utilizzo per misurazioni in condizioni quasi statiche. La quasi staticità di una misurazione però necessita di essere quantificata in termini di frequenza al fine di poter determinare il limite operativo dei dispositivi. A tale proposito si trovano in commercio sensori in cui viene dichiarata un limite inferiore di operatività sotto il quale non viene garantita la linearità della risposta del sistema. I valori più comuni variano dai centesimi ai millesimi di Hertz toccando valori anche inferiori. Tali dispositivi in pratica permettono di effettuare misurazioni di forze le cui variazioni avvengono in periodi di tempo molto ampi.

Per poter meglio comprendere quanto sia verosimile l'utilizzo del termine quasi statico si riporta di seguito un estratto da un catalogo (PCB Piezotronics):

Frequenza minima [Hz]	Frequenza massima[Hz]
0.01	90000
0.001	90000
0.006	90000
0.0003	35000
0.0003	50000
0.0003	60000

2.2.2 CONDIZIONAMENTO

Per poter introdurre lo studio delle strutture elettriche necessarie per lo sviluppo di sensori di forza piezoelettrici è necessario innanzitutto capire come si presenta dal punto di vista elettrico il materiale. Considerando un campione di piezoelettrico metallizzato su due facce piane parallele di superficie $A [m^2]$, distanti tra loro $t [m]$, vicino alla frequenza di risonanza, è costituito da una induttanza L , una resistenza R ed una capacità C in serie tra loro. Queste sono a loro volta in parallelo con la capacità effettiva del materiale C_0 .



I parametri L, C, R rappresentano rispettivamente masse, elasticità e dissipazione meccanica. L'impedenza elettrica complessiva del modello risulta quindi:

$$Z(\omega) = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} + \frac{1}{j\omega C_0}$$

Ponendo $X_L = \omega L$, $X_C = \frac{1}{\omega C}$, $X_0 = \frac{1}{\omega C_0}$ e $X = X_L - X_C$ si ottiene

$$Z(\omega) = X_0 * \frac{R + jX}{(X_0 - X) + jR}$$

Normalizzando, l'impedenza risulta espressa con i termini reale ed immaginario separati:

$$Z(\omega) = \frac{X_0^2 R}{(X_0 - X)^2 + R^2} + j \frac{X_0 [X * (X_0 - X) - R^2]}{(X_0 - X)^2 + R^2} = A(\omega) + jB(\omega)$$

Da una immediata analisi si può affermare che il termine reale risulta sempre positivo mentre il coefficiente dell'immaginario si annulla per:

$$X_{1,2} = \frac{1}{2} * \left(X_0 \pm \sqrt{X_0^2 - 4R^2} \right)$$

Dato che il valore della resistenza R è trascurabile rispetto X_0 , le soluzioni ammettono tale approssimazione e quindi risultano $X_1 = 0$ e $X_2 = X_0$. Da questo punto si possono ricavare le pulsazioni fondamentali che caratterizzano il comportamento del materiale:

$$\omega_1 \approx \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

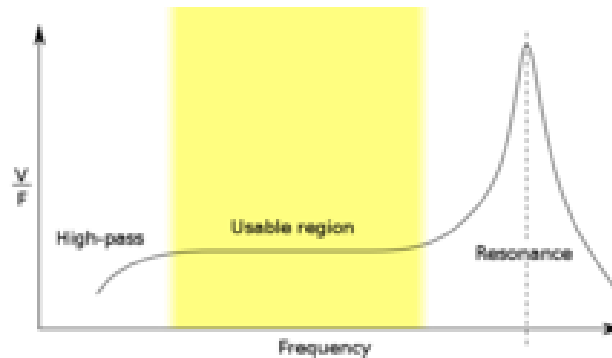
$$\omega_2 \approx \sqrt{\frac{1}{L} * \frac{C + C_0}{C * C_0}} = \sqrt{\frac{1}{LC'}}$$

dove C' è il valore dato dalla serie di C e C_0 .

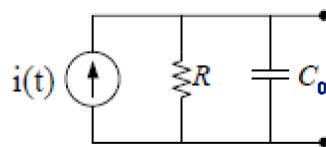
Una ulteriore considerazione riguarda i valori di suddette capacità. Infatti di norma, nei materiali piezoelettrici la capacità effettiva è superiore alla capacità associata all'elasticità del materiale stesso ($C < C_0$). Ne consegue che la pulsazione ω_1 risulta, anche se di poco, minore di ω_2 .

Si può quindi anche affermare che la pulsazione di risonanza ω_1 dipende esclusivamente dalle caratteristiche fisiche e meccaniche del materiale. La pulsazione di antirisonanza ω_2 invece, essendo in funzione anche di C_0 , dipende dai parametri geometrici del campione.

Essendo le due pulsazioni molto vicine tra loro, in prima approssimazione si possono considerare come un unico valore. In questo modo si riscontra un picco di risonanza nell'andamento della risposta in frequenza del materiale. Dato inoltre che per frequenze troppo basse si ha perdita del segnale, un sensore piezoelettrico presenta una banda limitata in cui può essere utilizzato. In tale fascia di valori inoltre si riscontra che sussiste una buona linearità tra la forza applicata e la risposta del materiale. Nel grafico seguente viene evidenziata tale regione allo scopo indicativo di voler evidenziare l'esistenza di una banda al di fuori della quale l'elemento piezoelettrico risulta inutilizzabile ai fini della misurazione.



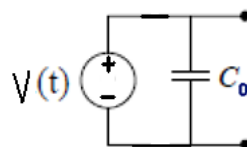
Alla luce delle considerazioni sopra esposte, si può ridefinire il circuito elettrico equivalente semplificato, la cui validità è garantita dalle approssimazioni praticabili sul modello. In questo modo, lo schema elettrico consiste di un generatore di corrente in parallelo con una resistenza R e la capacità C_0 .



La carica q che si genera sotto l'applicazione di una forza esterna F è data dalla formula $q = F * d$, con d coefficiente di carica piezoelettrica. Di conseguenza la corrente che si instaura vale:

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} = d * \frac{dF(t)}{dt}$$

Il circuito precedente si può anche vedere come un generatore di tensione in parallelo alla capacità C_0 .



In questo modo la tensione ai capi del sensore si può direttamente collegare alla carica generata dal materiale e quindi alla forza esterna applicata. Di fatti risulta:

$$V(t) = \frac{Q(t)}{C_0} = \frac{d}{C_0} * F(t)$$

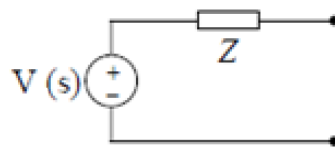
Da questa formula si evince in maniera diretta quale sia il legame tra il segnale generato da un piezoelettrico e la forza esterna agente su di esso. Sussiste infatti una relazione lineare determinata dal valore di capacità effettiva e dal coefficiente piezoelettrico. Entrambi questi valori sono noti poiché caratteristici del materiale di cui è costituito il sensore.

Passando ora ad un'analisi del circuito tramite le impedenze (analisi in s:Laplace), si trova che l'impedenza equivalente e la tensione valgono:

$$Z = \frac{R}{RC_0s + 1}$$

$$V(s) = I(s) * Z$$

Il circuito quindi risulta



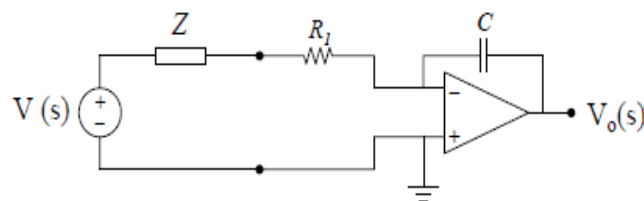
Si noti che la costante di tempo del circuito $\tau = RC_0$ è un parametro molto importante e caratterizza il comportamento dinamico del sensore. Essa infatti determina le prestazioni del sensore poiché il suo valore influisce sul decadimento del segnale. Un elevato valore di τ quindi determina una risposta del segnale meno reattiva e più stabile, adatta per segnali a bassa frequenza. Se al contrario ha valori bassi, la risposta risulta più immediata e di conseguenza anche il decadimento del segnale.

Essendo una componente molto importante, si ritiene opportuno capire quali parametri la possono influenzare, per questo si può esplicitare come segue.

$$\tau = RC_0 = \rho * \frac{s}{A} * \varepsilon * \frac{A}{s} = \rho * \varepsilon \quad [s]$$

Risulta evidente come la costante di tempo di un materiale piezoelettrico sia del tutto indipendente dalla geometria dell'elemento e dipende strettamente da resistività e costante dielettrica.

Volendo ora acquisire il segnale generato dal sensore, risulta necessario amplificarlo attraverso un operazionale ad alto guadagno in configurazione invertente.



Dallo schema si può ora calcolare il guadagno del circuito e poiché la resistenza interna al materiale è minima, la si può trascurare ottenendo così:

$$\frac{V_0(s)}{V(s)} = -\frac{1/sC}{R_1 + Z} = -\frac{C_0/C}{1 + R_1C_0s}$$

Ed essendo

$$V(s) = I(s) * Z \approx \frac{I(s)}{C_0s} = \frac{sQ(s)}{C_0s} = \frac{d}{C_0} * F(s)$$

si ottiene la seguente espressione:

$$\frac{V_0(s)}{F(s)} = \frac{V_0(s)}{V(s)} * \frac{V(s)}{F(s)} = - \frac{d/C}{1 + R_1 C_0 s}$$

Attraverso la funzione di trasferimento possiamo capire come i vari componenti del circuito influiscano sul condizionamento del segnale. L'utilizzo di una configurazione dell'amplificatore come integratore di Miller permette una modulazione dell'ampiezza del segnale in funzione della pulsazione della forza. Di fatto il limite di banda superiore è determinato dal valore della resistenza R_1 poiché la capacità C_0 è costante. In questo modo, la banda passante può essere regolata semplicemente variando la resistenza, tenendo comunque presente che questo va ad influire sul guadagno complessivo del circuito. Dato che il guadagno in banda passante dell'amplificatore ha valore costante, un aumento della resistenza R_1 provoca un allargamento della banda passante ed allo stesso tempo una diminuzione del guadagno in ampiezza. Viceversa, se si diminuisce la resistenza cresce il guadagno dell'amplificatore e si restringe la banda di frequenze utilizzabili.

Si deve inoltre considerare l'effetto che le correnti di polarizzazione hanno sul segnale. Pur avendo valori molto piccoli, solitamente compresi tra 10nA e 1μA, risultano comunque creare degli effetti indesiderati i quali vanno ad influire sul condizionamento del segnale proveniente dal sensore. Si riscontra infatti che le correnti di bias dell'amplificatore vanno a caricare il condensatore C generando degli effetti di drift sul segnale ($V_{out} \neq 0$ con $V_{in} = 0$). Per ovviare a questo problema si può inserire una resistenza in parallelo al condensatore C. Così facendo il circuito assume un comportamento da filtro passa basso avendo quindi un guadagno inferiore per le basse frequenze.

Il condensatore C, presente sulla retroazione dell'amplificatore, determina assieme al coefficiente piezoelettrico, la sensibilità della risposta.

Risulta infine necessario che il dispositivo lavori con la banda passante all'interno della regione di risposta lineare del materiale al fine di escludere dalle frequenze condizionate quelle relative al picco di risonanza. In caso contrario si va ad amplificare un segnale il quale non gode più della relazione lineare con la forza esterna oggetto della misurazione.

I dispositivi per il condizionamento del segnale, sono divisi in due categorie definite Charge mode (o ad alta impedenza) e ICP (o a bassa impedenza). In entrambi i casi devono essere in grado di convertire, amplificare e filtrare il segnale proveniente dal sensore.

Condizionamento Charge mode

Questa classe di dispositivi si distingue poiché non integrano l'amplificatore nel sensore. Di conseguenza restituiscono un segnale ad elevata impedenza dato che necessitano di un circuito esterno per il condizionamento e la conversione. Risulta inoltre necessario che tutti i cablaggi e le connessioni essendo ad elevata impedenza siano ben isolate al fine di garantire l'integrità del segnale durante la trasmissione. Di fatti agenti esterni quali accoppiamenti parassiti, interferenze elettromagnetiche, umidità, agenti corrosivi e sporcizia contribuiscono a ridurre l'isolamento ed a rendere il segnale poco stabile. Si rende quindi necessario l'utilizzo di specifici cablaggi a basso rumore e bassa perdita i quali però non possono avere lunghezze elevate. Essi sono costituiti da uno strato di grafite che ricopre e protegge il dielettrico e da una schermatura che minimizza l'effetto dei fattori esterni garantendo una migliore qualità del segnale.

Il principale vantaggio di questo tipo di condizionamento consiste nel fatto che, avendo la parte elettronica separata dal sensore consente di operare in ambienti con temperature elevate (fino a 500°C). Inoltre i parametri di sensibilità e risposta in frequenza possono essere modificati agevolmente data la possibilità di intervenire direttamente sull'amplificatore esterno.

Condizionamento ICP

In questa classe di dispositivi l'elettronica di condizionamento del segnale è integrata direttamente nel sensore. Si utilizza solitamente un amplificatore a mosfet che converte il segnale da alta a bassa impedenza. In questo modo si rende possibile una trasmissione più efficiente, a maggiore distanza ed inoltre dei cablaggi meno onerosi dato che il segnale in uscita dall'integrato risente in misura inferiore dei disturbi esterni. Per contro, la presenza dell'elettronica di acquisizione a ridosso del sensore ne limita le possibilità di impiego poiché la temperatura massima risulta nettamente inferiore rispetto al caso dei charge mode. Di fatto non è consigliabile il loro utilizzo in ambienti con temperature superiori ai 150°C.

2.2.3 DATI TECNICI

Materiali piezoelettrici

Allo scopo di determinare al meglio le caratteristiche dei sensori piezoelettrici, il loro comportamento e i limiti fisici e meccanici risulta necessario categorizzare gli elementi di cui essi sono costituiti. Questa necessità deriva dal fatto che ogni materiale piezoelettrico, sia esso naturale o indotto, presenta caratteristiche diverse e quindi anche diversi sono gli ambiti in cui poterli utilizzare.

Innanzitutto si deve distinguere tra materiali con comportamento piezoelettrico naturale e materiali piezoelettrici polarizzati. Questi ultimi, come precedentemente descritto, sono materiali con caratteristiche non piezoelettriche, ma bensì tale proprietà viene loro indotta attraverso il processo di polarizzazione.

Nella categoria dei materiali naturali si trovano:

Quarzo;
Tormalina;
Sale di Rochelle;
Langasite;
ZnO;
 $Li_2B_4O_6$;
 $LiTaO_3$;
 $LiNbO_3$ niobato di litio;

In quella dei piezoelettrici polarizzati compaiono:

Piezoceramici (policristallini): $PbTiO_3$;
 $PbNb_2O_6$;
 $BaTiO_3$;
PZT.

Piezocompositi (polimero piezoceramico);

Piezopolimeri: PVDF, copolimeri di TrFE e TeFE.

Materiale	T_c [°C]	caratteristiche	Applicazioni
Quarzo (SiO_2)	573	Termicamente stabile Bassi coeff elettromeccanici e piezoelettrici	Accelerometri Risonatori
Niobato di Litio ($LiNbO_3$)	1140	Ottima piezoelettricità a temp ambiente	Filtri
Titanato di bario ($BaTiO_3$)	130	Grande resistenza a depolarizzazione	Acustica
Titanato di pimbo ($PbTiO_3$)	490	Elevata fragilità Basso coefficiente elettromeccanico	Sonde piccole
Metaniobato di Pb ($PbNb_2O_6$)	570	Bassa impedenza acustica Basso fattore di perdita meccanica	Sonde mediche Idrofoni
PZT ($PbTiO_3 * PbZrO_3$)	220 - 350	Sottoclassi Hard o Soft	Trasduttori

Processo ceramico

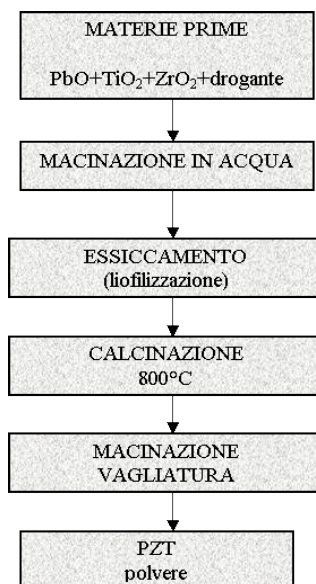
Il processo per ottenere un manufatto ceramico consiste essenzialmente nel condizionamento di una polvere per produrre una forma consolidata (formatura), a cui segue un trattamento ad alta temperatura per consolidare il materiale ed ottenere le caratteristiche microstrutturali volute.

Tali parametri dipendono da tutte le fasi del processo di produzione in quanto la microstruttura del materiale, dopo la densificazione, presenta una sorta di memoria delle eterogeneità introdotte fin dalle materie prime.

La tecnica di formatura viene scelta in base alla geometria che si vuole ottenere. Invece il consolidamento può avvenire allo stato secco o in quello plastico a seconda della situazione in cui si trova la polvere ceramica.

Nello specifico, la produzione di materiali piezoelettrici ceramici, oltre a queste fasi necessita di una precedente in cui si sintetizza la struttura perovskitica del cristallo, ed a valle di una per la deposizione degli elettrodi e per la polarizzazione.

Le fasi del processo seguono lo schema riportato di seguito. Sono poi successivamente spiegati i passaggi principali.



La sintesi delle polveri avviene per reazione allo stato solido o per via chimica. Il primo metodo è quello più economico e consiste nella miscelazione meccanica in umido delle polveri e nel trattamento termico della miscela ottenuta attraverso un ciclo termico che induce la reazione. Si ha quindi la formazione della soluzione solida nella fase perovskitica desiderata.

Successivamente la polvere viene lavorata attraverso pressatura lineare o colata su nastro al fine di essere consolidata, subendo poi una sinterizzazione a temperatura di circa 1200°C.

Il campione poi viene lavorato meccanicamente, metallizzato e polarizzato.

La metallizzazione consiste nell'applicare degli elettrodi sulle opportune facce del pezzo al fine poi di permetterne la polarizzazione. L'applicazione degli elettrodi viene effettuata mediante serigrafia con pasta a base di argento per campioni spessi. Per materiali più fini o più fragili invece si utilizza la tecnica a pennello, molto simile alla serigrafia, ma utilizzando una pasta più fluida risulta migliore per questo tipo di campioni.

Successivamente la deposizione del film conduttore, lo si sottopone ad un breve essiccamento e ad un ulteriore ciclo termico di cottura e fissaggio.

L'utilizzo dei PZT per la realizzazione di sensori è determinato dal fatto che le loro caratteristiche piezoelettriche e fisiche permettono di ottenere dei dispositivi con una maggiore sensibilità, una aumentata larghezza di banda e la possibilità di caratterizzarli a seconda dell'applicazione desiderata.

Si consideri che la possibilità di modificare il materiale a seconda delle esigenze permette di realizzare campioni aventi diverse caratteristiche. Ne consegue che essi sono separabili in due classi principali a seconda dei parametri piezoelettrici.

La classe degli Hard PZT o PZT ad alta potenza racchiude tutti quei materiali i quali presentano:

- bassa isteresi;
- alti fattori di perdita meccanica;
- resistenza ad elevati carichi meccanici ed elettrici;
- bassa velocità di invecchiamento.

La classe dei Soft PZT o PZT ad elevata sensibilità riguarda materiali con:

- elevate costanti dielettriche;
- facile depolarizzazione;
- elevato auto riscaldamento.

Si può quindi concludere che gli hard pzt possono essere impiegati efficacemente come generatori e trasduttori ad elevata tensione elettrica ed elevata potenza. Invece i soft pzt risultano ottimi materiali per la realizzazione di sensori e trasduttori ad alta impedenza.

Installazione

I sensori piezoelettrici di forza possiedono un elevato livello di affidabilità e flessibilità, ma al fine di ottenere la massima accuratezza nelle misurazioni ed una lunga vita utile risulta necessario seguire un procedimento specifico per la loro installazione ed inoltre considerare alcune importanti avvertenze.

In primo luogo si deve considerare che ogni sensore deve essere calibrato durante l'installazione. Tale necessità nasce dal fatto che i sensori piezoelettrici richiedono un precarico al fine di garantire la misurazione. Si deve notare però che alcuni produttori forniscono sensori in cui la struttura che li contiene agisce già con una forza interna per cui il precarico, in questi casi non è necessario. In ogni caso si verifichi che sussista linearità nella misurazione verificando quindi la validità dell'operazione. Si tenga inoltre conto che il precarico è necessario anche per garantire la resistenza strutturale del dispositivo.

Il passo successivo consiste nella taratura. Questa operazione deve essere eseguita con la massima accuratezza poiché la precisione della misura dipende principalmente da essa.

Vi sono altri aspetti da tener presente quando si realizzano degli impianti di misurazione con sensori di questo tipo. Di fatti, come già esposto, all'interno della catena di misura sono presenti dei fenomeni di deriva del segnale. Con lo scopo di ridurne gli effetti, dato che concorrono nell'errore di misurazione, si possono seguire due valide avvertenze.

La prima consiste nel preriscaldamento dell'amplificatore accendendolo almeno un'ora prima di iniziare le misurazione. La seconda ed altrettanto importante è la pulizia dei collegamenti. Se la resistenza di isolamento del cavo fra trasduttore e amplificatore è troppo bassa, la catena di misura risulta soggetta a deriva. Al fine di contenerne gli effetti è necessario che spine e prese di tutti i cablaggi siano pulite e non presentino parti ossidate.

La prima delle due avvertenze permette di ridurre un altro tipo di effetto indesiderato: l'influenza della temperatura. Di fatti una variazione termica del sensore durante la misurazione causa degli errori sulla misura. Anche se la loro entità si attesta su valori piccoli è buona norma fare in modo che anche questa possibile componente di errore venga annullata.

Un ultimo aspetto da considerare è la massima sollecitazione che il sensore è in grado di sopportare. Un superamento di tale soglia può portare alla perdita di linearità nella misura o ancora peggio alla rottura del cristallo. La massima sollecitazione viene quindi calcolata sommando le sollecitazioni causate dal momento flettente nel cristallo e le forze assiali da misurare.

La scelta del sensore più adatto alla misurazione può essere fatta principalmente in funzione dei requisiti di sovraccarico e della geometria. Si deve però tener anche conto dell'intera catena di misura, senza quindi cioè trascurare le caratteristiche che devono avere l'amplificatore ed i vari cablaggi.

2.3 CELLE DI CARICO



SCHEMA INTRODUTTIVO

- Celle a flessione
- Celle a taglio
- Celle a compressione/trazione
- Celle a torsione
- Comportamento dinamico
- Scelta del dispositivo
- Prodotti e caratteristiche

2.3.1 ANALISI DELLE GEOMETRIE

Le celle di carico sono dei sensori di forza costituiti da una struttura meccanica deformabile, in regime lineare elastico, che in conseguenza all'applicazione di una forza da misurare si deformano in maniera nota e ripetibile. Dalla misurazione della deformazione dell'elemento elastico, effettuata con vari metodi ed utilizzando diversi principi di trasduzione, si risale alla forza incognita applicata.

A seconda del tipo di sollecitazione che si vuole quantificare, è previsto l'utilizzo di celle di carico aventi differenti geometrie dell'elemento elastico le quali privilegiano diversi aspetti della misura come sensibilità o estensione del campo di misura.

Data l'ampia gamma di dispositivi, ognuno dei quali con specifiche caratteristiche, risulta necessario considerare i parametri che determinano la scelta del dispositivo più consono per la misurazione della sollecitazione oggetto di studio.

I punti principali da considerare sono:

- tipo di sollecitazione;
- numero di celle;
- capacità;
- accuratezza della misura;
- materiale del dispositivo;
- costo.

Innanzitutto si vuole determinare come la struttura della cella, ovvero la sua geometria influenzi la misurazione.

Dalla teoria della concentrazione delle tensioni è dimostrato come una variazione della sezione di un materiale soggetto a sforzo presenti una distribuzione delle tensioni interne direttamente collegata alla geometria della sezione stessa. Di fatti la concentrazione delle tensioni (teorica) è in funzione del tipo di carico applicato, della geometria o della forma ma non dalle dimensioni o dal materiale. Assumendo un materiale omogeneo, isotropo ed in campo lineare elastico, è dimostrato come una riduzione della sezione provochi un aumento della concentrazione delle tensioni nel materiale. Risulta inoltre evidente come la geometria di raccordo tra due differenti sezioni influenzi tale variazione di concentrazione. Di fatti un cambio repentino come può essere uno spallamento implica in quel punto un incremento della tensione rendendolo in molti casi la parte critica dell'elemento. Se invece la variazione di sezione avviene in maniera più graduale come ad esempio in un raccordo allora la concentrazione delle tensioni in quel punto risulta minore.

Si può quindi capire come diverse geometrie determinino differenti stati di tensione nei campioni. Tale comportamento è il motivo per il quale le celle di carico presentano specifiche geometrie al fine di ottenere precise concentrazioni di tensione in determinati punti del dispositivo. Così facendo si ha la possibilità inoltre di caratterizzare ogni tipologia di cella per un determinato tipo di sollecitazione anche se in presenza di tensioni multiple. Con ciò si intende che sagomando opportunamente la struttura si è in grado di separare gli effetti delle tensioni indesiderate ai fini della misurazione e quindi di rilevare solamente quel specifico tipo di sollecitazione desiderata. Si ha inoltre la possibilità di determinare il punto in cui risulta più opportuno installare i sensori in modo tale che gli effetti della deformazione siano massimizzati portando quindi un guadagno in sensibilità dello strumento. Un ulteriore aspetto legato alla concentrazione delle tensioni riguarda la frequenza naturale di vibrazione dei campioni la quale a sua volta viene determinata dalla geometria imposta alla struttura.

Per tutte queste ragioni le celle di carico non si presentano composte da pezzi con geometrie casuali o grossolane, ma bensì con strutture la cui sagoma è complessa e ben definita dato che ne determina le prestazioni. Si consideri inoltre che sono progettati in modo tale da sviluppare una tensione direttamente proporzionale al carico applicato.

Tali elementi vengono in genere realizzati in acciai alto resistenziali, leghe di alluminio o leghe di rame-berillio.

Data la vastità dell'argomento si ricorre ad una classificazione delle celle in base al tipo di sollecitazione che sono in grado di misurare: flessione, trazione/compressione, taglio.

1) Celle sottoposte a momento flettente



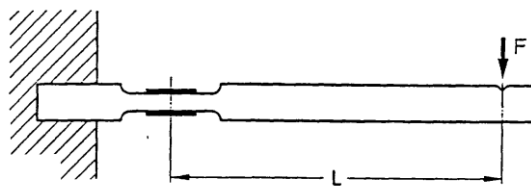
Flessione semplice

Sono costituite da travi incastrate su di un solo lato, paragonabili a mensole e caricate sull'estremo libero. Si basano sul principio del momento flettente e di conseguenza risultano molto sensibili al punto di applicazione del carico. Le travi a flessione offrono elevati livelli di tensione in corrispondenza di carichi relativamente bassi risultando così ideali per l'utilizzo in celle di carico a bassa capacità.

In questo tipo di celle i sensori sono installati sulle due facce che subiscono trazione e compressione in modo tale da compensare gli effetti di sollecitazioni non assiali, di trazione e di temperatura.



Una versione più elaborata di questo genere di cella prevede la modifica del profilo della trave. Nel punto di applicazione degli estensimetri si va a ridurre la sezione in modo tale da ottenere una concentrazione delle tensioni in quella zona. Così facendo si ha un punto fisso rispetto al quale considerare la misura ed inoltre una migliore sensibilità totale.



Flessione doppia

Questo tipo di struttura invece prevede una sezione trasversale più ampia con due fori passanti collegati da una scanalatura. La geometria dei fori può variare a seconda del produttore pur seguendo le linee guida relativa alla concentrazione delle tensioni.



In questo caso anche la disposizione dei sensori sulla struttura viene modificata ottenendo nel complesso una cella la quale rivela una bassa sensibilità rispetto al punto di applicazione del carico ed elevate sensibilità e linearità della misura.

Si deve comunque tener presente che le travi ad incastro non si prestano per applicazioni dinamiche in quanto manifestano una elevata tendenza ad oscillare avendo una bassa frequenza di risonanza.

Per quanto riguarda i sovraccarichi invece risultano aver una elevata capacità di sopportarne data la deflessione molto ampia.

2) Celle di carico sottoposte a taglio

Dalla teoria delle costruzioni è noto come il taglio sia una tensione interna legata al momento flettente. Per questo motivo la sua misurazione richiede degli specifici accorgimenti. In ogni caso le celle di carico del tipo a trave sottoposta a taglio sono maggiormente utilizzate per applicazioni a media ed elevata capacità. Inoltre presentano una buona resistenza ai carichi laterali ed una bassa sensibilità a punto di applicazione della forza. Tutte queste caratteristiche sono date dalla geometria della struttura, la quale permette di misurare i soli effetti di taglio.

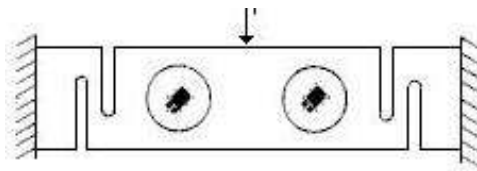
Come è noto, una trave ad incastro con una forza applicata sull'estremità libera subisce una deformazione dovuta al momento flettente ed inoltre presenta delle sollecitazioni di taglio. Si sa inoltre che lungo l'asse neutro del concio il carico flettente è nullo e quindi in tale parte l'unica sollecitazione agente è quella di taglio puro. Di conseguenza la geometria della trave deve essere tale da permettere l'applicazione dei sensori il più vicino possibile all'asse neutro al fine appunto di poter misurare i soli effetti di taglio. Si vuole inoltre ridurre il più possibile la componente data dalle tensioni di flessione quindi, l'elemento deformabile risulta avere una sezione trasversale ampia in modo tale da rendere minima la deflessione.

Così facendo però la deformazione risulta troppo bassa per determinare un segnale d'uscita apprezzabile. Per questo motivo e per la necessità di voler effettuare la misura il più possibile vicino all'asse neutro, la struttura presenta su entrambi i lati dei vani la cui profondità garantisce la presenza di uno strato di materiale molto sottile. In questo modo la componente flessionale viene sostenuta dalle parti superiore ed inferiore mentre sul fondo di tali vani vengono installati i sensori i quali subiscono solo gli effetti di deformazione dovuti al taglio puro.



In questo modo si riesce a misurare la deformazione di taglio in maniera ottimale. Si riscontra però un problema legato all'intensità del segnale in uscita. Esso di fatti risulta troppo basso per cui si ricorre ad un numero maggiore di vani in maniera tale da ottenere un'area maggiore su cui poter installare i sensori. In questo modo si riescono ad ottenere delle deformazioni della sezione dovute agli effetti di taglio tra 1000 e 1700 ppm per cui si genera un segnale d'uscita a ponte intero attivo compreso tra 2 e 3 mV/V.

Se si necessita invece di capacità di carico più elevate allora la struttura delle celle varia e si sviluppa sul concetto di trave a doppio taglio.



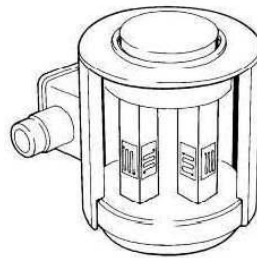
Tale struttura oltre a permettere un migliore controllo sugli effetti termici riesce anche a sopportare elevati carichi trasversali data l'elevata rigidità della struttura dovuta proprio alla sua geometria. Tale deflessione consente inoltre alle celle di avere una buona risposta in regime dinamico poiché la tendenza a vibrare risulta attenuata.

3) Celle di carico sottoposte a compressione/trazione



Le celle a compressione possono essere del tipo a taglio, a flessione, a torsione ad anello o colonna. Non deve sorprendere il fatto che si possano utilizzare geometrie sviluppate per altri tipi di misurazioni poiché semplicemente variando la configurazione dell'installazione o la posizione dei sensori si può misurare un tipo diverso di tensione. Se ad esempio si vuole realizzare una cella a compressione avendo a disposizione una struttura come quella a doppio taglio è sufficiente che, anziché vincolare la trave ai suoi estremi, la si vincoli sulla superficie opposta a quella sulla quale agisce il carico. Si ottiene così una misurazione delle tensioni dovute a compressione.

Per una completa analisi si considera quindi la struttura a colonna, non ancora analizzata.



Sebbene sia una struttura concettualmente semplice, vi sono molti aspetti da considerare. In primo luogo, volendo ottenere uno stato tensionale uniforme è necessario che la colonna abbia una elevato rapporto lunghezza sezione. Per rispettare questo parametro però si rischia che la struttura anziché lavorare a compressione, sia soggetta a carico di punta. Per ovviare a questo problema si ricorre ad una soluzione tanto semplice quanto efficace. Inserendo più colonne con una buona proporzione lunghezza sezione, si ottiene su tutte un campo uniforme di tensioni ed allo stesso tempo la molteplicità di colonne consente di sviluppare celle con elevata capacità di carico.

Si deve in ogni caso tener presente che le celle di questo tipo risultano intrinsecamente non lineari a causa della variazione della sezione trasversale causata dai carichi, la quale è determinata dal modulo di contrazione trasversale (o di Poisson). Questa non linearità può essere compensata attraverso l'utilizzo di estensimetri a semiconduttore. Le celle a compressione inoltre non risentono del momento flettente, il quale invece influenza le strutture a trave. Possiedono inoltre una elevata capacità di sovraccarico massimo data dalla scarsa deformabilità, la quale determina inoltre una maggiore sensibilità ai carichi impulsivi.

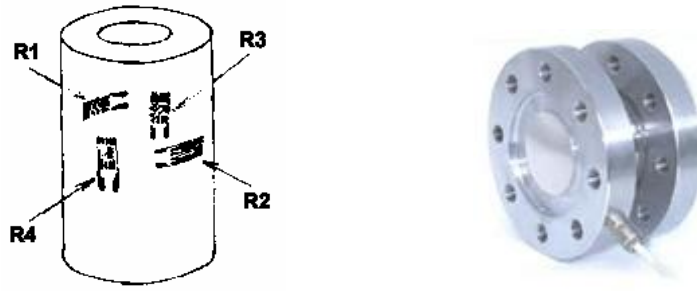
Esistono inoltre strutture le quali consentono di realizzare celle di carico in grado di misurare sia deformazioni di compressione sia di trazione. Definite celle universali, vengono utilizzate in ambiti in cui si hanno inversioni di moto e quindi della forza, con carichi di media portata.

Per la misurazione di sollecitazioni di trazione e compressione si può anche ricorrere all'utilizzo di celle di carico ad elica. Sono costituite da una molla la quale bilancia il carico con una reazione di torsione che viene misurata dai sensori. Le componenti di sollecitazione dovute a carichi disassati o asimmetrici hanno effetti contenuti e gli estensimetri installati direttamente sulla molla sono in grado di misurare sia compressioni che trazioni. Questo tipo di celle consente di misurare carichi posti su piani non paralleli con un errore di misura molto contenuto, circa dello 0,5 %. Inoltre le celle ad elica offrono una elevata resistenza agli impulsi ed ai sovraccarichi rendendole ideali per applicazioni in cui le sollecitazioni massime sono molto variabili o addirittura incognite.

4) Celle di carico a torsione: torsimetri

Per la misurazione della coppia esistono celle di carico in cui l'elemento deformabile può essere di tipo cilindrico, ad anello o a molla.

Per i modelli a cilindro si deve considerare che gli assi neutri rispetto ai quali si misura la sola componente torsionale sono posti a 45° rispetto all'asse su cui agisce la forza. In tal modo gli effetti dovuti a trazione e flessione sono ininfluenti rispetto ai sensori i quali vengono installati lungo tali assi.



Nel caso di celle di carico ad anello, costituite solitamente in acciaio inossidabile, viene installato un ponte intero attivo. Le deformazioni indotte sull'elemento creano delle variazioni sul diametro dell'anello le quali vanno a deformare gli estensimetri. La forma geometrica dell'elemento sensibile fornisce prestazioni superiori dato che risente in misura minore degli effetti flessionali ed inoltre possiede una elevata resistenza ai sovraccarichi. Un ulteriore vantaggio dato dalla forma ad anello risiede nel fatto che il punto in cui si deve applicare il carico è fisso, limitando così gli errori dovuti alla sua posizione relativa rispetto ai sensori. La bassa deformabilità inoltre permette di utilizzare questo tipo di celle per misurazioni a dinamica elevata risultando però sensibili ai sovraccarichi impulsivi.



2.3.2 ANALISI DINAMICA

Per lo studio del comportamento dinamico delle celle di carico si può prendere in esame senza perdite di generalità, il modello più semplice costituito da una struttura a trave flettente incastrata ad un'estremità e con un unico elemento sensibile. La forza incognita da misurare sia applicata poi all'estremità libera sulla quale vi è inoltre un elemento che si interpone tra forza e cella, dotato di massa propria M_b .

Per poter ora sviluppare un modello analitico il più possibile rappresentativo del modello reale si devono considerare diversi aspetti riguardanti la struttura.

Il tipo di cella utilizzato risulta agevolare l'analisi dato che permette di semplificare il modello poiché rende trascurabili gli effetti dei carichi trasversali ed inoltre offre elevata precisione e stabilità. Oltretutto questo tipo di dispositivo è anche uno tra quelli maggiormente diffusi in ambito industriale.

Lo sviluppo del modello si appoggia ad una configurazione ben nota quale quella del sistema massa molla smorzatore. Il paragone è giustificato dal fatto che la cella di subendo deformazioni in campo lineare elastico tenderà ad avere un comportamento del tutto simile.

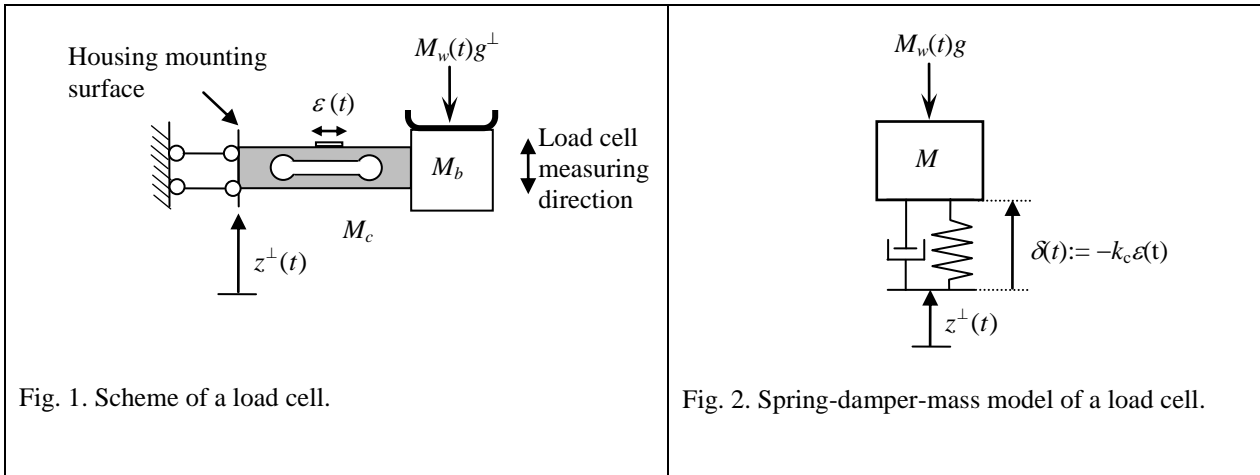


Fig. 1. Scheme of a load cell.

Fig. 2. Spring-damper-mass model of a load cell.

Il sistema dinamico risulta quindi governato dalla seguente equazione di secondo ordine lineare tempo variante:

$$[M + M_w(t)] * [\ddot{\delta}(t) + \ddot{z}(t)^\perp] + c\dot{\delta}(t) + k\delta(t) = -M_w(t) * g^\perp$$

In cui i vari termini rappresentano:

M_w = massa incognita (misurando);

$M_w(t)$ = il misurando è variabile nel tempo (ipotesi);

$\delta(t)$ = spostamento della massa M nel modello MMS;

$\delta(t) = -k_c * \epsilon(t)$: relazione tra lo spostamento e la deformazione della cella;

$\dot{\delta}(t)$ = velocità;

$\ddot{\delta}(t)$ = accelerazione;

$z(t)^\perp$ = spostamento assoluto della struttura;

$\ddot{z}(t)^\perp$ = accelerazione;

c = coefficiente di smorzamento lineare della cella di carico lungo la direzione di misurazione;

k = coefficiente di elasticità lineare della cella di carico lungo la direzione di misurazione;

$M_w(t) * g^\perp$ = componente gravitazionale del misurando lungo la direzione di misurazione;

$M = 0.23M_c + M_b$: massa a vuoto della cella (senza carico esterno). Comprende la massa uniformemente distribuita della trave M_c e della massa all'estremità M_b .

Il modello dinamico segue un andamento sinusoidale esponenzialmente smorzato dato che i suoi modi risultano essere complesse coniugate. La velocità con cui il sistema si stabilizza è determinata dall'indice di smorzamento il quale va ad attenuare gli effetti oscillatori dovuti alla componente elastica della struttura. Tale oscillazione possiede un propria frequenza naturale e come per l'indice di smorzamento essa dipende dalle caratteristiche fisiche e geometriche del sistema.

Risolvendo l'equazione differenziale rappresentativa del modello si ricava la sua evoluzione libera partendo dalla equazione omogenea associata. Per comodità l'analisi viene svolta nel dominio delle trasformate di Laplace. Si ottiene quindi:

$$m * s^2 + c * s + k = 0$$

Con $m = [M + M_w(t)]$.

Le radici dell'equazione sono:

$$\lambda_{1,2} = \frac{-c \pm \sqrt{c^2 - 4mk}}{2m}$$

L'argomento della radice risulta minore di zero per cui si ottiene:

$$\lambda_{1,2} = -\frac{c}{2m} \pm j * \sqrt{\frac{4mk - c^2}{4m^2}}$$

Dato che si tratta di un numero complesso $\lambda = \sigma + j\omega$ si può facilmente isolare la componente armonica ω che vale:

$$\omega(t) = \sqrt{\frac{4mk - c^2}{4m^2}}$$

Per poter ora determinare la pulsazione naturale si deve considerare che il segnale costituito dalle radici è periodico solo quando le radici stesse appartengono ai numeri naturali. Di conseguenza si deve imporre $\sigma = 0$:

$$\sigma = 0 \Leftrightarrow -\frac{c}{2m} = 0 \Leftrightarrow c = 0$$

Quindi si ottiene la pulsazione naturale del sistema:

$$\omega_N(t) = \sqrt{\frac{4mk - c^2}{4m^2}} \Big|_{\sigma=0} = \sqrt{\frac{4mk}{4m^2}} = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{k}{M + M_w(t)}}$$

Per il calcolo dell'indice di smorzamento ξ , il quale determina la velocità con cui il sistema si stabilizza, si ricorre allo sviluppo del termine trinomio rispetto alla forma di Bode dell'equazione del modello.

$$(m * s^2 + c * s + k) = \left(1 + \frac{c}{k}s + \frac{m}{k}s^2\right)$$

Deve quindi valere la relazione:

$$\left(1 + \frac{c}{k}s + \frac{m}{k}s^2\right) \Big|_{s=j\omega} = \left(1 + j * \frac{c}{k}\omega - \frac{m}{k}\omega^2\right) = \left(1 + j * 2 \frac{\xi\omega}{\omega_N} + \frac{\omega^2}{\omega_N^2}\right)^\mu$$

Per cui si può scrivere:

$$\frac{c}{k}\omega = 2 \frac{\xi\omega}{\omega_N}$$

Da cui si ottiene:

$$\xi(t) = \frac{c}{2k} * \omega_N = \frac{c}{2k} * \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{c}{2\sqrt{mk}} = \frac{c}{2\sqrt{[M + M_w(t)] * k}}$$

Sostituendo ora le due equazioni precedentemente ricavate, all'interno del modello del sistema, lo si può esprimere in funzione non più della posizione ma bensì della deformazione.

$$[M + M_w(t)] * [\ddot{\delta}(t) + \dot{\mathbf{z}}(t)^\perp] + c\dot{\delta}(t) + k\delta(t) = -M_w(t) * \mathbf{g}^\perp$$

Al fine di rendere i seguenti passaggi più chiari viene omessa la dipendenza dal tempo dei vari parametri e si utilizza il termine “m” per rappresentare l’insieme di masse $[M + M_w(t)]$.

$$m * [\ddot{\delta} + \ddot{z}^\perp] + c\dot{\delta} + k\delta = -M_w * g^\perp$$

$$m * \ddot{\delta} + m * \ddot{z}^\perp + c\dot{\delta} + k\delta = -M_w * g^\perp$$

Valgono inoltre le seguenti equazioni:

$$\begin{cases} \delta(t) = -k_c * \varepsilon(t) \\ \dot{\delta}(t) = -k_c * \dot{\varepsilon}(t) \\ \ddot{\delta}(t) = -k_c * \ddot{\varepsilon}(t) \end{cases}$$

Che sostituite nel modello danno:

$$-mk_c\ddot{\varepsilon} + m * \ddot{z}^\perp - ck_c\dot{\varepsilon} - kk_c\varepsilon = -M_w g^\perp$$

$$m\ddot{\varepsilon} + c\dot{\varepsilon} + k\varepsilon = \frac{m}{k_c}\ddot{z}^\perp + \frac{M_w}{k_c}g^\perp$$

Dalle formule della pulsazione naturale e dell’indice di smorzamento si ricavano i valori c e k:

$$\begin{cases} c = 2\xi\sqrt{mk} \\ k = \omega_N^2 m \end{cases}$$

che sostituiti nell’equazione danno:

$$m\ddot{\varepsilon} + 2\xi\sqrt{m}(\omega_N\sqrt{m})\dot{\varepsilon} + \omega_N^2 m\varepsilon = \frac{m}{k_c}\ddot{z}^\perp + \frac{M_w}{k_c}g^\perp$$

$$\ddot{\varepsilon} + 2\xi\omega_N\dot{\varepsilon} + \omega_N^2\varepsilon = \frac{1}{k_c}\ddot{z}^\perp + \frac{M_w}{m * k_c}g^\perp$$

Per piccole oscillazioni della struttura orizzontale si può scrivere:

$$M_w(t) * g^\perp = M_w(t) * g$$

Da cui:

$$g^\perp = g$$

Sostituendola si ottiene la forma finale del modello:

$$\ddot{\varepsilon}(t) + (2\xi\omega_N) * \dot{\varepsilon}(t) + \omega_N^2 * \varepsilon = \frac{1}{k_c}\ddot{z}^\perp + \frac{M_w(t)}{[M + M_w(t)]k_c} * g$$

Attraverso la risoluzione di questa equazione differenziale si ottiene l’andamento dinamico dell’evoluzione libera delle deformazione rilevate dal sensore posizionato sulla cella di carico.

2.3.3 CRITERI DI SCELTA

Al fine di ottenere la migliore configurazione di un sistema di misura è necessario conoscere i principali parametri che permettono di determinare il dispositivo più consono per l'applicazione che si vuole sviluppare.

Tali parametri sono capacità di carico, accuratezza, sensibilità, numero di celle, prestazioni dinamiche e ambiente di lavoro.

Le celle di carico sono realizzate in range di capacità definite. L'approccio di base è di considerare i carichi totali massimi e selezionare il range immediatamente superiore tra quelli disponibili. Si deve inoltre considerare la ripartizione del carico che in molti casi può essere disomogenea. Dal punto di vista dinamico si considerino una eventuale presenza di impulsi e vibrazioni che, assieme a sovraccarichi statici possono compromettere i dispositivi. Al fine di un utilizzo cautelativo si ritiene opportuno far lavorare la cella nella regione di sicurezza da sovraccarico. Anche se questo sovradimensionamento può sembrare un metodo obsoleto, in molti casi è necessario data la scarsa conoscenza riguardo la dinamica delle sollecitazioni in gioco.

Nel caso sia necessario si può prevedere l'utilizzo di più celle contemporaneamente. Così facendo si può ripartire il carico sui più elementi in modo tale da poterne ridurre la classe. La scelta del numero di celle da utilizzare dipende da vari fattori. Si deve considerare la resistenza strutturale complessiva dei vari membri, la stabilità dell'elemento che riceve il carico e la ripartizione uniforme del carico tra le varie celle.

In ogni caso il limite di sicurezza, cioè il valore massimo del carico che può essere applicato senza che vi siano deviazioni sulle caratteristiche del dispositivo, deve essere indicativamente del 150% rispetto al range di misura.

Un altro limite invalicabile è il massimo carico applicabile oltre il quale si avrebbe la rottura meccanica della cella. Questo deve essere proporzionato rispetto al range di misura del 300%.

Si consideri anche il limite di tensione trasversale ammissibile. Rappresenta il massimo carico agente sulla normale all'asse principale e deve essere il 100% del range di misura.

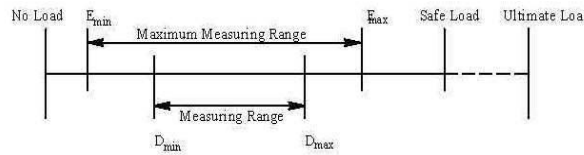
Un ulteriore aspetto molto importante è l'accuratezza che il sistema deve avere. Per una comprensione più ampia delle possibilità a disposizione è di seguito riportata una tabella contenente le classi dei gradi di accuratezza. I valori numerici contenuti si riferiscono al numero di divisioni che ogni classe consente.

	Class A	Class B	Class C	Class D
Lower limit	50 000	5 000	500	100
Upper limit	Unlimited	100 000	10 000	1 000

Nel caso in cui si faccia lavorare la cella ben sotto la capacità nominale, si devono considerare i valori di utilizzo e l'intervallo minimo di verifica v_{min} definito come il più piccolo valore di una quantità (in genere massa) che potrebbe essere applicato alla cella senza superare il massimo errore permissibile (mpe). Quest'ultimo è definito come E_{max}/γ dove E_{max} rappresenta la capacità massima dichiarata della cella e γ un parametro definito dal costruttore. Per ogni classe di accuratezza si ha quindi un intervallo di valori entro il quale, in funzione del carico previsto, deve essere contenuto l'errore massimo permissibile mpe.

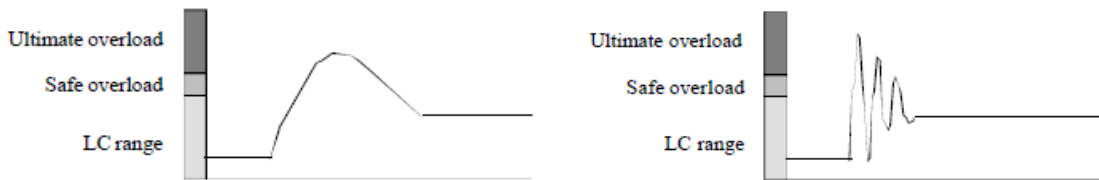
mpe	Load, m			
	Class A	Class B	Class C	Class D
$P_{1\%} \times 0.5 v$	$0 \leq m \leq 50\,000 v$	$0 \leq m \leq 5\,000 v$	$0 \leq m \leq 500 v$	$0 \leq m \leq 100 v$
$P_{1\%} \times 1.0 v$	$50\,000 v < m \leq 200\,000 v$	$5\,000 v < m \leq 20\,000 v$	$500 v < m \leq 2\,000 v$	$50 v < m \leq 200 v$
$P_{1\%} \times 1.5 v$	$200\,000 v < m$	$20\,000 v < m \leq 100\,000 v$	$2\,000 v < m \leq 10\,000 v$	$200 v < m \leq 1\,000 v$

In ultima analisi risulta che le celle di carico possono lavorare in un range di misura molto variabile secondo le caratteristiche e le specifiche richieste.



Un ulteriore parametro rispetto al quale si possono ottenere modifiche nelle capacità della cella è la sensibilità. Di fatti si può ottenerne un aumento semplicemente utilizzando materiali con un modulo di elasticità maggiore determinando però una riduzione della capacità di carico.

Gli effetti di sovraccarico statico e dinamico sono degli ulteriori parametri che influiscono in maniera non marginale ed è quindi necessario tenerli in considerazione. Gli effetti di sovraccarichi statici possono essere limitati al fine della salvaguardia della cella attraverso dei limitatori meccanici oppure utilizzando dispositivi con una capacità superiore. Nel caso invece di sovraccarico impulsivo si può ricorrere ad appositi smorzatori.



Diagrammi di sovraccarico statico e impulsivo

Per poter scegliere la giusta capacità che la cella deve avere si segue la formula:

$$LC_{cap} = F_t + \frac{(D + L * F_a)}{N}$$

- Dove
- N = numero di celle;
 - F_a = fattore di carico dinamico;
 - D = deadload;
 - L = liveload;
 - F_t = effetto del "zero setting";
 - Z = zero setting(%);

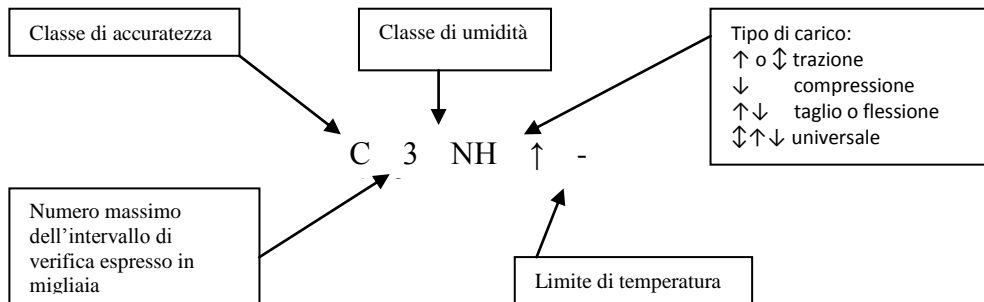
$$F_t = \frac{L * Z}{N * 100}$$

Si deve inoltre verificare che l'output sia compatibile con il livello minimo richiesto del segnale. L'uscita si calcola in μV con la formula:

$$\frac{U_e * S * L * 1000}{N * LC_{cap} * n}$$

- Dove
- U_e = tensione di alimentazione;
 - S = valore di uscita valutato;
 - n = numero di divisioni della scala.

Per la scelta delle celle si è stabilito un codice standard in cui sono riportati i parametri principali. La simbologia prevede una lettera che identifica la classe di accuratezza seguita da un numero che rappresenta l'intervallo di controllo della cella, due lettere relative alla classificazione dell'umidità (possono essere omesse). Il simbolo successivo indica il tipo di carico ed infine un opzionale intervallo di temperatura se il limite della cella differisce da quello standard -10/40°C.



2.3.4 PRODOTTI E CARATTERISTICHE

Si vuole ora esaminare quanto precedentemente visto sotto l'aspetto commerciale. Il fine è quello di comprendere come i produttori di celle di carico espongono i propri prodotti per ottenere una panoramica più ampia dei dispositivi che si possono trovare in commercio. Come riferimento sono state prese due tra le maggiori ditte del campo e si sono riportati nelle successive tabelle i parametri principali. In questo modo si vuole analizzare al meglio la dimensione dell'universo delle celle di carico con lo scopo di ottenere le conoscenze adatte per l'analisi e la scelta dei dispositivi.

Data la vastità di prodotti e l'elevato numero di parametri elencati nei vari cataloghi e datasheet si è predisposta una sintesi in cui vengono considerati le caratteristiche più importanti al fine appunto di avere una più chiara comprensione dell'argomento.

TABELLA CELLE DI CARICO AD ESTENSIMETRI (PCB E KISTLER).

Intervallo di misura [kN]	Sensibilità [mV/V]	Frequenza [kHz]	Temperatura di lavoro [°C]	Resistenza [Ω]
0 – 0.1	2 ±0.005	--	-20 / +50	350
0 – 0.1	1 ±0.0025	2	-20 / +100	350
0 – 0.1	2 ±0.2	2.10	-54 / +93	700
0 – 0.22	2 ±0.2	2.8	-54 / +93	700
0 – 0.22	2 ±0.2	1.5	-18 / +93	350
0 – 0.44	2 ±0.2	1.8	-18 / +93	350
0 – 0.5	1.5 ±0.004	2	-30 / +80	--
0 – 0.89	2 ±0.2	--	-54 / +93	350
0 – 0.89	2 ±0.2	5.4	-54 / +93	700
0 – 1	1 ±0.002	8	-20 / +100	350
0 – 1.11	2 ±0.2	2.2	-18 / +93	350
0 – 1.25	1 ±0.1	2.4	-54 / +93	700
0 – 1.3	2 ±0.2	7.0	-54 / +93	700

0 – 1.33	2 ±0.2	--	-54 / +93	350
0 – 2	1 ±0.002	11	-20 / +100	350
0 – 2.2	2 ±0.2	2.35	-54 / +93	700
0 – 2.2	2 ±0.2	2.2	-18 / +93	350
0 – 2.2	2 ±0.2	3	-18 / +93	350
0 – 2.5	1 ±0.1	3.5	-54 / +93	700
0 – 4.45	2 ±0.2	3.2	-18 / +93	350
0 – 4.5	2 ±0.2	4.5	-18 / +93	350
0 – 5	1 ±0.002	17	-20 / +100	350
0 – 5	1 ±0.1	5.5	-54 / +93	700
0 – 8.9	2 ±0.2	12.5	-28 / +93	350
0 – 8.9	2 ±0.2	6	-28 / +93	350
0 – 8.9	2 ±0.2	2.4	-18 / +93	350
0 – 10	2 ±0.005	--	-20 / +50	350
0 – 10	1 ±0.002	25	-20 / +100	350
0 – 12.5	1.5 ±0.15	7.0	-54 / +93	700
0 – 20	1 ±0.002	25	-20 / +100	350
0 – 20	2 ±0.05	--	-20 / +50	--
0 – 22.2	2 ±0.2	2.5	-18 / +93	350
0 – 25	1.5 ±0.15	10	-54 / +93	700
0 – 44	2 ±0.2	9	-28 / +93	350
0 – 50	1 ±0.002	40	-20 / +100	350
0 – 50	1.5 ±0.15	8	-54 / +93	700
0 – 100	1.75 ±0.175	7	-54 / +93	700
0 – 111	1.75 ±0.175	12	-54 / +93	700
0 – 200	1 ±0.002	40	-20 / +100	350
0 – 200	1.5 ±0.004	5	-30 / +80	--
0 – 500	2 ±0.05	--	-20 / +50	--

TABELLA CELLE DI CARICO PIEZOELETTRICHE (KISTLER)

Assi	Intervallo di misura [kN]	Sensibilità [pC/N]	Temperatura di lavoro [°C]
X	-1 – +1	-26	-50 / +120
Y	-2 – +2	-26	
Z	0 – 12	-26	
X	-4 – +4	-7.8	-40 / +120
Y	-8 – +8	-7.8	
Z	0 – 28	-3.8	
X	-15 – +15	-8.1	-40 / +120
Y	-30 – +30	-8.1	
Z	0 – +100	-3.7	
X	-30 – +30	-8.1	-40 / +120
Y	-60 – 60	-8.1	
Z	0 – 200	-3.9	
X	-75 – +75	-4.2	-40 / +120
Y	-150 – +150	-4.2	
Z	0 – 100	-2.0	

TABELLA TORSIOMETRI AD ESTENSIMETRI (RANGE TEMP +10 / +60)

Intervallo di misura [Nm]	Forza massima radiale [N]	Forza massima assiale [N]	Frequenza di taglio -3dB tensione uscita [kHz]	Velocità [1/min]
0 - 0.2	10	50	1	20000
0 - 0.5	25	50	1	20000
0 - 0.5	5	20	3	20000
0 - 1	50	50	1	20000
0 - 1	10	50	3	20000
0 - 2	100	50	1	20000
0 - 2	20	50	3	20000
0 - 5	200	50	1	20000
0 - 6	40	150	3	20000
0 - 10	200	50	1	20000
0 - 12	40	150	3	20000
0 - 12	30	150	3	12000
0 - 18	40	200	3	20000
0 - 18	30	150	3	12000
0 - 20	200	50	1	20000
0 - 50	200	100	1	20000
0 - 50	60	500	3	9000
0 - 63	60	500	3	9000
0 - 100	400	200	1	12000
0 - 100	100	700	3	9000
0 - 100	250	400	3	9000
0 - 150	100	1000	3	9000
0 - 160	100	1000	3	9000
0 - 200	400	200	1	8000
0 - 200	300	400	3	9000
0 - 250	150	2000	3	7000
0 - 300	150	2000	3	7000
0 - 500	400	800	3	7000
0 - 500	1000	500	1	8000
0 - 1000	400	1000	3	7000
0 - 1000	2000	1000	1	8000
0 - 2000	4000	2000	1	5000
0 - 5000	10000	5000	1	5000



3 TECNOLOGIE INNOVATIVE

3.1 CELLE DI CARICO AL SILICIO

SHEMA INTRODUTTIVO

Introduzione

Struttura

Mono e policristallini

Celle per carichi elevati

Introduzione

Le celle di carico convenzionali e maggiormente diffuse sono costituite da un elemento flessibile in metallo, generalmente acciaio o alluminio, su cui sono installati degli estensimetri resistivi che permettono la misura della forza. Come si è visto però questa tipologia di celle è affetta da errori e la loro accuratezza è limitata da fenomeni di isteresi e strisciamento. Per limitarne gli effetti si ricorre generalmente ad acciai con migliori caratteristiche ma al tempo stesso comunque soggetti agli stessi difetti.

Per ovviare del tutto a questo problema si può invece ricorrere all'utilizzo di sensori non più in leghe metalliche ma bensì costituiti da silicio. Questo materiale di fatto risulta immune ai problemi di isteresi e strisciamento, inoltre l'utilizzo del silicio permette di estendere il campo di applicazione data la possibilità di ottenere sensori con una più elevata precisione nella misura. Dal punto di vista strutturale inoltre si rende possibile l'integrazione dei sensori sul dispositivo attraverso l'utilizzo delle già consolidate tecnologie di deposizione utilizzate ad esempio nella realizzazione di circuiti integrati. Come si può ben capire i sensori al silicio godono di una vasta gamma di vantaggi tra cui anche la bassa sensibilità ai carichi laterali e agli effetti termici data la compattezza del sensore stesso. Inoltre, potendoli realizzare attraverso tecnologie già esistenti ed avendo delle dimensioni molto contenute risultano pure vantaggiosi dal punto di vista economico.

A fronte della possibilità di realizzare sensori compatti, leggeri, ad alte prestazioni ed economici, si ha il problema che il silicio è un materiale fragile e le ridotte dimensioni della parte sensibile costringono ad una attenta analisi della distribuzione delle tensioni. Quest'ultimo aspetto ricopre un ruolo fondamentale dato che si hanno delle notevoli variazioni degli effetti dovuti alle tensioni locali determinate dalla distribuzione più o meno omogenea delle tensioni. Si è visto come anche una minima variazione delle condizioni di carico possa avere una elevata influenza sul segnale d'uscita compromettendo la ripetibilità delle misurazioni.

3.1.1 STRUTTURA

La struttura delle celle di carico al silicio assume una configurazione tale da rendere trascurabili gli effetti di variazione del carico e quindi rispettare i parametri di accuratezza necessari.

1) configurazione flettente

In questo tipo di struttura il carico è applicato ad un elemento metallico il quale è posto su una estremità della mensola in silicio. L'altra estremità invece è vincolata ad un supporto e sulla sua superficie è installato un elemento sensibile.

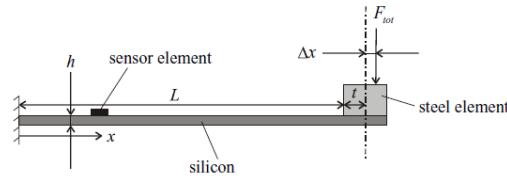


Fig. 2.2: Silicon spring element of the beam type.

Come si vede dalla figura, l'elemento sensibile è posto ad una distanza fissa dal punto ideale di applicazione della forza. Si deve considerare però che la forza può avere un punto di applicazione diverso e quindi presentare una variazione della distanza di misura Δx . In questo modo si incorre in un errore di misura quantificabile come:

$$Er_e = \frac{\varepsilon(F_{tot}, \Delta x, x) - \varepsilon(F_{tot}, 0, x)}{\varepsilon(F_{tot}, 0, x)} = \frac{\Delta x}{L + t - x}.$$

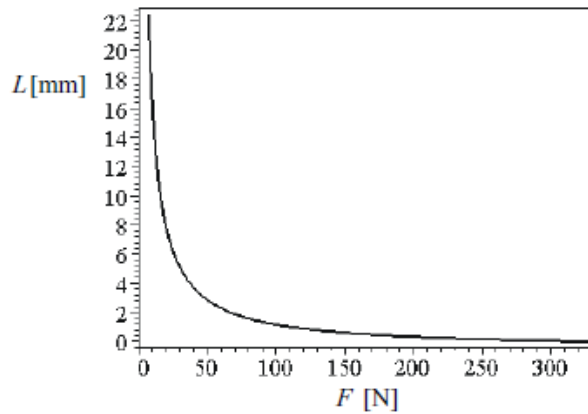
Considerando che lo sforzo massimo si ha all'estremità vincolata della mensola e risulta:

$$\sigma_{max} = E\varepsilon(F_{tot}, \Delta x, 0) \approx E\varepsilon(F_{tot}, 0, 0) = \frac{6F_{tot}(L+t)}{bh^2}.$$

Allora si può eliminare la componente x relativa alla distanza tra punto di misura e punto di applicazione della forza. In modo tale si ottiene che l'errore risulta in funzione solamente della variazione Δx e non più della coordinata di posizione x . In questo modo l'errore risulta lineare con la forza applicata:

$$Er_e = \frac{6F_{tot}\Delta x}{bh^2\sigma_{max}}.$$

Al fine di contenere l'errore entro un certo limite desiderato si può agire su due componenti. La prima è la forza massima applicabile la quale deve essere ridotta. La seconda riguarda la tensione massima che la trave è in grado di sopportare. Per contenere l'errore si dovrebbe avere un valore di tensione massima elevato il quale richiederebbe una diminuzione della lunghezza della trave. Da qui si può comprendere l'esistenza di un legame tra le due componenti che limita la dimensione e la forza massima applicabile sul dispositivo. Tale relazione è riportata nel grafico che segue:



In ultima analisi si può quindi affermare come la struttura a trave per celle di carico al silicio consenta di ottenere dei gradi di accuratezza molto elevati ma con uno stretto vincolo sulla dimensione della parte deformabile e sulla forza massima consentita.

Si consideri però che la riduzione della forza può essere evitata utilizzando una differente geometria della trave in modo da alzare il limite di sollecitazione massima ammissibile.

Se invece si vuole compensare l'elevata sensibilità al punto di applicazione del carico si può inserire un secondo sensore oppure utilizzare un meccanismo che riduca l'effetto della deviazione del carico. Tale struttura è chiamata roveral mechanism e consiste in un quadrilatero articolato interposto tra la forza ed il componente metallico della cella. In entrambi i casi permane il limite della sollecitazione massima ammissibile per la mensola in silicio.

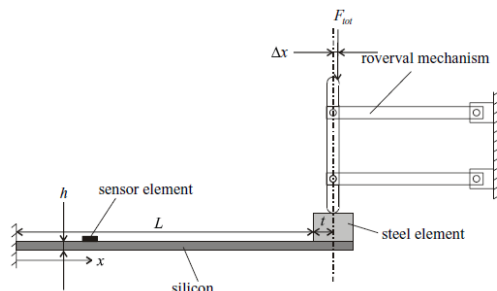


Fig. 2.4: Roveral mechanism in combination with a silicon spring element of the beam type.

2) Configurazione a compressione

Data la necessità di misurare sollecitazioni di compressione le celle di carico di questo tipo presentano una struttura a colonna la quale non risente delle componenti flessionali della tensione.

Tra due blocchi metallici è collocata la parte in silicio la quale viene compressa sotto l'azione di un carico assiale. Anche in questo caso si deve considerare che la distribuzione dei carichi non è uniforme, come evidenziato nel riquadro. Di fatti la superficie dell'elemento in silicio e quella dei blocchi non combaciano perfettamente poiché hanno rugosità differenti.

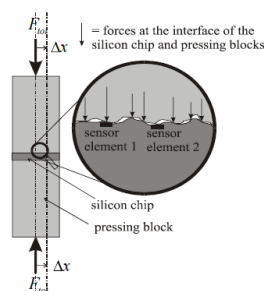


Fig. 2.5: Silicon spring element of the compression type.

Gli elementi sensibili sono posizionati tra le due superfici e sono soggetti alle deformazioni subite dalla parte in silicio. Nel momento in cui si applica un carico esterno i sensori subendo una deformazione vanno a quantificare la forza applicata, ma se questa si sposta e varia rispetto all'asse il suo punto di applicazione si notano dei cambiamenti. Di fatti agendo su di un punto diverso della superficie le tensioni varia e quindi si ha una differente distribuzione delle tensioni che provoca una deviazione nel segnale di uscita a parità di forza esterna applicata.

Per risolvere il problema, si ricorre a strutture deformabili in cui la geometria permette di ottenere una distribuzione uniforme delle tensioni nei punti dove sono posizionati gli elementi di misura seppur il carico esterno vari la sua posizione. In questo modo si ottengono delle celle di carico in grado di garantire una elevata accuratezza.

3.1.2 POLI E MONOCRISTALLINI

Il silicio utilizzato per la realizzazione di celle di carico si può presentare in due forme, monocristallino e policristallino le quali godono di specifiche caratteristiche.

Nel silicio monocristallino l'effetto piezoresistivo è basato su un' ampia variazione del gap di energia tra la banda di conduzione e quella di valenza. Di fatti se il materiale è sottoposto ad una deformazione il livello di energia relativo all'orientamento dei cristalli viene alterato facendo si che la resistenza diventi anisotropa. Ne consegue che le caratteristiche piezoresistive sono prevalenti rispetto la direzione in cui sono orientati i cristalli.

Per il silicio policristallino invece le caratteristiche fisiche sono determinate anche dai bordi dei cristalli i quali costituiscono una barriera al passaggio dei portatori di carica.

In entrambi i casi si può ricorrere al drogaggio tramite ioni accettori (tipo p) e donatori (tipo n) al fine di migliorarne le caratteristiche.

Di seguito vengono analizzati i parametri caratterizzanti gli estensimetri con riferimento alle caratteristiche del silicio precedentemente esposte.

Fattore di gage

Il fattore di gage nei monocristallini è determinato dall'orientazione dei cristalli, dal tipo di drogaggio e dal suo livello. Nella tabella seguente sono riportati i valori dei fattori di gage longitudinali e trasversali in funzione dei parametri sopraelencati.

Fattore di gage	Tipo P		Tipo N	
	Ampiezza	Direzione (xyz)	Ampiezza	Direzione (xyz)
Longitudinale	+122.4	<110>	-131.3	<100>
Trasversale	-110.9	<110>	+71.1	<100>

Si può vedere come il silicio tipo p risulta più sensibile alle sollecitazioni trasversali e come il relativo fattore di gage aumenti con la diminuzione del livello di drogaggio. Ne consegue che il silicio tipo p è preferibile al tipo n per l'utilizzo in celle di carico.

Per il silicio policristallino i fattori di gage dipendono fortemente dal tipo e dalla concentrazione di drogante oltre che dalla temperatura di deposizione e dal processo di ricottura. Di fatti il silicio policristallino viene depositato ad una temperatura di 560°C e ricotto a 1000°C per 30 minuti in azoto senza presenza di umidità.

Si riscontra come i fattori di gage per silicio policristallino di tipo p siano più elevati rispetto a quelli di tipo n.

Temperatura di lavoro

Per ottenere degli estensimetri al silicio monocristallino si depongono, attraverso processo diffusivo degli ioni tipo p o n su substrati tipo n o p. La giunzione pn risultante crea l'isolamento elettrico del dispositivo sebbene introduca anche un limite nella temperatura massima a 120°C. Questo problema però può essere risolto attraverso la deposizione del silicio su di uno strato di isolante di materiale diverso. In questo modo il limite di temperatura si alza notevolmente permettendo l'utilizzo di questi dispositivi anche alle elevate temperature. La tecnologia appena descritta è conosciuta con il nome di SOI acronimo di silicon on insulator.

Per sensori costituiti da silicio policristallino generalmente si dispone il materiale su di uno strato di materiale isolante come ad esempio l'ossido di silicio e il range di temperature risulta largamente più ampio rispetto a quello del monocristallino.

Scelta dell'estensimetro

Al fine di una completa trattazione dell'argomento non si devono tralasciare le considerazioni riguardo la scelta tra silicio mono e policristallino per lo sviluppo di celle di carico.

Da quanto precedentemente visto si può affermare che il silicio monocristallino possiede una maggiore precisione ed un più elevato fattore di gage. D'altra parte però i problemi legati alla sua produzione lo rendono un materiale più costoso. Inoltre i coefficienti di temperatura sono circa quelli del policristallino ed essendo elevati determinano un'ampia dipendenza dei fattori di gage dalla temperatura.

Seppur il limitato costo dei policristallini li renda interessanti, i maggiori vantaggi in termini di prestazioni dei monocristallini fan sì che questi siano preferibili ai primi.

Ora però si consideri anche quali tra i monocristallini tipo p ed n siano migliori. Come visto in precedenza il silicio tipo p possiede dei fattori di gage più elevati ed una maggiore differenza tra quello longitudinale e quello trasversale. Per questi motivi risulta preferibile l'utilizzo di silicio monocristallino di tipo p.

Di seguito viene riportata una tabella riassuntiva degli aspetti e delle considerazioni appena sviluppate:

	P-type mono-Si	N-type mono-Si	N-type poly-Si	N-type poly-Si
Transversal gauge factor	++	++	+	+
Temperature coefficient gauge factor (*1)	-	-	-	- (for low doping levels) +/- (for high doping levels)
Temperature coefficient resistivity	++ only for low doping levels, - for higher doping levels	++ only for low doping levels, - for higher doping levels	- for all doping levels (*2)	- for all doping levels (*2)
Temperature operating range	- (if diffused in substrate) ++ (for SOI)	- (if diffused in substrate) ++ (for SOI)	++	++
Intrinsic and thermal strain	+/- for SOI ++ for doping in the substrate	+/- for SOI ++ for doping in the substrate	+/- is always present, because an insulator is needed	+/- is always present, because an insulator is needed
Stability	++ (for SOI) +/- (for gages in a substrate due to pn-junctions)	++ (for SOI) +/- (for gages in a substrate due to pn-junctions)	++ (especially for high doping levels)	- (due to segregation effects at the grain boundaries)
Facilities (*3)	+ (implantation machine is present) ++ (boron doping by diffusion is possible)	+ (implantation machine is present) -- (doping by diffusion is not possible)	+ (implantation machine is present) ++ (boron doping by diffusion is possible)	+ (implantation machine is present) -- (doping by diffusion is not possible)
Costs (*4)	- (in case of implantation) ++ (in case of boron diffusion)	- (in case of implantation) -- (doping by diffusion is not possible)	- (in case of implantation) ++ (in case of boron diffusion)	- (in case of implantation) -- (doping by diffusion is not possible)

Table 3.3: Evaluation of different aspects of poly-Si and mono-Si gages.

++ = very good; + = good; +/- = neutral; - = bad; -- = very bad;

In ultima analisi si può affermare che le celle di carico al silicio possiedono una sensibilità molto più elevata rispetto alle celle convenzionali. Inoltre hanno un coefficiente di temperatura molto più contenuto che assieme alla compattezza e il costo ridotto rendono questo tipo di sensori di forza molto competitivi rispetto a quelli convenzionali e maggiormente diffusi.

3.1.3 CELLE AL SILICIO PER CARICHI ELEVATI

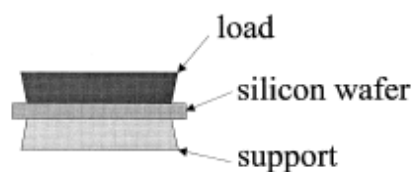
Si vuole ora considerare gli aspetti e le problematiche relative all'utilizzo di celle di carico al silicio per la misurazione di forze elevate.

Innanzitutto il silicio essendo un materiale fragile possiede delle caratteristiche che rendono il suo utilizzo migliore rispetto a materiali metallici. Di fatti si vede come sensori al silicio non subiscano gli effetti di isteresi e di slittamento ovviando quindi a tutte quelle problematiche legate a tali difetti intrinseci al materiale. Un ulteriore aspetto che rende ottimale l'utilizzo del silicio riguarda la possibilità di poter integrare i sensori all'interno della struttura grazie alle tecnologie di formatura e deposizione del materiale semiconduttore. In questo modo si elimina inoltre il problema del posizionamento del sensore rispetto al punto di applicazione del carico. Fattore che come già visto introduce delle problematiche non trascurabili al fine di una buona misurazione.

Generalmente i sensori al silicio sono basati su di una struttura a trave flettente o a membrana. Queste geometrie infatti sono molto adatte per realizzare celle di carico ma limitano il range di carico applicabile. Indicativamente si possono raggiungere i 1500N circa. La motivazione risiede nel fatto che il sottile strato di silicio che compone la parte flessibile di questi strumenti può sopportare carichi limitati.

Al fine dunque di poter realizzare celle di carico in grado di lavorare con sollecitazioni elevate risulta necessario modificare la struttura della cella stessa, cioè cambiare la geometria della parte in silicio in modo tale che possa resistere a carichi maggiori.

Dato che tale materiale non è adatto a lavorare a flessione essendo molto fragile, risulta evidente come la soluzione sia quella di far lavorare la parte deformabile in silicio della cella non più in flessione ma bensì in compressione.



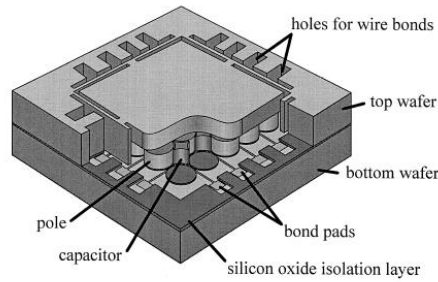
Il sensore risulta quindi formato da una pastiglia di silicio la quale viene deformata dal carico esterno che si intende misurare. La compressione esercitata viene rilevata come deformazione del materiale il quale al suo interno contiene degli estensimetri piezoresistivi di silicio policristallino.

Il problema principale di questo dispositivo risiede nel fatto che è estremamente difficile applicare un carico in maniera omogenea sull'intera superficie del materiale. Ne consegue che la presenza di locali concentrazioni di forza riduce sia l'accuratezza che il massimo carico applicabile.

Per risolvere questo problema si ricorre allo sviluppo di specifiche geometrie delle celle: di seguito ne viene analizzato un modello.

Questo tipo di sensore è costituito da due strati di silicio i quali sono vincolati tra di loro. La parte centrale dello strato superiore è sagomata in modo tale da presentare una punta piatta la quale deve essere in contatto con la parte centrale dello strato inferiore. Quest'ultima è strutturata in maniera tale da presentarsi come una membrana sottile sul cui centro agisce la punta superiore che imprime una deformazione.

La punta dello strato superiore contiene dei poli i quali poggiano su di una elettrodo applicato alla membrana. In questo modo si viene a creare una capacità tra i due elementi di silicio.



Quando viene applicato un carico la punta viene compressa sulla membrana aumentando così la capacità. La variazione di distanza può essere espressa come:

$$\Delta L = \frac{L}{E * A} * F$$

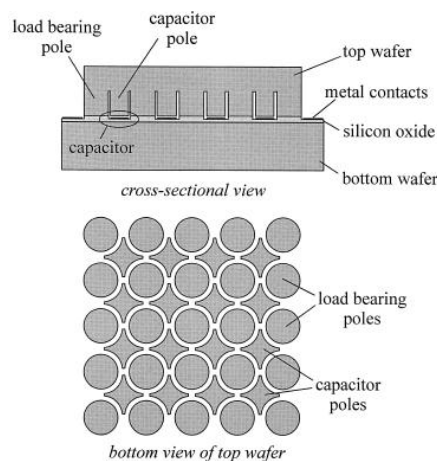
Dove L e A sono rispettivamente distanza ed area dei poli, E è il modulo di young del silicio ed F è il carico agente. La capacità quindi risulta:

$$C = \frac{\epsilon * A}{d + \Delta d}$$

Dove ϵ è la costante dielettrica, A è l'area del condensatore, d è la distanza tra le armature a riposo e Δd la variazione sotto carico.

Quando la forza esterna non è distribuita in maniera omogenea sul materiale, la presenza di un elevato numero di poli, ognuno paragonabile ad un condensatore, fa sì che si abbia comunque una buona approssimazione della forza totale agente sul sensore.

Risulta evidente come questa tipologia di struttura permetta di utilizzare celle al silicio per elevati carichi e anche come vada ad ovviare al problema della non uniformità del carico sulla parte sensibile.

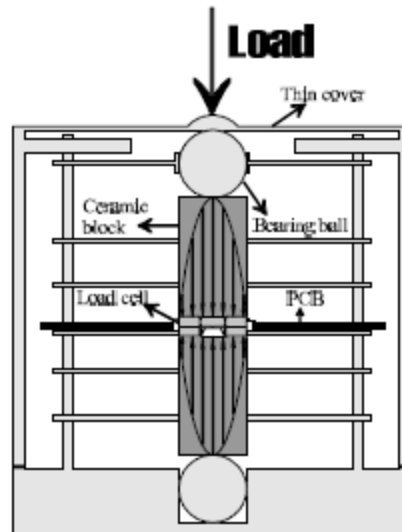


Per ottenere una migliore distribuzione delle tensioni sul materiale può risultare vantaggioso utilizzare dei blocchi ceramici da porre sopra e sotto gli strati di silicio. Su di essi non viene direttamente applicato il carico ma bensì viene interposto un ulteriore elemento.

Ponendo sulla sommità degli elementi ceramici una sfera ed applicando su di essa il carico si riesce ad ottenere una ancora migliore distribuzione delle tensioni su tutta la superficie del sensore. Di fatti la forza applicata alla sfera viene trasmessa ai supporti ceramici attraverso il punto di contatto tra i due elementi. In questo modo la propagazione delle tensioni all'interno della ceramica avviene in maniera determinata con andamento parabolico. In questo modo si ottiene una distribuzione uniforme lungo tutta la sezione del

materiale ad una certa distanza dal punto di origine. Così facendo al sensore di silicio perviene un fronte di tensioni uniforme, cosa che finora non si era verificata.

Nella figura successiva è illustrato quanto appena spiegato. Si può inoltre notare la struttura che contiene la cella di carico e quella che sostiene tutto il meccanismo.



Bisogna comunque precisare che all'interfaccia tra ceramica e silicio si riscontra comunque una disomogeneità dei carichi seppur nettamente inferiore a quella dei casi precedenti. In ogni modo questo aspetto non viene per nulla trascurato anzi, è ambito di ricerca al fine di migliorare ulteriormente questo tipo di celle di carico.

In conclusione si può affermare che le celle di carico al silicio per elevati range di misura sono realizzabili seppur presentino alcuni problemi. Si è visto come sfruttando le caratteristiche meccaniche del silicio si possa arrivare a sollecitazioni di compressione di circa 0.2 GPa prima di incorrere nella rottura del sensore. Inoltre è stato affrontato il problema della distribuzione del carico e si è analizzata una possibile soluzione attraverso la tecnica definita come distributed sensing. Vista anche la competitività dal punto di vista della precisione di questi dispositivi ed inoltre il costo contenuto della tecnologia realizzativa si può ben affermare che sono un mezzo più che valido per le misurazioni di forza anche per elevati livelli di carico.

3.2 SENSORI IN FIBRA OTTICA

SCHEMA INTRODUTTIVO

Analisi delle sollecitazioni
Fibra a griglia di Bragg
Caratteristiche tecniche

I sensori in fibra ottica si basano sul principio per il quale tensioni e deformazioni indotte sulla fibra stessa vanno ad alterare l'indice di rifrazione e la sua geometria. Tali cambiamenti perturbano infatti intensità, fase e polarizzazione dell'onda luminosa che si propaga all'interno della fibra. Risulta quindi evidente come si possa risalire alla tensione esterna applicata attraverso la misurazione delle perturbazioni ottiche.

Comparando i dispositivi a fibra ottica con i sensori di forza convenzionali si riscontrano i seguenti vantaggi:

- 1) Migliore adattabilità a forme e materiali differenti;
- 2) Su di un unico supporto fisico si può realizzare sia la parte sensoristica che quella atta alla trasmissione;
- 3) Precisione e sensibilità maggiori;
- 4) Immunità ad interferenze elettromagnetiche;
- 5) Campi di temperatura più elevati.

I sensori in fibra ottica possono essere divisi in diverse categorie a seconda della grandezza fisica che si intende analizzare. Si possono di fatti trovare sensori localizzati, distribuiti, ambientali, termici, meccanici e chimici.

Una ulteriore catalogazione di questi sensori si ha in base alle caratteristiche di trasduzione, cioè a seconda che rilevino:

- 1) Ampiezza o intensità;
- 2) Fase o interferenza;
- 3) Spettro;

La trattazione prosegue con l'analisi dei sensori in fibra ottica per la misurazione di forza.

3.2.1 ANALISI DELLE SOLLECITAZIONI

La capacità dei sensori ottici di rilevare le distribuzioni di tensione all'interno della struttura di un materiale dipende dalle relazioni che si instaurano tra la fibra ed il materiale su cui viene installata. Sono cioè le tensioni trasmesse dal materiale soggetto a sollecitazione alla fibra ottica che vanno a modificare le caratteristiche del segnale luminoso che percorre il nucleo del cavo.

Si deve notare come il segnale ottico presente sulla fibra non sia totalmente rappresentativo delle tensioni che realmente agisce sul materiale sollecitato. Il motivo di questa discrepanza deriva dal fatto che la fibra ottica non è direttamente in contatto con la superficie del materiale ma bensì tra i due elementi è interposto il rivestimento del cavo. Questo fa sì che il nucleo di vetro risulti isolato al fine di garantirne l'integrità fisica data la sua naturale fragilità.

Per la misurazione delle deformazioni si devono quindi considerare alcuni importanti parametri i quali determinano le caratteristiche di trasferimento delle sollecitazioni dal materiale alla fibra. Si devono considerare le caratteristiche meccaniche del materiale di rivestimento, del vetro componente il nucleo, la lunghezza di gage o la lunghezza della fibra vincolata al materiale.

Si noti inoltre che nella maggior parte dei casi si riscontra un modulo di elasticità del materiale di rivestimento nettamente inferiore a quello del nucleo vetroso dato che esso è costituito da materiale

polimerico o acrilico. Da qui si spiega il motivo del non completo trasferimento della sollecitazione subita dal provino alla fibra ottica, il quale viene assorbito appunto dal materiale che ricopre il nucleo.

Per ovviare a questo problema si può ricorrere ad una prova di calibrazione del sensore in modo tale da ricavare il coefficiente di proporzionalità che lega la deformazione del provino con quella del nucleo della fibra.

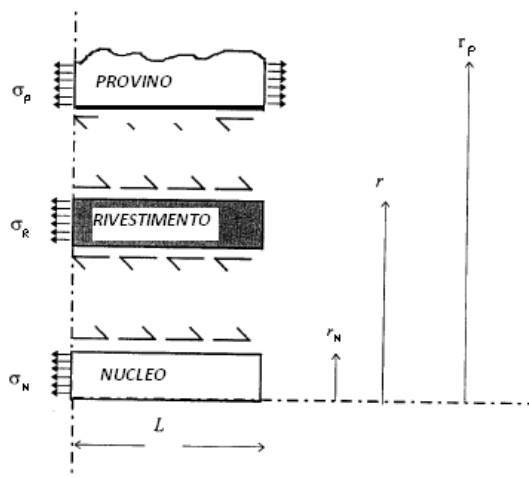
Al fine di eliminare la necessità di un test di calibrazione si è cercato di sviluppare un modello matematico attraverso il quale determinare in maniera precisa la proporzionalità tra le due deformazioni. La relazione che sussiste è espressa dalla formula:

$$\varepsilon_f = \alpha(k, L) * \varepsilon_p$$

Dove ε_n è la deformazione subita dal nucleo della fibra ottica, ε_p quella realmente subita dal provino ed α è un fattore di proporzionalità determinato dalla lunghezza di gage L e dal coefficiente k. Quest'ultimo è un parametro relativo alle caratteristiche meccaniche e geometriche del cavo in fibra ottica e risulta:

$$k = \frac{2G_r}{r_n^2 E_n \ln\left(\frac{r_p}{r_n}\right)}$$

Dove r_n è il raggio del nucleo della fibra ed E_n il suo modulo di Young, r_p quello del provino e G_r è il coefficiente di taglio del materiale di rivestimento: $G_r = \frac{E_r}{(1+2\nu_r)}$ con E_r modulo di Young e ν_r coefficiente di Poisson.



Si ricava inoltre dal calcolo della deformazione media misurata dalla fibra sulla lunghezza di gage che il coefficiente di proporzionalità vale:

$$\alpha(k, L) = \left[1 - \frac{\cosh(kL)}{kL * \sinh(kL)} \right]$$

In questa maniera, conoscendo α si risale alla proporzione tra la deformazione rilevata dal nucleo della fibra ottica e quella realmente agente sul provino. Alla luce di quanto appena visto risulta chiaro come si possa determinare a priori il legame conoscendo i parametri meccanici e geometrici del cavo. La conseguenza immediata di tale modello è quella di rendere inutile ogni test di calibrazione con le conseguenti agevolazioni in ordine di tempo ed accuratezza di misurazione del parametro.

Si consideri, sempre con riferimento ad α che i valori ammissibili da tale parametro, per un sensore costituito da cavo in fibra ottica non possono assumere valori unitari. Il motivo risiede nel fatto che se fosse $\alpha=1$ allora vi sarebbe una diretta corrispondenza tra deformazione del provino e deformazione del

nucleo. Tale situazione si riscontra solo nel caso in cui il nucleo stesso sia a diretto contatto col provino e quindi si sia privato il cavo del suo rivestimento. In questo modo però si va incontro a problemi di resistenza meccanica del sensore dato che il nucleo in vetro è molto fragile. Di conseguenza si preferisce non rimuovere lo strato protettivo e determinare il coefficiente di proporzionalità.

3.2.2 FIBRA A GRIGLIA DI BRAGG

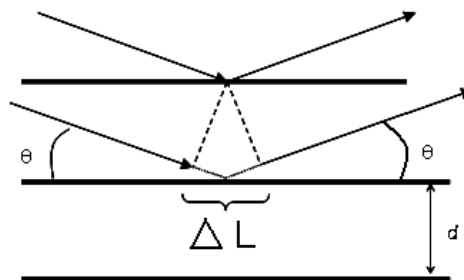
I sensori in fibra ottica a griglia di Bragg si basano sull'omonima legge la quale enuncia che: considerata una serie di piani paralleli capaci di riflettere parzialmente un'onda elettromagnetica e supponendo di far incidere su di essi un'onda piana monocromatica di lunghezza d'onda λ , si riscontra un fenomeno di diffrazione della stessa.

Di fatti l'onda viene parzialmente riflessa e trasmessa ad ogni piano e questo dà luogo ad una serie di raggi riflessi tutti paralleli tra loro i quali compongono il fascio diffratto.

Supponendo che i raggi incidenti abbiano lo stesso angolo di quelli riflessi, questi ultimi provenendo da piani diversi non sono in fase tra loro poiché compiono tragitti di lunghezza differente.

Considerando una distanza interplanare d ed un angolo di incidenza uguale a quello di riflessione θ si può quantificare la differenza della lunghezza del tragitto tra due raggi incidenti su piani adiacenti secondo la formula:

$$\Delta L = 2d * \sin \theta$$



Si noti come la differenza di distanza percorsa dipenda dalla distanza interplanare e dall'angolo di incidenza. Pertanto variando questi due elementi si può regolare la fase tra i raggi riflessi.

Se la lunghezza d'onda del raggio incidente risulta paragonabile alla distanza interplanare $\lambda \approx d$ allora si ottiene che la differenza di cammino è uguale ad un multiplo intero della lunghezza d'onda. In questo modo i raggi sono in fase tra loro e quindi le ampiezze si sommano dando luogo ad un segnale più forte.

La relazione precedentemente descritta può ora essere espressa come segue:

$$2d * \sin \theta = n * \lambda$$

dove n è un numero intero. Questa formula prende il nome di condizione di Bragg e l'angolo θ che la soddisfa è definito angolo di Bragg.

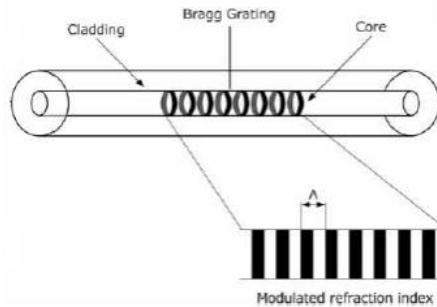
Nei casi in cui non venga soddisfatta suddetta condizione risulta evidente come il fascio diffratto abbia intensità praticamente nulla. Si riscontra infatti che la condizione di Bragg dà luogo ad un fascio uscente di intensità apprezzabile solo per un determinato valore dell'angolo di incidenza θ .

In conclusione si può affermare che fissata l'orientazione e la spaziatura interplanare dei piani semiriflettenti e la lunghezza d'onda del fascio incidente, esiste solamente una direzione di incidenza per cui si ha riflessione (condizione di Bragg). Questa a sua volta determina la direzione dell'onda riflessa.

Si può quindi comprendere come fissato il fascio incidente e la struttura dei piani, si possa ricavare il fascio riflesso.

Perseguendo tale ragionamento e data l'unicità della condizione di Bragg, risulta evidente come per ogni deformazione della struttura di piani si ottenga un' unica onda riflessa.

Partendo da tale principio si possono sviluppare sensori di forza attraverso la realizzazione di una serie di piani semiriflettenti all'interno del nucleo della fibra ottica. In questo modo quando la struttura è soggetta a deformazione tali piani variano la loro inclinazione e di conseguenza viene modificato l'angolo di incidenza del fascio luminoso.



La figura soprastante schematizza quanto detto.

Con tale struttura si riscontra che la condizione di Bragg risulta:

$$\lambda_B = 2n_{eff} * \Lambda$$

Dove n_{eff} è l'indice di rifrazione efficace del nucleo della fibra ottica e Λ è il passo della griglia di Bragg (o distanza interplanare).

Dato un carico il quale induce deformazione sul provino poi trasmessa alla fibra, causa una conseguente variazione della lunghezza d'onda di Bragg la quale risulta quindi il parametro base per lo sviluppo dei sensori di forza. Si deve inoltre considerare che non solo una forza esterna può indurre deformazioni ma anche una variazione di temperatura dell'elemento sensibile.

Di conseguenza risulta evidente come la misura della variazione di lunghezza d'onda di Bragg sia determinata da entrambi i fattori. Si può quindi scrivere la variazione come:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \zeta)\Delta T + (1 - p_e)\varepsilon_l$$

In cui :

α = coefficiente di espansione termica della griglia;

ζ = coefficiente termo ottico;

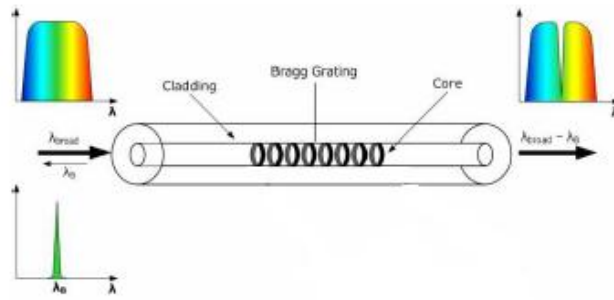
ΔT = variazione di temperatura;

p_e = coefficiente fotoelastico della deformazione longitudinale;

ε_l = deformazione longitudinale;

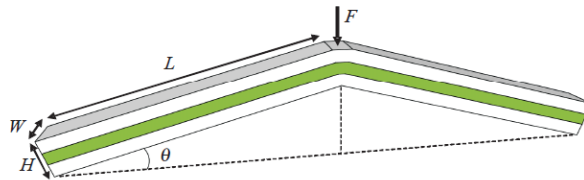
Nella seguente trattazione viene trascurato il termine termo ottico dato che può essere compensato tramite misurazione differenziale. Inoltre viene trascurato anche il termine fotoelastico dato che risulta essere un semplice fattore di proporzionalità della deformazione.

Nello studio dei sensori di forza in fibra ottica a reticolo di Bragg si deve tener presente che le sollecitazioni, siano esse longitudinali o trasversali, vengono in ogni caso misurate nella loro componente longitudinale. Si consideri comunque che nel caso di carichi longitudinali la sensibilità è piuttosto bassa data l'elevata rigidità della struttura. Essa però può essere incrementata attraverso una amplificazione delle deformazioni meccaniche.



Analisi delle deformazioni

Con riferimento alla figura seguente, costituita da due conci a sezione rettangolare ognuno di lunghezza L , larghezza W e spessore H collegati tra loro con un angolo di $\pi - 2\theta$ a cui è applicata una forza F nel punto di giunzione.



L'equilibrio statico della trave sinistra risulta:

$$F = 2V * \cos \theta - 2N * \sin \theta$$

dove V è la componente di taglio ed N quella normale.

Nel caso in cui si abbia $\theta = 0$ la componente normale si annulla ed il carico è totalmente bilanciato da tensioni di taglio le quali non inducono alcuna variazione della lunghezza d'onda di Bragg.

Nel caso in cui invece l'angolo vale $\theta = \frac{\pi}{2}$ sul provino si manifestano solo sollecitazioni di tensione assiale le quali causano trazione o compressione del medesimo instaurando così una variazione finita di λ_B .

Nei casi intermedi si hanno entrambi i tipi di sollecitazione i quali causano sia deformazione longitudinale u che trasversale w . Nel punto di giunzione dei due conci tali parametri risultano $u_L = u(L)$ e $w_L = w(L)$ per cui la variazione geometrica vale:

$$w_L \sin \theta = -u_L \cos \theta$$

Essendo lo sforzo normale costante lungo la trave risulta:

$$u_L = L * \varepsilon_l = N * \frac{L}{E * W * H}$$

Con E modulo di Young del materiale di cui è costituita la trave.

La deformazione trasversale si ricava dalla soluzione dell'equazione di Eulero:

$$E * I * w'''' - N * w'' = q$$

Dove $I = \frac{1}{12} W * H^3$ è il momento di inerzia della trave e q il carico distribuito.

Applicando poi le condizioni al contorno:

$$\begin{aligned} w(0) &= 0 \\ w'(0) &= w'(L) = 0 \\ w(L) &= w_L \end{aligned}$$

si ottiene la soluzione:

$$w(x) = w_L * x^2 * \frac{(3L - 2x)}{L^3}$$

Data la relazione vigente tra la sollecitazione di taglio e la flessione della trave:

$$V = -EI * w''' = 12w_L * \frac{EI}{L^3} = w_L * \frac{EWH^3}{L^3}$$

Si ricava il legame tra i due parametri in funzione delle sole caratteristiche geometriche.

Attraverso l'equazione di equilibrio, la proiezione delle deformazioni e la formula dello spostamento longitudinale si arriva a determinare la formula risolutiva per lo sforzo normale e della deformazione longitudinale:

$$N = \frac{F * \tan \theta}{2 \left[\tan \theta \sin \theta + \left(\frac{H}{L}\right)^2 \cos \theta \right]}$$

$$\varepsilon_l = \frac{F}{2EWH} * \frac{\tan \theta}{\left[\tan \theta \sin \theta + \left(\frac{H}{L}\right)^2 \cos \theta \right]}$$

Volendo poi massimizzare la deformazione longitudinale è necessario determinare il valore massimo che l'angolo θ può raggiungere:

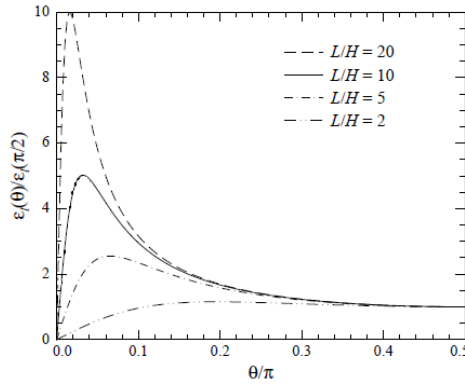
$$\theta_{max} = \arcsin\left(\frac{H}{\sqrt{L^2 - H^2}}\right) = \arctan\left(\frac{H}{\sqrt{L^2 - 2H^2}}\right) \approx \frac{H}{L}$$

L'approssimazione risulta valida nel momento in cui si ha $\frac{H}{L} \ll 1$.

La relativa deformazione longitudinale che si ottiene per θ_{max} risulta quindi:

$$\varepsilon_l^{max} = -\frac{F}{2EWH} * \frac{L}{2H\sqrt{1 - \left(\frac{H}{L}\right)^2}} \approx -\frac{FL}{4EWH^2}$$

Di seguito viene riportato un grafico che mette in relazione la deformazione normalizzata con la variazione dell'angolo per differenti valori del parametro di proporzionalità L/H.



Si vede come all'aumento del fattore si ha un incremento della deformazione del materiale ed una simultanea riduzione dell'angolo in cui si verifica il picco di maggiore sollecitazione. Tale andamento può quindi essere legato alla sensibilità del sensore la quale a sua volta dipende dalla geometria stessa della trave.

Si vuole ora procedere con l'analisi degli effetti indotti sulla fibra di Bragg dai fenomeni termici e tensoriali in relazione all'influenza che questi hanno sul sensore e sulla sua sensibilità.

Dalla relazione di Bragg, considerando la presenza di effetti sia termici che di sollecitazione si ricava la variazione della lunghezza d'onda come variazione di entrambi questi agenti ottenendo così la formula:

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{dn_{eff}}{dL} + n_{eff} \frac{d\Lambda}{dL} \right) \Delta L + 2 \left(\Lambda \frac{dn_{eff}}{dT} + n_{eff} \frac{d\Lambda}{dT} \right) \Delta T$$

Sensibilità alle deformazioni

Per descrivere gli effetti della tensione si introduce un coefficiente fotoelastico p_e il quale rappresenta gli effetti di propagazione della luce in funzione delle variazioni di geometria e di lunghezza d'onda. Nel rapporto di variazione di quest'ultima si introduce quindi il fattore di gage il quale esprime la riduzione dell'indice di rifrazione rispetto alla deformazione. Di conseguenza il GF appare nella forma: $(1 - p_e)$.

Si ottiene perciò:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\epsilon_l$$

Considerando inoltre che il coefficiente fotoelastico risulta:

$$p_e = \frac{n_{eff}^2}{2} * [p_{12} - \nu * (p_{11} + p_{12})]$$

Dove p_{11} e p_{12} sono i coefficienti lungo le direzioni principali, si può arrivare al calcolo della sensibilità dello strumento nel momento in cui si determina una variazione media della lunghezza d'onda.

Si consideri inoltre che la linearità tra variazione di lunghezza d'onda e deformazione impressa sussiste solo fin quando si hanno deformazioni entro 1%.

Per maggiore chiarezza se ne riporta un esempio.

Considerando di utilizzare della fibra alla silice di germanio si hanno i relativi valori $p_{11}= 0.113$, $p_{12}= 0.252$, $\nu = 0.16$ e $n_{eff} = 1.482$ i quali permettono di ottenere un coefficiente fotoelastico pari a $p_e=0.21$. Ipotizzando una variazione media della lunghezza d'onda di 1550 nm allora si ottiene uno strumento la cui sensibilità è pari a 0.79.

Sensibilità alla temperatura

Con lo stesso approccio utilizzato in precedenza si va ora ad analizzare gli effetti che la temperatura ha sul sensore.

Dalla formula iniziale si ottiene:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \zeta)\Delta T$$

Con

$$\alpha = \frac{1}{\lambda} * \frac{d\lambda}{dT} \quad \text{e} \quad \zeta = \frac{1}{n_{eff}} * \frac{dn_{eff}}{dT}$$

Utilizzando della fibra in silicio drogata al germanio si hanno $\alpha=0.55*10^{-6}$ e $\zeta=8.6*10^{-6}$ quindi con una lunghezza d'onda media di 1550 nm ed un intervallo di temperatura da quella ambiente a 100°C si ottiene una sensibilità alla temperatura di circa +10.6 pm/K

3.2.3 CARATTERISTICHE TECNICHE

Al fine di una più ampia e completa comprensione delle potenzialità dei sensori in fibra ottica a reticolo di Bragg risulta conveniente effettuare un paragone con dei sensori convenzionali quali gli estensimetri a lamina.

Di seguito viene riportata una tabella in cui si mettono a confronto i principali parametri delle due categorie di sensori.

	Estensimetri a lamina	Fibra ottica di Bragg
Risoluzione [%FS]	0.8 / 1.0	0.002
Precisione [%FS]	1.0	0.8
Range temperatura [°C]	-30 / +80	-75 / +250

Risulta evidente come i sensori di forza a fibra ottica abbiano parametri atti a misurazioni più fine rispetto a dei convenzionali estensimetri. Un aumento considerevole delle prestazioni lo si paga però in termini economici e sistemistici poiché i dispositivi per la conversione ed condizionamento di segnali ottici sono di gran lunga più costosi ed il loro utilizzo è nettamente più complesso. In ultima analisi si deve quindi considerare se un più elevato investimento possa portare ad un sicuro guadagno date le migliori prestazioni o se al contrario non convenga rinunciare ad un livello tecnologico superiore al fine di limitare i costi.

3.3 MEMS

SCHEMA INTRODUTTIVO

- Introduzione
- Sensori mems
- Mems piezoresistivi

3.3.1 INTRODUZIONE

L'acronimo mems significa Micro Electro Mechanical Systems e rappresenta quella categoria in cui ricadono tutti i dispositivi i quali sono sviluppati come circuiti integrati. Il termine mems di fatto non specifica una determinata gamma di prodotti ma bensì definisce la tecnologia con cui essi sono realizzati. Per questo motivo all'interno della categoria mems si trovano dispositivi di differente natura tra cui sensori ed attuatori oltre che meccanismi veri e propri ma su scala millesimale.

La tecnologia mems comprende una varietà di processi in grado di sviluppare strutture tridimensionali a base di silicio, vetro oppure quarzo.

Il suo sviluppo è dovuto da un insieme di fattori sia tecnici che commerciali. Risulta evidente come abbiano spianato la strada a nuovi mercati data la scala infinitesima dei prodotti che si riescono a realizzare ed inoltre questa tecnologia, basandosi su processi produttivi simili a quelli per circuiti integrati possiede il vantaggio di avere alle spalle un settore industriale già sviluppato.

Con riferimento agli aspetti tecnici che rendono la tecnologia mems interessante si consideri che data la scala ridotta si ha la possibilità di realizzare sistemi meccanici e o elettrici potendoli poi integrare all'interno di chip. Si può facilmente comprendere quanto elevato sia il potenziale di tale categoria. Inoltre la ricerca si sta spingendo nella direzione di creare sistemi integrati multifunzione con la possibilità di utilizzarli come supporti anche per lo sviluppo di nanotecnologie.

La tecnologia mems gode di un così elevato potenziale anche in virtù del fatto che si utilizzano materiali ad elevata purezza (Si al 99.999%) i quali garantiscono proprietà elettromeccaniche assai elevate e la loro realizzazione attraverso tecnologie già consolidate permette la produzione di grandi volumi a costi contenuti. Per quanto appena elencato si riporta una tabella contenente le principali caratteristiche meccaniche di acciaio e silicio al fine di permettere un primo e intuitivo apprezzamento del potenziale dato dall'utilizzo di tecnologia mems sul silicio.

	Steel	Silicon	Units
Yield strength	<4.2	7.0	1010 dyn cm ⁻²
Young's modulus	2.1	1.9	1012 dyn cm ⁻²
Density	7.9	2.3	g cm ⁻³
Thermal conductivity	0.97	1.57	W cm ⁻¹ °C
Mechanical hysteresis	Yes	No	
Sensitivity to stress	Low	High	
Fabrication resolution	10	0.1	µm
Fatigue failures	Yes	No	

3.3.2 SENSORI MEMS

Attraverso la tecnologia mems si possono sviluppare una serie di sensori basati su differenti principi di funzionamento ottenendo così dispositivi di tipo:

- piezoresistivo;
- capacitivo;
- risonatore;
- termoelettrico;
- ottico.

Mems ottici

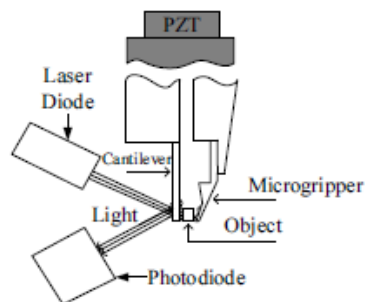
La misura di forza attraverso l'utilizzo di sensori ottici, come già visto porta notevoli vantaggi tra cui l'insensibilità ai disturbi elettromagnetici e l'elevata risoluzione.

Un ulteriore vantaggio di questa categoria è la capacità di determinare la forza senza la necessità del diretto contatto con l'elemento su cui essa agisce. Di fatti per particolari strutture con una adeguata rigidità si riesce a misurare la deformazione a distanza senza quindi intaccare l'integrità della struttura.

Il principio si basa sulla deviazione di un raggio quando il materiale si deforma.

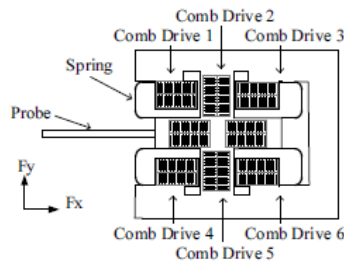
Un esempio applicativo di questa tecnologia sono le micro pinze. Come si intuisce dal nome la loro dimensione è assai ridotta e vengono utilizzate per manipolare oggetti di misura infinitesima. Data l'intrinseca fragilità che questi hanno risulta necessario controllare la forza che le pinze vi esercitano. L'utilizzo di sensori tradizionali in questo ambito sarebbe quasi certamente impossibile date le dimensioni dell'elemento, per cui si ricorre a dispositivi mems.

Come si può vedere dalla figura, per misurare la forza si invia un raggio laser sulla parte flessibile della pinza. Quando essa afferra il materiale si deforma e quindi il fascio che viene riflesso sul fotosensore varia. In questo modo si riesce a quantificare la forza senza avere diretto contatto con l'elemento che la subisce.



Mems capacitivi

I sensori di forza capacitivi si basano sul cambiamento della capacità tra due armature data dall'applicazione della forza. Quando questa agisce la distanza tra le due armature del condensatore o l'area effettiva che sottendono viene modificata per cui la misura di forza si ottiene attraverso la misurazione della variazione di capacità.



Solid model of a multi-axis capacitive force sensor

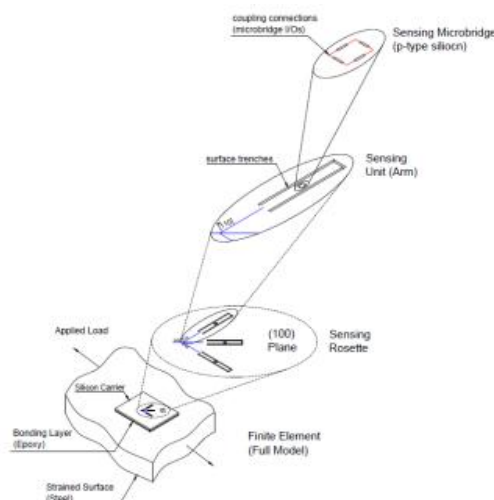
Il corpo del sensore è costituito da due parti: struttura interna e supporto esterno che sono rispettivamente parte mobile e parte fissa. Esse sono poi collegate da un elemento flettente arcuato e sulla parte interna vi è cablata una sonda sulla quale agisce la forza da misurare. Questa va a muovere la parte interna e quindi a variare lo spazio tra ogni parte dei condensatori con il risultato di instaurare una variazione nella capacità complessiva.

Si riscontra in ultima come i sensori capacitivi risultino più stabili, più sensibili e non affetti da fenomeni di isteresi rispetto a sensori di tipo piezoelettrico o estensimetrico.

3.3.3 MEMS PIEZORESISTIVI

Lo sviluppo di sensori piezoresistivi nasce dal fatto che essi presentano una variazione di resistenza rispetto agli estensimetri metallici pari a due ordini di grandezza. Se inoltre si richiede lo sviluppo di tecnologie sempre più indirizzate alla miniaturizzazione dei sistemi risulta evidente come la creazione di sensori di forza piezoresistivi attraverso tecnologia mems possa portare a risultati di gran interesse.

In questo modo si soddisfa la necessità di ridurre le dimensioni dei sensori i quali comunque garantiscono prestazioni di elevata qualità. La tecnologia mems permette di realizzare estensimetri piezoresistivi tramite processi di deposizione su wafer di silicio attraverso i quali si ottengono elementi con geometrie e dimensioni ben specifiche. Si deve notare inoltre che si verificano delle variazioni dei parametri caratteristici di questi sensori, i quali sono influenzati proprio dalla tecnica mems.



Di seguito si analizzano tali aspetti evidenziando le caratteristiche relative a fattore di gage, struttura, sensibilità, risoluzione ed influenza dei rumori sulla misurazione.

Fattore di gage

La sensibilità dei sensori piezoresistivi è definita come rapporto tra la variazione di resistenza e la deformazione, ma può anche essere espressa tramite dei coefficienti determinati da fattore di gage del materiale, dispersione delle deformazioni e profilo geometrico del sensore. Risulta quindi valida la relazione:

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} = k_l * K_b * K_g$$

In generale la variazione di resistenza può anche essere esplicitata dalla seconda legge di Ohm e quindi risultare:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta(L/A)}{L/A} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \left(\frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A} \right)$$

Con L,A e ρ rispettivamente lunghezza, area trasversale e resistività. Se poi si considerano le direzioni delle deformazioni i,j ed il coefficiente di resistenza elettrica γ allora vale la formula:

$$\frac{\Delta \rho_i}{\rho} = \sum_{j=1}^6 \gamma_{ij} * \varepsilon_j$$

Applicando ora tale relazione al silicio monocristallino il quale presenta una struttura cubica ed applicando un carico monoassiale valgono le condizioni:

- . il cristallo è descritto da tre coefficienti $\gamma_{11}, \gamma_{12}, \gamma_{44}$;
- . $\frac{\Delta L}{L} = \varepsilon_1 = \varepsilon$ e $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\nu \varepsilon$;
- . $\frac{\Delta A}{A} = -2\mu \varepsilon$

attraverso le quali si può scrivere, per un piezoresistore senza film:

$$k_{l,free} = \frac{\Delta R}{R * \varepsilon_1} = \gamma_{11} - 2\nu_f \gamma_{12} + 3$$

Nel caso in cui invece si abbia un estensimetro con film (bonded strain gage) si riscontra una differenza nel coefficiente di Poisson dettata dalla formula: $\nu_h = -\nu_f * \frac{1-\nu_s}{1-\nu_f}$ la quale è in funzione sia del coefficiente del substrato sia di quello del sensore. Risulta quindi:

$$k_{l,film} = \frac{\Delta R}{R * \varepsilon_1} = \gamma_{11} - (\nu_f + \nu_h) \gamma_{12} + \nu_s + \nu_h + 1$$

Con:

$$\nu_h = \frac{1 - \nu_s}{1 - \nu_f} * \nu_f$$

ν_s = coefficiente di Poisson del substrato.

Si può notare come la configurazione con film risulta avere un fattore di gage maggiore rispetto a quella che ne è priva, ma solo fin quando i coefficienti di Poisson hanno valori inferiori all'unità.

Se si rende necessario aumentare ulteriormente la deformazione sul sensore si può ricorrere all'inserimento di uno strato di legante tra il sensore ed il provino soprattutto quando questo è soggetto a flessione. Si riscontra infatti che maggiore è lo strato, maggiore è l'aumento di deformazione. D'altro canto però questa operazione introduce degli effetti negativi nel modo di lavorare del sensore. Risulta evidente come un maggior spessore di materiale interposto tra provino e sensore assorba una quantità maggiore della deformazione che dovrebbe essere trasmessa alla parte sensibile. In altri termini si riesce ad aumentare la deformazione totale del dispositivo ma non tutta viene recepita dal sensore. L'effetto deve quindi essere quantificato attraverso il coefficiente K_b che risulta valere:

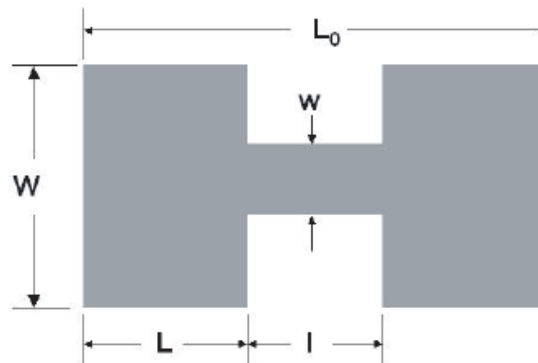
$$K_b = \frac{1}{1 + \frac{2h}{L_b} * \frac{A_s E}{A_b G}}$$

Dove h = altezza del legante;
 A_b = area del legante;
 L_b = lunghezza del sensore;
 A_s = area trasversale del sensore;
 E = modulo di Young del piezoresistore;
 G = modulo di taglio del metallo.

Questo coefficiente si riduce a valore unitario nel momento in cui si utilizza un metallo del provino con una rigidità molto maggiore di quella del materiale del sensore, cioè quando si verifica la disuguaglianza $G \gg E$. In questa situazione di fatti il sensore si deforma nella stessa maniera del substrato.

Al contrario la sensibilità viene nettamente ridotta nel caso in cui l'altezza del legante risulta superiore alla lunghezza del sensore stesso ($h \gg L_b$) per cui il coefficiente K_b tende a zero.

Un ulteriore parametro attraverso il quale si riesce ad incrementare il fattore di gage è la modifica della geometria del sensore. Nello specifico si analizza la forma ad H o "dog bone" come da figura:



Per capire come la forma influenzi la sensibilità si deve innanzitutto analizzare la resistenza data dalla particolare geometria:

$$R_g = 2R_w + R_t$$

La resistenza complessiva è data dalla somma delle resistenze delle due sezioni più ampie $2R_w$ e della sezione intermedia R_t .

Quando viene applicato un carico il sensore manifesta delle deformazioni diverse sulle tre parti le quali appaiono come collegate in serie. Esse sono soggette tutte allo stesso carico ma dato che la sezione centrale presenta una superficie minore risulta soggetta ad una maggiore deformazione.

Per quantificare le deformazioni subite dai tre elementi si ricorre alle formule:

$$\varepsilon_t = \frac{L_0}{2 \frac{w}{W} + l} * \varepsilon$$

$$\varepsilon_w = \frac{w}{W} * \varepsilon_t$$

Dove ε_t = deformazione della sezione centrale;
 ε_w = deformazione delle sezioni maggiori;
 L_0 = lunghezza totale del sensore.

Di conseguenza l'ammontare dell'incremento di sensibilità dato dalla componente geometrica risulta:

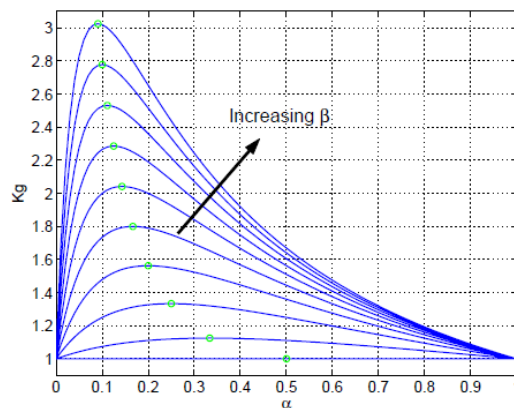
$$K_g = \frac{1 + (\beta^2 - 1) * \alpha}{[1 + (\beta - 1) * \alpha]^2}$$

Con

$$\alpha = \frac{l}{l+2L} = \frac{l}{L_0} \text{ e } \beta = \frac{W}{w}$$

Si dimostra come al fine di massimizzare il coefficiente K_g sia necessario ridurre il più possibile la sezione trasversale rendendola così maggiormente sollecitata. In questo modo però si va incontro a problematiche inerenti la fabbricazione oltre che a problemi legati al rumore termico limitandone così la miniaturizzazione. Oltretutto una minor sezione comporta un aumento della corrente che vi transita e quindi anche interferenza degli effetti termici sulla misurazione.

Per comprendere meglio il legame che sussiste tra il fattore geometrico K_g e la geometria stessa del sensore risulta utile analizzare l'andamento dei fattori α e β in relazione a K_g . Dal grafico si vede che ottenere un sensore in cui $L \gg l$ e $W \gg w$ porti ad un elevato valore di K_g e quindi ad un effettivo aumento della sensibilità totale.



Per tutti questi motivi si riesce quindi ad ottenere dei sensori piezoresistivi mems con pregevoli caratteristiche:

Caratteristiche	Valori medi
Sensibilità elevata	0.03 mV/ $\mu\epsilon$
Risoluzione elevata	1 $\mu\epsilon$
Intervallo di misura elevato	$\pm 4000\mu\epsilon$
Elevata stabilità in un ampio intervallo di temperatura	$\pm 50^\circ\text{C}$

Inoltre questo tipo di dispositivi permettono di avere il circuito di condizionamento integrato sullo stesso chip ove è collocato il sensore, sviluppato generalmente con tecnologia CMOS. Quest'ultimo aspetto ne determina inoltre il costo contenuto.

		Lunghezza [μm]	Larghezza [μm]	Altezza [μm]	GF	Risoluzione [$n\epsilon$]
Poli silicio	Standard	--	20	1	-4.5	130
	Dog bone	34	20	1	-14.1	70

Componenti di rumore

Per i sensori di tipo piezoresistivo bisogna considerare l'influenza che hanno i vari tipi di rumore rispetto le performance. Di fatti risulta che essi sono molto influenzati dai rumori termico e di Hooge i quali ne limitano fortemente la risoluzione poiché essa dipende dal rumore totale del sensore e dalla sua sensibilità. Si vuole quindi ora analizzare gli effetti che rumore termico e rumore di Hooge hanno sul dispositivo.

1) Rumore termico

Questo tipo di rumore definito anche come rumore di Johnson è un disturbo presente nella natura stessa di ogni resistore. Definito anche come rumore bianco, presenta una densità spettrale uniforme distribuita su tutto l'asse delle frequenze ed è per questo motivo che viene considerato il primo fattore che limita la risoluzione di uno strumento.

La sua potenza di densità spettrale risulta: $\text{psd} = KT$ con $K = 1.38 \cdot 10^{-23}$ [J/K] e T temperatura [K].

La tensione di rumore invece è determinata dalla formula:

$$V_n = \sqrt{KTRB_3}$$

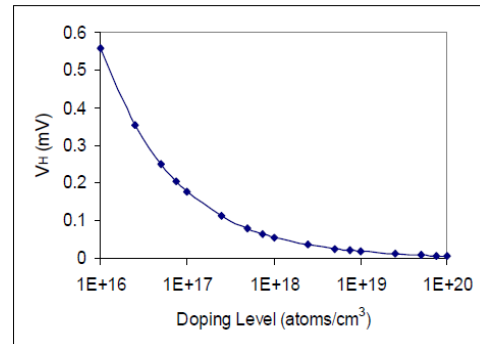
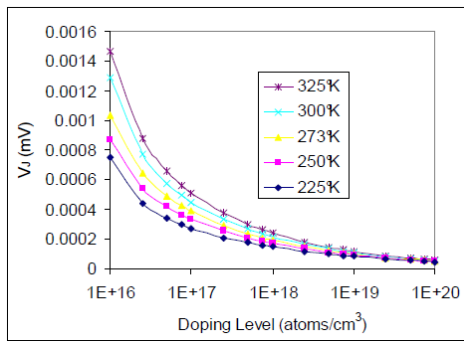
Dove R è la resistenza e B_3 la banda passante a 3dB del sensore.

2) Rumore di Hooge

Contrariamente al rumore termico questo tipo di rumore dipende dalla frequenza e risulta maggiormente influente alle basse frequenze essendo generato da fluttuazioni delle conduttanze. Inoltre la corrente che passa nel dispositivo presenta una densità spettrale di energia sempre per basse frequenze la quale, al loro aumentare tende a divergere.

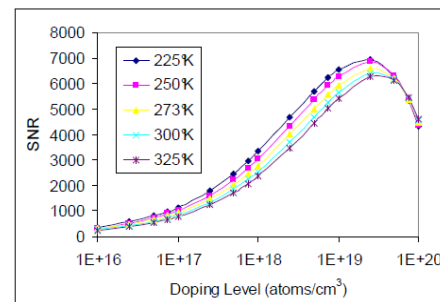
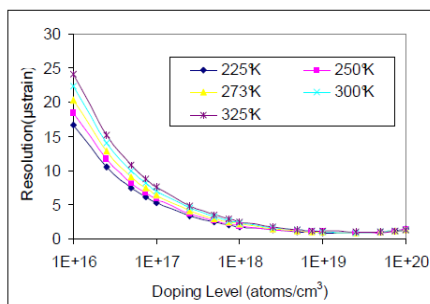
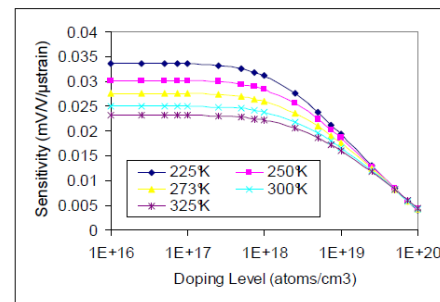
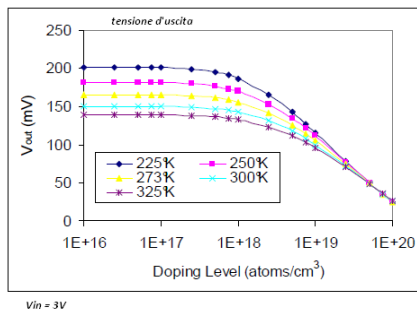
Le variazioni di questo tipo di rumore sono determinate, in maniera inversamente proporzionale dal numero totale di portatori di carica all'interno del piezoresistore. Di conseguenza il rumore di Hooge diminuisce per alti livelli di drogaggio e sezioni estese, mentre la sensibilità è favorita da bassi livelli di drogaggio e sezioni ridotte.

Nei grafici seguenti sono riportati gli andamenti del rumore termico e di Hooge in relazione ai livelli di drogaggio per determinati valori di temperatura:



In conclusione risulta evidente come la risoluzione del sensore, cioè il più piccolo incremento di deformazione rilevabile mediante una variazione apprezzabile della tensione di uscita, sia penalizzata dalle due componenti di rumore le quali vanno ad interferire con le deformazioni indotte dalle sollecitazioni esterne.

Qui di seguito sono riportati grafici relativi a tensione d'uscita, sensibilità, risoluzione e SNR in funzione del drogaggio per diverse temperature.



Si può quindi concludere che i sensori piezoresistivi sviluppati con tecnologia mems raggiungono elevati valori di sensibilità sia per misurazioni statiche che dinamiche. Lo studio di geometrie innovative quali la "dog bone" permettono un ulteriore incremento del fattore di gage. Si riscontrano però anche dei problemi dati dalla presenza di rumori ma che possono essere limitati o addirittura eliminati sviluppando i circuiti di condizionamento del segnale in forma integrata su microchip che in questo modo possono essere installati molto vicini al sensore. Un ulteriore problema riscontrato riguarda l'influenza della variazione di temperatura del dispositivo. Dato che si vogliono misurare deformazioni molto piccole, la corrente di circuito è costretta a circolare su sezioni molto ridotte risultando così abbastanza elevata. Di conseguenza si riscontrano fenomeni di deriva termica che sono la causa del rumore bianco presente nella misura.

In ogni caso queste tipologie di sensori stanno occupando un numero sempre maggiore di applicazioni data la loro notevole sensibilità ed il costo contenuto poiché sono sviluppati con tecnologie produttive già ben consolidate.

4 CONCLUSIONI

Partendo dalla necessità di misurare forze e coppie all'interno di meccanismi e macchine automatiche, l'industria dei sensori si è sviluppata in modo tale da soddisfare la sempre crescente necessità di dispositivi tecnologicamente più evoluti ed in grado di garantire prestazioni sempre maggiori.

Gli estensimetri resistivi si sono dimostrati degli ottimi dispositivi data la buona sensibilità, l'elevata durata della vita a fatica, la possibilità di essere utilizzati anche in ambienti sfavorevoli. Sono però risultati molto influenzati da temperatura e tensioni parassite. Per ovviare a questi problemi si sono sviluppate tecniche di installazione e cablaggio che hanno permesso di ampliare il loro campo applicativo. Un ulteriore aspetto molto importante di questo tipo di sensori riguarda la loro installazione, la quale richiede un procedimento specifico ed articolato. Inoltre la grande variabilità delle loro caratteristiche ne rende complessa la scelta poiché è necessario considerare molti parametri tra cui l'ambiente e le condizioni elettriche di lavoro.

In ultima analisi però si sono dimostrati un elemento molto versatile ed affidabile.

Gli estensimetri costituiscono poi la base per la realizzazione delle celle di carico le quali sono caratterizzate da specifiche geometrie al fine di ottimizzarne la qualità delle misurazioni.

Di fatti con riferimento alla teoria delle deformazioni si sono sviluppate una moltitudine di celle di carico ognuna con una precisa sagoma. Il motivo è che in questo modo si possono aumentare gli effetti delle tensioni desiderate ed attenuare quelli delle tensioni indesiderate.

Si è analizzato inoltre come si sviluppi la loro risposta dinamica poiché, essendo di natura semplice ma non immediatamente comprensibile, se non considerata con il dovuto peso può indurre in errori anche grossolani nel momento in cui si effettuano misurazioni dinamiche.

Per questo tipo di sensori si è poi focalizzata l'attenzione sul tipo di prodotti che si possono trovare in commercio. Dagli estratti da cataloghi si vede come esista un'ampia scelta di dispositivi con parametri molto differenti. Da un'analisi più attenta si arriva ad affermare come però le industrie stiano uniformando i propri prodotti verso fasce di parametri più definite. Il motivo principale deriva dall'ottimizzazione delle prestazioni per cui un numero minore di prodotti riesce a coprire una più ampia gamma di valori.

Il passo successivo è stato quello di addentrarsi nella categoria dei sensori innovativi, cioè quella parte di dispositivi che non hanno ancora una vasta applicazione in ambito industriale o che stanno iniziando ad essere diffusi solo negli ultimi tempi.

Si è focalizzata l'attenzione su tre categorie particolari: celle di carico al silicio, sensori in fibra ottica e dispositivi mems.

I primi sono dei sensori che presentano prestazioni e caratteristiche più sviluppate di quelle prodotte con altri materiali. Inoltre, con l'utilizzo del silicio si rende possibile una riduzione delle dimensioni con notevole vantaggio per applicazioni di fino quali in ambito medico e aereospaziale. La miniaturizzazione dei sensori, come si vede anche per i dispositivi mems, introduce molti problemi di tipo meccanico ed elettrico. Di fatti si devono considerare problemi quali la disomogeneità delle tensioni e la presenza di rumore bianco ed interferenze elettromagnetiche. Per le celle al silicio si è considerata anche una particolare applicazione che riguarda il loro impiego per la misurazione di carichi elevati.

Lo studio della tecnologia mems invece ha portato ad analizzare le specifiche inerenti a sensori le cui dimensioni sono dell'ordine dei micron, un campo in cui si ha una integrazione tra sensore, corpo di misura e circuiti di condizionamento molto spinti. I mems sono una di quelle tecnologie che assieme alle nano sta sempre più prendendo piede e la ricerca in tali ambiti avanza a pieno ritmo.

Come tecnologie innovative si sono esaminati anche i sensori in fibra ottica. Questi dispositivi basati sul principio di rifrazione della luce e sulla legge di Bragg hanno aperto la porta allo sviluppo del ramo della sensoristica senza contatto. Le loro applicazioni sono comunque ancora ai primordi dato l'elevato costo, ma il potenziale per un maggior impiego è sicuramente non indifferente.

BIBLIOGRAFIA

- Misure meccaniche e termiche, Emanuele Zappa, Politecnico di Milano;
- Estensimetri, Segnali e Rumori, Prof. Sergio Cova;
- Estensimetria, relazione a cura di prof. Bonusi Enrico;
- Laboratorio di misure SUPSI-DTI www.dti.supsi.ch ;
- Analisi sperimentale delle tensioni, Augusto Ajovalasit, Università di Palermo;
- Sensori e circuiti di condizionamento, prof. Boni, Università di Parma;
- Estensimetri metallici, prof Bettanini, Università di Padova;
- Sensori e trasduttori, prof Piero Malcovati, Università di Pavia;
- Sensori dinamici, Università di Firenze;
- Signal conditioning piezoelectric sensor, Karki James, National Instruments 2007;
- Ceramic piezoelectric and their applications, ing. Lionetto Francesca 2002;
- Materiali piezoelettrici, prof G. Marchesi, Università di Padova 2011;
- Fondamenti della misurazione, prof. V. Ferrari, LIUC Castellanza (VA) 2005;
- I trasduttori, Automazione navale, prof. G. Carrera, università di genova;
- Metodologie di valutazione dell'incertezza di misura, ing. Blandina De lorio, università di Napoli;
- Reverse Transducers Europe, Breda Olanda;
- Load cells and strain sensors for pressworking applications, Society of Manufacturing Engineers, Michigan;
- Weighing Group, The institute of Measurement and Control, Londra 2000;
- Guide for load cells, WELMEC 2001;
- First micromachined Silicon load cell for loads up to 1000Kg, MESA research institute, University of Twente;
- Smart load cells, University of Minho, Portogallo;
- Micromachined high capacity load cells, Robert Zwijze, MESA, university of Twente 2000;
- Investigation of new silicon load cells, IMEKO World Congress, Lisbona 2009;
- Measurement Specialties 2011, www.meas-spec.com;
- Mechanical reliability of optical fibre for strain sensors, University of Birmingham;
- Finite element stress and strain analysis in composites, Eaton Drew Geiger, Westland Aerospace Ltd;
- Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber sensors, publication on Journal of Engineering;
- Strain sensors based on Bragg grating, K. Haase, Hottinger Baldwin Messtechnik gmbh 2007;
- MemS Bragg grating sensor, Reck Thomsen Hansen, University of Denmark;
- Application of optical fibre sensors to measuring the mechanical properties of composites, Wroclaw University, Poland;
- Piezoresistive and piezoelectric memS strain sensors, Kon Oldham Horowitz, University of California 2007;
- High sensitivity memS strain sensors, University of Alberta, Canada 2008;
- Principles of memS, J. Bryzek, Fremont USA 2005;
- Force sensing and control in micromanipulation, Lu Chen Lin, to appear in IEEE smc part c;