Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali
Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica e Meccatronica

Caratterizzazione, scelta ed utilizzo di strain gauge per la misurazione di tensioni superficiali

Laureando:
Niccolò Conterno

Relatore:
Prof. Alessandro Sona

Anno accademico 2015/2016

INDICE

Introduzione 5

1. **Premesse** 7
1.1 *Cos'é un sensore* 7
1.2 *Accenno alla teoria elastica* 8

2. **Estensimetri** 11
2.1 *Principio di funzionamento degli estensimetri elettrici a resistenza* 13
2.2 *Il fattore di taratura* 14
2.2.1 *Effetto della temperatura sulla misurazione* 15
2.2.2 *Sensibilitá trasversale e longitudinale* 18
2.2.3 *Materiali comuni per la realizzazione delle resistenze e dei supporti degli estensimetri* 19
2.2.4 *Valori tipici delle resistenze* 20
2.3 *Forme, geometria e dimensioni* 21
2.4 *Come applicare l'estensimetro* 24
2.5 *Come scegliere l'estensimetro* 26
2.6 *Tecniche di realizzazione* 31

3. **Blocco di condizionamento** 33
3.1 *Il ponte di Wheatstone* 35
3.1.1 *Collegamento a quarto di ponte* 39
3.1.2 *Collegamento a mezzo ponte* 39
3.1.3 *Collegamento a ponte intero* 40
3.2 *Bilanciamento degli errori dovuti alle resistenze dei cavi* . . . 43
3.3 *Alimentazione del ponte* 45
3.4 *Test del ponte* 47
3.5 *Amplificazione del segnale* 48
3.5.1 *Amplificazione con amplificatore differenziale* 49
3.5.2 *Amplificazione con amplificatore per strumentazione* . . 50
3.6 *Filtri* 52
3.7 *Sistemi di trasferimento dei dati* 53

3.8 *Sistemi di acquisizione digitali* 54

Conclusioni 57

Elenco delle figure 59

Bibliografia 61

Ai miei genitori
e ai miei fratelli
per tutto il supporto
che mi hanno dato in questi anni.

INTRODUZIONE

Per esplorare e comprendere la realtá che lo circonda, l'uomo ha bisogno di quantificare le grandezze. Questa esigenza lo ha portato, sin dall'antichitá, ad introdurre una disciplina, che viene chiamata scienza delle misure, attraverso la quale puó introdurre grandezze e definire metodi per stimare tutti i parametri necessari per poter descrivere il mondo che lo circonda.

Oggigiorno una delle misure piú eseguite é la misura di deformazione. Questa permette lo studio del comportamento di materiali che vengono impiegati nelle strutture meccaniche o edili. Attraverso l'uso di un sensore, lo strian gauge o estensimetro, é possibile ottenere una misura: questo sensore ha svariati campi di utilizzo, dalle prove in laboratorio su componenti meccanici o materiali all'analisi statiche o dinamiche, al monitoraggio di componenti.

Quello che si vuole trasmettere in questo scritto é la comprensione e l'uso di uno dei sensori piú diffusi nel campo ingegneristico, ovvero gli strain gauge e come questi devono essere collegati alla catena di misura per ottenere un risultato accurato. Tra i vari tipi di strain guages esistenti in commercio, si vuole puntare l'attenzione su l'estensimetro a resistenza elettrica, inventato nel 1938 da Edward E. Simmons e Arthur C. Ruge, oggigiorno il piú usato per lo studio di componenti o sistemi meccanici. L'estensimetro é il primo blocco della catena di misura: il sensore puó essere definito come il tramite tra il mondo reale e la strumentazione. Sfruttando proprietá fisiche permette di ottenere in uscita la stima del valore reale che si desidererebbe conoscere.

Il risultato della misura é una stima del valore reale in quanto si instaurano nella catena di misura errori di vario genere che sommati tra loro possono modificare il risultato di molto, rendendo la misura poco affidabile. Per cercare di ridurre al minimo l'influenza degli errori si utilizzano sistemi di compensazione e di correzione: questi fanno parte del blocco di condizionamento del segnale che viene generato dal sensore.

Nella prima parte dello scritto si é voluto caratterizzare l'estensimetro a resistenza elettrica andando a descrivere il principio di funzionamento e le proprietá che permettono di scegliere lo strain gauge piú adatto. Tra i parametri che lo descrivono si vuole porre attenzione al fattore di taratura: infatti esso é affetto da possibili errori dovuti all'applicazione dell'estensimetro,

all'effetto della temperatura e all'effetto prodotto da cicli di carico.

La parte principale dell'elaborato é la seconda parte in quanto si pone l'attenzione sul blocco di condizionamento del segnale prodotto dallo strain gauge. Questo permette l'acquisizione del segnale elettrico che poi verrá convertito nel valore stimato della misura. Partendo dai cataloghi si é cercato di riassumere le caratteristiche principali per dare un quadro completo di questa parte, molto importante per la corretta stima del misurando, poiché esso é causa di introduzioni di notevoli errori. É molto importante scegliere o realizzare il blocco di condizionamento del segnale piú conformante alle esigenze della catena di misura, in base quindi al tipo di sensore e al suo output range e all'ADC e al suo input range, cosí da poter trasferire completamente il segnale da un range ad un altro. Questo blocco é utile anche per risolvere problemi che possono instaurarsi nella misura a causa dell'ambiente esterno o di altri eventi esterni, identificati come rumori. Il capitolo dedicato al blocco di condizionamento del segnale si occupa in particolare di come collegare lo strain gauge, dell'amplificazione del segnale e di come filtrare i rumori. Prima di arrivare alla conversione del segnale in stima del valore reale, ció che si desidera, é avere un segnale rafforzato e pulito da eventuali rumori di natura conosciuta, in modo da poter inviare ai successivi blocchi di elaborazione meno errori possibili.

A livello teorico si puó realizzare il modello ideale del blocco di condizionamento; a livello pratico, invece, non é pensabile creare ogni volta, che si vuole ottenere una misura dello stato di tensione di componenti, un blocco di condizionamento adatto per lo scopo. In commercio esistono centraline estensimetriche, ovvero blocchi di condizionamento, che possono essere tarate, dopo aver identificato i vari rumori che possono affliggere la misurazione, in modo da ridurre gli errori e quindi possono essere impiegate in piú ambiti. Nel caso in cui si vuole monitorare una struttura o dei componenti meccanici, durante l'esercizio, é possibile pensare di realizzare un blocco di condizionamento adeguato alle esigenze.

La capacitá di scelta é un parametro che caratterizza l'ingegnere, per cui é fondamentale tenere sempre presente che bisogna cercare di realizzare il sistema piú performante, in modo da poter ottenere informazioni piú precise e reali possibili tenendo sempre presente il lato economico. Per questo motivo questo elaborato vuole essere uno strumento utile per dare una panoramica ampia e dettagliata, per quanto possibile, sulle modalitá d'uso e scelta degli strain gauge.

1. PREMESSE

1.1 *Cos'é un sensore*

I sensori sono elementi fondamentali per un qualsiasi sistema di acquisizione dati perché sono gli strumenti con cui si pone in collegamento il mondo fisico con il mondo dell'elaborazione dati.
Il sensore puó essere visto tramite una funzione di trasferimento, detta transcaratteristica, che collega una certa grandezza qualsiasi in ingresso X con una variabile in uscita Y espressa tramite un segnale elettrico [1]. Attraverso questa funzione si puó caratterizzare il sensore definendo alcune proprietá fondamentali. Tra i parametri che caratterizzano un sensore troviamo:

- *Input e Output Range*, definiscono il range di ingresso e uscita entro cui il sensore puó lavorare.

- *Accuratezza*, é un parametro che si esprime tramite l'incertezza di misura. Non é mai possibile dare un valore esatto del misurando ma si indica un intervallo di valori in cui c'é, con una certa probabilitá, il valore esatto. Il risultato in uscita dal sistema di acquisizione si esprime nel seguente modo $X = X_m + U_x$ dove con U_x si indica l'incertezza di misura: quindi minore é l'incertezza maggiore sará l'accuratezza.

- *Risoluzione*, viene intesa come il piú piccolo incremento della variabile d'ingresso al quale é associata una variazione della variabile d'uscita.

- *Precisione*, o ripetibilitá, é la capacitá del sensore di fornire in uscita valori il piú possibilmente vicini tra loro.

- *Sensibilitá* é un parametro definito come il rapporto tra la variazione della risposta ΔY del sensore e la corrispondente variazione ΔX del segnale di ingresso: puó essere vista come il guadagno del sensore o la pendenza della transcaratteristica.

[1] Il *trasduttore* é un dispositivo che effettua una trasformazione da una forma di energia ad un'altra. Il *sensore* é particolare trasduttore che fornisce in uscita un segnale elettrico non necessariamente legato alla sua energia

Ci sono altri paramentri con cui si caratterizzano i sensori, tra cui la robustezza, la stabilitá, il tempo di risposta; tutti questi parametri servono per poter scegliere, a seconda dell'applicazione, il migliore sensore possibile tenendo presente l'intera catena di misura. Infatti non possiamo scegliere il migliore sensore esistente in commercio quando la parte dell'elaborazione é scarsa. Si dovrá quindi "giocare" con i parametri in modo da ottenere un giusto compromesso. Gli estensimetri sono particolari sensori che permettono la misurazione dello stato tensionale in un punto di una struttura sollecitata.

1.2 Accenno alla teoria elastica

Ogni componente sollecitato da un sistema di forze si puó descrivere attraverso lo stato tensionale di ogni punto del componente. Lo stato di tensione si puó esprimere attraverso tensioni normali σ e deformazioni τ. Il caso piú semplice da descrivere é quello di tensione monoassiale. Considerando un parallelepipedo di materiale duttile, dove con L_0 indichiamo la lunghezza e con $S = B * H$ la sezione di base B e altezza H. Sottoponendo il pezzo ad una forza F di trazione si ha che l'allungamento é dato da:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \tag{1.1}$$

dove ϵ é l'allungamento, σ é lo sforzo normale alla sezione ed **E** é il modulo di Young, detta anche costante elastica del materiale. La relazione appena descritta ha il nome di legge di Hooke. Il valore di ϵ Epsilon é di tipo percentuale perché viene definito:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \tag{1.2}$$

dove ΔL esprime di quanto si allunga o si comprime il parallelepipedo, mentre L_0 é la lunghezza iniziale del componente inizialmente non sottoposto a carico.

Gli estensimetri sfruttano la deformabilitá dei materiali, con cui sono realizzate le resistenze, per ricavare lo stato di tensione locale del corpo sollecitato. In generale lo stato di tensione in un punto si puó esprimere attraverso delle componenti di tensioni normali σ e tangenziali τ. In ogni punto, considerando un sistema di riferimento generico (x,y,z), si hanno nove componenti tensionali, come si puó vedere in figura . Attraverso la teoria dei cerchi di Mohr si puó semplificare la descrizione dello stato di tensione attraverso l'uso del sistema di riferimento principale.

Dato un sistema generico di forze é possibile tracciare su un piano (σ;τ)

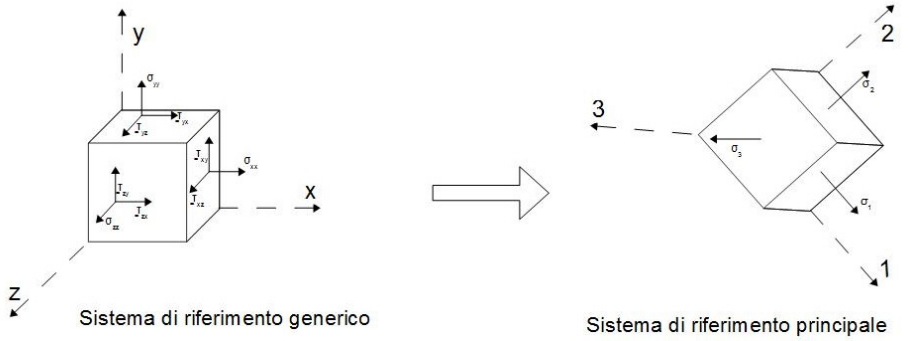


Fig. 1.1: Sistemi di riferimento

lo stato di tensione di un punto del componente. Lo stato di tensione é quindi identificabile con delle coordinate sul piano. Come si puó vedere dall'immagine ruotando il sistema di riferimento si puó ottenere un punto in cui le coordinate hanno componente τ pari a zero.

Nel piano di Mohr gli angoli di rotazione, per ottenere il piano di riferimento principale, vengono raddoppiati: infatti, per definizione del piano, si pongono sull'asse delle x le tensioni normali alla superficie, mentre sull'asse delle y le tensioni tangenziali. Dopo aver tracciato il cerchio corrispondente allo stato di tensione, si puó ottenere l'angolo di rotazione dividendo per due l'angolo compreso tra l'asse delle x e il segmento che collega il centro del cerchio con il punto di coordinate $(\sigma_{x,y,z};\tau_{x,y,z})$.
Generalizzando l'equazione di Hooke si ottengono, per un sistema tridimensionale, le equazioni di Lamé:

$$\begin{aligned}
\epsilon_1 &= \frac{1}{E}(\sigma_1 - \nu\sigma_2 - \nu\sigma_3) \\
\epsilon_2 &= \frac{1}{E}(\sigma_2 - \nu\sigma_1 - \nu\sigma_3) \\
\epsilon_3 &= \frac{1}{E}(\sigma_3 - \nu\sigma_1 - \nu\sigma_2)
\end{aligned} \tag{1.3}$$

Queste equazioni sono riferite al sistema di riferimento principale (1,2,3). Dalle equazioni possiamo notare che le deformazioni del componente sono direttamente proporzionali alle tensioni agenti su un punto del componente. Se si conoscono le direzioni delle sollecitazioni esterne basta disporre gli estensimetri lungo tali direzioni. Nel caso non si conoscano le direzioni, conviene disporre tre estensimetri cosí é possibile ricondursi alle tensioni principali con dei passaggi algebrici oppure impostando il software di elaborazione dati.

2. ESTENSIMETRI

Gli estensimetri, o Straingauges, sono dei sensori che permettono la valutazione della deformazione superficiale di un certo componente meccanico sottoposto ad uno stato sollecitazione dovuto a forze esterne. Nascono dalla necessitá di conoscere lo stato di tensione di un determinato punto di una parte meccanica, senza portare a rottura il componente. L'uso di questi sensori é molto vario, ad esempio, si impiegano per conoscere i carichi su una determinata struttura, per verificare deformazioni strutturali, per effettuare collaudi. Esistono vari tipi di estensimetri, le categorie principali sono:

- *elettrici a resistenza*, é la classe piú comune e possono essere fatti con filo metallico oppure fotoincisi. Verranno approfonditi nell'elaborato.

- *semiconduttore* Sono costituiti di silicio opportunamente drogato. Il vantaggio di questo tipo di sensore sta nella sensibilitá molto piú elevata rispetto agli estensimetri metallici e quindi forniscono un segnale molto piú forte a paritá di superficie utile. Lo svantaggio dell'uso del semiconduttore sta nell'elevata sensibilitá alla variazione di temperatura ambientale. Risultano inoltre di difficile manipolazione a causa della loro piccola dimensione, infatti le dimensioni tipiche sono $0,5mm^2$.

- *capacitivi*
  Questo tipo di sensore sfrutta la legge di Farad [1] per un condensatore piano, si ha che la carica C é:$C = \epsilon * S/d$, dove S é la superficie del condensatore e d la distanza tra le due piastre. Al variare della distanza d, varia la capacitá e quindi la tensione ai capi del condensatore da cui é possibile rilevare una misura. Vengono impiegati nella misurazione di deformazioni di componenti che lavorano a temperature elevate. I vantaggi sono l'elevata sensibilitá. Gli svantaggi sono le non linearitá e le dipendenze dalla temperatura, poiché la resistivitá dipende fortemente dalla temperatura.

- *piezoelettrici*
  Questi sensori sfruttano la caratteristiche del materiale: i cristalli sono

[1] Si ricorda che la legge di Farad é: $C = Q/\Delta V$

di natura sintetica e la loro configurazione originale non gode di alcuna proprietá piezoelettrica. Questo é dovuto alla simmetria della disposizione atomica della struttura cristallina per cui in assenza di sollecitazioni non presenta alcuna polaritá di carica elettrica. Quando vengono inseriti in un campo elettrico o vengono colpiti da una sollecitazione meccanica, la struttura interna si modifica causando uno squilibrio nelle cariche e quindi da' luogo alla formazione di un dipolo elettrico. Sfruttando questa particolaritá é possibile rilevare il segnale di tensione e quindi ottenere una misura.

- *fotoelastici*
  La fotoelasticitá é una tecnica di visualizzazione del campo di deformazioni di una struttura: essa consente di individuare le zone di maggiore concentrazione e quindi di rilevare i problemi di plasticizzazione, fatica o rottura. Il principio di misura si basa sul fatto che, quando si osserva un materiale trasparente fotoelastico deformato tramite una luce polarizzata, appaiono delle frange colorate. Esse consentono di stabilire l'entitá, la direzione e la distribuzione delle deformazioni principali. Il metodo piú diffuso e di maggior interesse per l'ingegnere consiste nel rivestire con uno strato di materiale fotoelastico i pezzi meccanici in esame. Questa tecnica, brevettata con il nome PhotoStress, offre il vantaggio di visualizzare le deformazioni direttamente sul pezzo reale con carichi reali.

A seconda di dove deve essere posizionato o dell'ambiente in cui il componente lavora, si dovrá scegliere il sensore piú adatto, cosí da poter ottenere la stima migliore possibile[2]. Per poter misurare lo stato di tensione, o per essere piú precisi, ottenere la miglior stima, deve essere possibile ripetere la misurazione, senza che il sensore perda o modifichi le sue caratteristiche. Quindi devono avere alcuni parametri fondamentali:

- *sensibilitá*
- *stabilitá* al variare di tempo, temperatura o altri fattori ambientali
- deve avere *dimensioni ridotte* per poter permettere di valutare localmente lo stato di tensione
- *banda passante ampia* per poter permettere misurazioni dinamiche [3].

[2] Nei prossimi paragrafi verrá illustrato come poter scegliere il tipo piú adatto prendendo in considerazione varie condizioni

[3] MISURE DINAMICHE E MISURE STATICHE Per misurare una forza dobbiamo

2.1 *Principio di funzionamento degli estensimetri elettrici a resistenza*

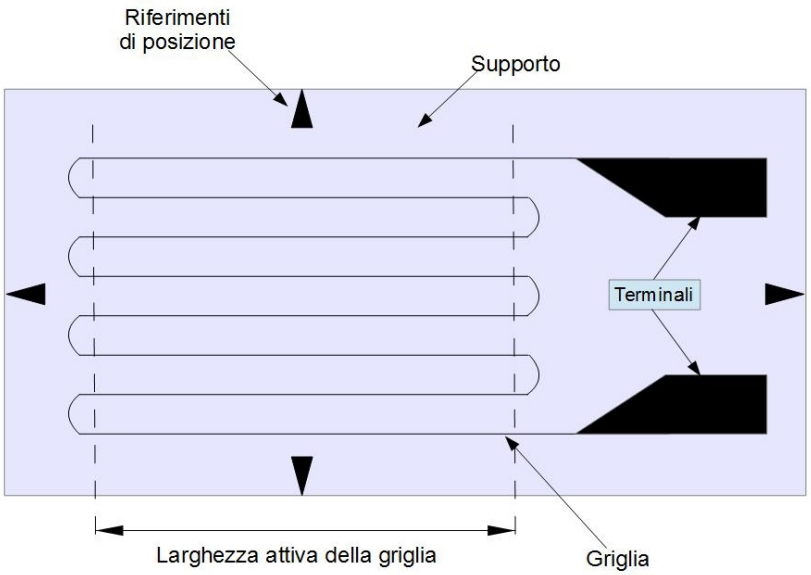


Fig. 2.1: Estensimetro elettrico

Gli estensimetri elettrici a resistenza consistono in una griglia di metallo laminato che viene incollata. L'eventuale comprensione o allungamento di un componente meccanico viene valutata tramite la variazione di forma dell'estensimetro, che produce una variazione della resistenza elettrica.

La resistenza R di un conduttore filiforme si definisce:

$$R = \frac{\rho * l}{A} \tag{2.1}$$

dove ρ é la resistivitá del materiale, l la lunghezza della resistenza e A é l'area della sezione trasversale. Dalla formula si ricava che al variare della geometria della resistenza il suo valore cambierá. Differenziando e dividendo la 1.3 si ottiene:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A} \tag{2.2}$$

basarci sull'effetto che essa produce sul corpo cui é applicata. Una forza, a seconda del corpo a cui é applicata, puó deformare o fargli cambiare velocitá. Si parla di misura dinamica quando bisogna misurare una forza che applicata ad un corpo libero, gli fa cambiare velocitá. Si parla di misura statica quando bisogna misurare una forza che applicata ad un corpo vincolato, lo deforma.

Dall'equazione alle differenze si ha che:

$$\frac{\Delta l}{l} = \epsilon_l \tag{2.3}$$

$$\frac{\Delta A}{A} = 2\epsilon_t \tag{2.4}$$

dove con ϵ_t si indica la deformazione trasversale, mentre con ϵ_l quella longitudinale. Per ipotesi consideriamo il materiale isotropo in tutte le direzioni e se il conduttore é sollecitato longitudinalmente tramite forza normale alla sezione si ha che:

$$\epsilon_t = -\nu * \epsilon_l \tag{2.5}$$

Possiamo quindi sostituire nella 1.4 le equazioni 1.5,1.6,1.7 cosí si puó riportare la deformazione volumetrica della resistenza alla deformazione longitudinale, cosí si ottiene:

$$\Delta R = [\frac{\Delta \rho}{\rho} + (1 + 2\nu) * \epsilon_l] * R \tag{2.6}$$

Dall'ultima equazione si puó notare che la variazione di resistenza dipende da due fattori, la variazione di resistivitá e di forma. Applicando l'estensimetro sulla superficie si avrá, dunque, che la sollecitazione locale del materiale produrrá una variazione di forma della resistenza. Qui si pone un problema di realizzazione della resistenza. La variazione di resistivitá é legata alla temperatura poiché

$$\rho = \rho_0 * [1 + \alpha * (T - T_0)] \tag{2.7}$$

quindi si deve avere la minima variazione di temperatura e per le resistenze é legata alla potenza dissipata per effetto Joule, per cui si dovranno avere valori elevati di R, cosí da ottenere bassi valori di correnti quando verrá alimentato l'estensimetro. Altro problema é la valutazione dello stato tensionale locale: devo avere estensimetri in grado di coprire la minor superficie possibile, sopratutto se si hanno gradienti tensionali elevati.

2.2 *Il fattore di taratura*

Il fattore principale per gli estensimetri é il fattore di taratura, in inglese detto *Gage factor* G. Questo parametro indica la *sensibilitá* dell'estensimetro. Il fattore G viene definito:

$$G = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}} = \frac{\Delta R}{R} * \frac{1}{\epsilon} = \frac{\Delta \rho}{\rho \epsilon} + (1 + 2\nu) \tag{2.8}$$

come la variazione di resistenza sul suo valore iniziale rapportato alla deformazione. Valori tipici della sensibilitá per estensimetri metallici é $G = 2$, con tolleranze dell'1%,2%. I valori del fattore di taratura G varia a seconda del materiale:

- il range per materiali tipici é $G = 1,8 - 2,2$
- per leghe Nichel-Rame, o Nichel-Cromo si ha $G = 2 - 3,5$ (leghe Ni-Cu e Ni-Fe-Cr)

2.2.1 *Effetto della temperatura sulla misurazione*

Una variazione di temperatura, nell'esecuzione di una misurazione rispetto a quella di riferimento a cui si é applicato l'estensimetro e per la quale é stato determinato il fattore G, introduce degli errori in quanto influisce sia sulla relazione che lega la variazione di resistivitá relativa $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ alla deformazione ϵ, e di conseguenza al valore nominale di G, che sul valore della resistenza stessa del conduttore che costituisce la griglia estensimetrica. Quando si effettua una misurazione di deformazione si deve tener conto dei seguenti fattori:

- valore della temperatura a cui si effettua la misura
- variazione della temperatura durante la misurazione

Inoltre, per elevate temperature, é importante conoscere:

- quanto tempo puó resistere l'incollaggio e quali sono i possibili effetti sulla bontá della misurazione
- quando intervengono processi di conversione della lega che forma la griglia di misurazione dell'estensimetro
- come si comporta il cablaggio

La temperatura influenza non solo l'estensimetro in sé, ma anche tutta la catena di rilevazione. Gli errori introdotti possono essere limitati dall'uso di sistemi auto-compensanti e/o di strain gauges auto-compensati. Le variazioni di resistenza per deformazioni sono date da:

$$\frac{\Delta R}{R} = G\epsilon_l \tag{2.9}$$

con G tipicamente uguale a 2. Quindi un ΔT di $1°C$ ha un effetto sulla misura equivalente a una deformazione di circa 2000 microstrain[4].

[4] Il Microstrain $\mu\epsilon$, detto anche microepsilon, é l'unitá di misura usata per indicare la deformazione,

- *Influenza sul fattore di taratura G dell'estensimetro*
  Il primo fenomeno viene normalmente corretto mediante il coefficiente di temperatura β_k che permette di calcolare il fattore di taratura G_T dell'estensimetro alla temperatura T a cui viene eseguita la prova. Se questa temperatura si discosta del valore ΔT dalla temperatura alla quale era stato definito G il valore di G_T e dato da:
  $$G_T = G(1 + \beta_K \Delta T) \tag{2.10}$$

- *Variazione di resistivitá della griglia estensimetrica*
  Il secondo fenomeno, cioé quello che considera la variazione di resistenza relativa $\frac{\Delta R}{R}$ alla griglia estensimetrica con la temperatura viene corretto utilizzando il coefficiente di temperatura del materiale della griglia α:
  $$(\frac{\Delta R}{R})_{\Delta T} = \alpha \Delta T \tag{2.11}$$

- *Dilatazione termica differenziale estensimetro-materiale*
  Inoltre la temperatura produce una diversa dilatazione termica tra il materiale in analisi e il materiale dell'estensimetro generando una deformazione apparente. Un aumento di temperatura provoca una deformazione del materiale pari ad $\xi_m \Delta T$. Se l'estensimetro fosse libero si dilaterebbe di $\xi_e \Delta T$, ma poiché é solidale alla struttura (molto piú rigida) dovrá subirne la stessa dilatazione. Si avrá dunque una deformazione termica differenziale che modifica l'estensimetro di una quantitá pari a:
  $$\epsilon_\xi = (\xi_m - \xi e)\Delta T \tag{2.12}$$

Considerando le correzioni dei tre effetti definiti nelle equazioni 2.10 2.11 2.12 si avrá che l'equazione 2.9 diviene:

$$\frac{\Delta R}{R} = G_T \epsilon_l + G_T(\xi_m - \xi e)\Delta T + \alpha \Delta T \tag{2.13}$$

Dalla precedente equazione possiamo quindi ricavare la deformazione ϵ_l effettiva dovuta alla temperatura oltre che ai carichi esterni applicati all'oggetto di cui si vuole conoscere lo stato di tensione in un determinato punto. Per cui si otterrá:

$$\epsilon_l = \frac{\Delta R}{R G_T} - \frac{[G_T(\xi_m - \xi e) + \alpha]\Delta T}{G_T} \tag{2.14}$$

Moltiplicando e dividendo per G e sommando e sottraendo, all'interno della parentesi quadra, $G(\xi_m - \xi e)$, l'equazione precedente diverrá:

$$\epsilon_l = \frac{\Delta R}{RG}\frac{G}{G_T} - \frac{[G(\xi_m - \xi e) + \alpha]\Delta T}{G}\frac{G}{G_T} + \frac{(G - G_T)(\xi_m - \xi e)\Delta T}{G}\frac{G}{G_T} \tag{2.15}$$

L'ultima frazione é trascurabile rispetto alle precedenti per cui si puó approssimare:

$$\epsilon_l = (\epsilon_f + \epsilon_{\Delta T})\frac{G}{G_T} \tag{2.16}$$

$$\epsilon_f = \frac{\Delta R}{RG} \tag{2.17}$$

$$\epsilon_{\Delta T} = -\frac{[G(\xi_m - \xi e) + \alpha]\Delta T}{G} \tag{2.18}$$

dove ϵ_f é la deformazione misurata senza considerare l'effetto di ΔT, $\epsilon_{\Delta T}$ é la deformazione indotta da ΔT e ϵ_l é la deformazione reale in direzione longitudinale.

Materiale	α Coefficiente di espansione termico
Acciaio ferritico	$10,8 * 10^{-6}$
Acciaio austenitico	$16 * 10^{-6}$
Titanio	$9 * 10^{-6}$
Materiali plastici	$65 * 10^{-6}$
Molibdeno	$5.4 * 10^{-6}$
Alluminio	$23 * 10^{-6}$
Constantana	$15 * 10^{-6}$
Isoelastica	$17,5 * 10^{-6}$
Manganina	$15 * 10^{-6}$
Karma	$20 * 10^{-6}$

Per non incorrere nei problemi suddetti é buona norma adottare una griglia di materiale poco sensibile alla temperatura (avente α e β_K molto bassi) e con coefficiente di dilatazione il piú possibile simile a quello del pezzo in esame. Si puó notare che utilizzando come materiale sensibile dell'estensimetro la costantana anziché un materiale comunemente usato per i conduttori elettrici, la dipendenza dalla temperatura della misura risulta notevolmente diminuita; infatti questa lega ha un coefficiente di variazione della resistivitá 160 volte piú piccolo. Risultati ancora migliori si possono ottenere utilizzando manganina[5] la quale ha un coefficiente di variazione della resistivitá α pari a $0.00001/°C$ ovvero 400 volte inferiore a quello dei comuni materiali utilizzati come conduttori.

[5] lega di rame, manganese e nichel

2.2.2 *Sensibilitá trasversale e longitudinale*

In realtá l'estensimetro risulta parzialmente sensibile anche alle deformazioni secondo la direzione trasversale, a causa della presenza dei gomiti della serpentina. Per ridimensionare il problema e ridurre la sensibilitá trasversale si costruiscono estensimetri con i raccordi a sezione maggiore. Un estensimetro si trova generalmente in uno stato di tensione piano biassiale. Si pone perció il problema di valutare l'errore che si commette utilizzando il valore di G determinato per uno stato di tensione monoassiale. Considerando lo stato di tensione biassiale e definendo ϵ_l la deformazione longitudinale e ϵ_t la deformazione trasversale, la relazione che lega la variazione di resistenza relativa $\Delta R/R$ dell'estensimetro alla deformazione diviene:

$$\frac{\Delta R}{R} = G_l\epsilon_l + G_t\epsilon_t \tag{2.19}$$

dove con:

* G_l é il fattore di taratura longitudinale dato dal rapporto tra la variazione relativa di resistenza e la corrispondente deformazione longitudinale monoassiale ϵ_l (con $\epsilon_t = 0$);

* G_t é il fattore di taratura trasversale dato dal rapporto tra la variazione di resistenza relativa e la corrispondente deformazione trasversale monoassiale ϵ_t (con $\epsilon_l = 0$).

Si definisce quindi la sensibilitá trasversale, e la indichiamo con S_t il rapporto tra il fattore di taratura longitudinale e trasversale:

$$S_t = \frac{G_t}{G_l} \tag{2.20}$$

Sostituendo l'equazione 2.20 nell'equazione 2.19 si ottiene:

$$\frac{\Delta R}{R} = G_l\epsilon_l(1 + S_t\frac{\epsilon_t}{\epsilon_l}) = G_l\epsilon_l(1 - \nu S_t) \tag{2.21}$$

dove si ha che $\nu = -\epsilon_t/\epsilon_l$ ed é il coefficiente di Poisson del materiale con cui é realizzato l'estensimetro. Quindi si ha che il fattore di taratura é:

$$G = \frac{\Delta R/R}{\epsilon_l} = G_l(1 - \nu S_t) \tag{2.22}$$

Il fattore di taratura indicato tiene conto della sensibilitá trasversale dell'estensimetro realizzato con resistenze a serpentina incollate su un supporto polimerico. Oggigiorno si usano altre tecniche le quali permettono agevolmente la realizzazione di raccordi a sezione maggiore per ridurre la sensibilitá trasversale.[6]

[6] per altre informazioni si guardi il paragrafo 2.6

2.2.3 *Materiali comuni per la realizzazione delle resistenze e dei supporti degli estensimetri*

1. *Costantana* [7] *auto-compensata* [8] *in temperatura:* é la piú anziana ma ancora la piú usata in virtú della sua buona sensibilitá alla deformazione. Ha una elevata resistivitá (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 capacitá di allungamento. Difetti: Per temperature superiori a $65°C$ si ha una variazione permanente della resistenza ad ogni ciclo. Pregi: puó essere trattata per l'autocompensazione termica.

2. *Costantana trattata:* utilizzata per misurare deformazioni superiori al 5%; é duttile in griglie di 3mm puó essere allungata del 20% o piú. 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.

3. *Lega 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 é lineare.

4. *Lega Karma*[9]: ha una buona vita a fatica e un'eccellente stabilitá. É usata in misure statiche con un range di temperature da $-260°C$ a $260°C$ circa. Se incapsulata in materiale inerte puó essere utilizzata fino a $400°C$. Ha una curva termica piú piatta quindi le correzioni di uscita termica sono piú precise. Offre l'autocompensazione termica.

[7] Lega metallica di Nichel e Rame

[8] Per lega auto-compensata si intende una lega il cui coefficiente termoelastico varia poco o nulla con il variare delle temperature piú usuali

[9] Lega metallica di Nichel e Cromo, con piccole percentuali di Ferro e Alluminio

Materiale	*Composizione*	*Fattore di taratura*	*Resistivitá [Ohm/mil-ft]*	*Temperatura max [F]*
Constantana	45%Ni, 55%Cu	2.0	290	900
Isoelastica	36% Ni, 8% Cr, 0,5%Mo, 55,5%Fe	3.5	680	800
Manganina	84% Cu, 12%Mn, 4% Ni	0.5	260	
Karma	74%Ni, 20%Cr, 3%Al, 3%Fe	2.4	800	1500

Il supporto é quel componente dell'estensimetro sul quale é 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.

Materiale del supporto	ΔT *(C)*	*Note*
Resina poliammidica	-200 ; +200	Di uso generale
Resina epossidica con fibra di vetro	-270 ; 230	
Resina fenolica con fibra di vetro	-200 ; +300	Per trasduttori e per prove di lunga durata
Resina poliammidica con fibra di vetro	-200 ; +330	
Cemento ceramico	-200 ; +750	Per alte temperature
Piastrina di acciaio		ΔT dipende dal supporto primario

2.2.4 Valori tipici delle resistenze

Gli strain gauges normalmente impiegati hanno una resistenza di 120 o 350 ohm. Per la maggioranza delle applicazione si usa 120 ohm; quelli a 350 ohm sono preferibili per ridurre la generazione di calore, diminuire l'effetto dei cavi o migliorare il rapporto segnale-rumore, ma sono piú costosi. Per

uso su compositi sono disponibili estensimetri con resistenze piú elevate, fino a 5000 ohm.

2.3 *Forme, geometria e dimensioni*

A seconda dello stato di sollecitazione da misurare e dal punto di applicazione, i costruttori di estensimetri si sono sbizzarriti in forme, geometrie e dimensioni, per poter risolvere i differenti problemi applicativi. Si definisce *lunghezza attiva di griglia*, o *Active grid length*, la lunghezza attiva o sensibile della griglia (in figura 2.2). Tipicamente la resistenza é piú piccola della base polimerica e in fase applicativa si deve tener presente che:

- l'estensimetro é sensibile solo nella zona coperta dalla griglia; peró per una misura soddisfacente é necessario incollare bene tutta la base plastica
- in caso di piú strain gauges vicini, che non si sovrapponga con quella di altri sensori.

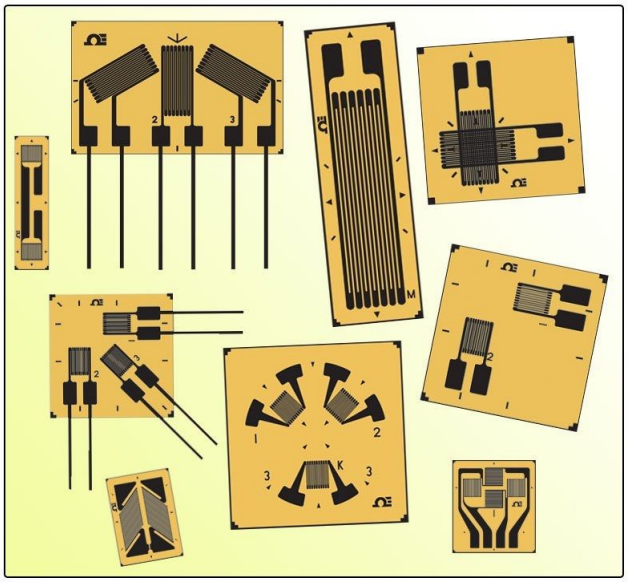


Fig. 2.2: Vari tipi di strain gauges

La scelta dell'estensimetro, per forma, geometria e dimensioni va fatta considerando alcune condizioni.

* *Campo di deformazione*
  La condizione di deformazione omogenea, oltre che dalla grandezza dell'oggetto rispetto al sensore, dipende anche dal materiale, in particolare dalla risposta della struttura interna all'applicazione di forze esterne. I materiali, come agglomerati cementizi, legno, materiali plastici rinforzati, compositi, ecc., possono presentare campi non omogenei poiché il materiale non presenta un'isotropia elastica, come ad esempio nei materiali metallici

  - *Campo di deformazione omogeneo*
    Possiamo considerare omogenea la deformazione se l'oggetto, per un materiale isotropo in tutte le direzioni, é sufficientemente grande rispetto all'estensimetro. Con sufficientemente grande si intende la superficie considerata puntuale che il sensore coprirá.
  - *Campo di deformazione non omogeneo*
    Nel caso in cui il materiale non sia isotropo, si possono applicare estensimetri con elevata lunghezza di griglia, e cosí si otterrá la media delle condizioni di deformazioni lungo lo sviluppo longitudinale dell'estensimetro. Nel caso in cui la non uniformitá sia legata ad un gradiente locale di tensione é necessario utilizzare estensimetri con dimensioni ridotte, oppure catene di estensimetri. Questo per poter stimare l'effettivo valore della deformazione. In questo punto possiamo inserire la scelta di estensimetri per *condizioni di carico dinamiche*: bisogna porre particolare attenzione alla lunghezza di griglia per deformazioni impulsive o ad alta frequenza, perché possono modificare in maniera irreversibile i parametri iniziali della resistenza.

* *Estensimetri multipli e catene di estensimetri*
  Con *estensimetri multipli* si intende un sistema di griglie fissate su un supporto comune. Forme tipiche sono estensimetri doppi, catene e rosette. I vantaggi sono due:

  1. sono piú veloci da posizionare rispetto a estensimetri disposti secondo certi criteri
  2. assicurano una elevata accuratezza tra l'orientamento e la distanza tra le griglie

  Le *rosette* possono essere disposte a stella o a croce. A seconda se le tensioni biassiali sono note o non, si possono usare vari tipi di rosette:

- se le *direzioni sono note* si usano le rosette X, a croce: sono due estensimetri disposti con gli assi a 90°;
- se le *direzioni non sono note* si usano le rosette R: gli estensimetri sono disposti con gli assi a $0^o/45^o/90^o$, dette *rosette ad angolo destro*, o con gli assi a $0^o/60^o/120^o$, dette *rosette a delta*.

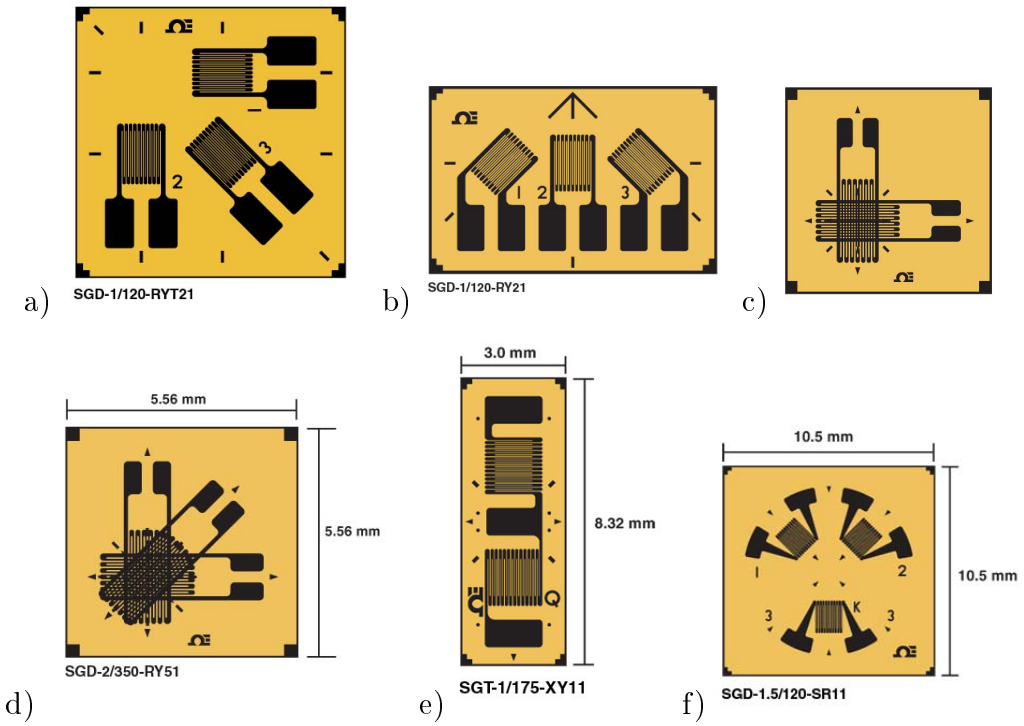


Fig. 2.3: Le figure mostrano vari tipi di estensimetri: la figura a) mostra una rosetta disposta a 45 gradi, la figura b) mostra una rosetta a 60 gradi, c) mostra una coppia sovrapposta di estensimetri, d) mostra una rosetta sovrapposta a 45 gradi, e) mostrano due estensimetri a 90 gradi, f) é una rosetta delta

Alcuni tipi di rosette presentano griglie sovrapposte: comportano un vantaggio poiché la misura viene eseguita sulla stessa posizione. Peró la sovrapposizione provoca anche degli svantaggi: la distanza del secondo estensimetro dalla superficie é maggiore e quindi le tensioni che andranno a deformare la griglia non sono quelle effettive. Un altro svantaggio é legato alla rigidit'a che le rosette sottostanti creano nel punto di applicazione, alterandone le tensioni.

Le *catene di estensimetri* vengono realizzate attraverso una combinazione di griglie e si ripetono a distanza regolare; esse possono essere

uguali o diverse. L'uso di questo sistema permette di determinare:

1. il punto di massima tensione, se non é individuabile con certezza a priori
2. il gradiente delle tensioni in una determinata zona
3. la posizione del valore di picco di tensione al variare della posizione del punto di applicazione del carico

2.4 *Come applicare l'estensimetro*

L'incollaggio di un estensimetro é un aspetto che riveste una notevole importanza. Dalla riuscita dell'incollaggio dipende la qualitá della misura che otterremo; infatti bisogna pensare che affinché l'estensimetro segua correttamente la deformazione del pezzo questo deve essere incollato in modo da poter subire la medesima deformazione. É intuitivo che un incollaggio non ottimale comporterebbe una misura priva di significato. Va da sé che la colla utilizzata non deve essere troppo poca poiché non ci sarebbe un'adeguata adesione tra estensimetro e pezzo, ma neppure eccessiva, in quanto finirebbe per creare uno strato elastico impedendo all'estensimetro di deformarsi come il pezzo provocando problemi di variazione apparente di G, di isteresi e di deriva; inoltre aumenterebbe la difficoltá da parte della griglia sensibile di dissipare il calore prodotto. In aggiunta l'estensimetro deve essere sí ben incollato al pezzo, ma deve sussistere anche un perfetto isolamento elettrico tra griglia e la superficie su cui é incollato. Esiste una procedura ormai ben collaudata di incollaggio degli estensimetri. Tale procedura non include solo la fase vera e propria dell'incollaggio ma anche tutta la preparazione della superficie.

1. *Preparazione della superficie*
   La pulizia della superficie attraverso un'operazione meccanica che puó avvenire con il carteggio usando carta al carburo di silicio o sabbiatura con grane opportune (tipicamente 400). Questa fase non deve portare alla lucidatura della superficie; é bene che permanga una certa rugositá superficiale la quale aumenta l'azione della colla. Successivamente é necessario *sgrassare* la superficie attraverso un trattamento chimico. In questa fase é importante non fare evaporare i solventi sulla superficie e non passare piú volte con la stessa garza sulla zona, in modo da evitare la contaminazione della superficie. Tra queste fasi e l'incollaggio vero e proprio é consigliato che non trascorri molto tempo onde evitare che la zona pulita si inquini nuovamente. La fase finale della preparazione

della superficie consiste nel riportare l'alcalinitá della superficie tra i PH 7 e 7,5 che é ideale per tutti i collanti e gli estensimetri. La *neutralizzazione* avviene applicando liberamente una notevole quantitá di neutralizzatore su tutta la superficie precedentemente trattata. Strofinare poi la superficie con due o tre stecchetti di cotone e asciugare avendo cura di ripetere l'asciugatura.

2. *Tracciatura*
   Prima dell'applicazione della colla vengono fatti dei segni sulla superficie i quali aiutano l'operatore a posizionare correttamente l'estensimetro. L'operatore con l'aiuto di un pezzo di nastro adesivo, sul quale é fissato l'estensimetro, cercherá di far combaciare i segni presenti sulla sbarra con quelli presenti sull'estensimetro. Il nastro adesivo é utile anche in fase di incollaggio infatti permette di sollevare l'estensimetro per spandere la colla e poi di riposizionarlo nella posizione voluta.

3. *Incollaggio*
   Ora é necessario scegliere la colla piú adatta all'applicazione per cui sará impiegato lo strain gauge. Infatti esistono diverse tipologie di colle che si differenziano per caratteristiche, modalitá di applicazione e costo. Le colle si differenziano in tre grandi famiglie: i cianoacrilati, resine epossidiche e adesivi al poliestere. I cianoacrilati sono adesivi ad azione rapida infatti polimerizzano in tempi molto brevi ma come controparte vanno utilizzati a temperatura ambiente e consentono un'adesione efficace solo per prove di breve durata. Le resine epossidiche e gli adesivi al poliestere invece vengono utilizzati per prove di lunga durata. Necessitano entrambe di un catalizzatore. Inoltre le resine epossidiche essendo anche termoindurenti, hanno bisogno di essere scaldate per indurire. Qualsiasi sia la colla che si utilizzi é necessario applicare una certa pressione su di essi per permettere un buon incollaggio.

4. *Cablaggio dell'estensimetro*
   Tipicamente il fissaggio degli estensimetri viene concluso con l'incollaggio di piazzole in prossimitá dell'estensimetro. I fili terminali dell'estensimetro vengono saldati alle piazzole e da queste si collegano i fili che poi andranno al circuito di condizionamento. Questa operazione permette di evitare che azioni meccaniche che possono subire i fili si ripercuotano sull'estensimetro danneggiandolo. Ultima operazione da effettuare é proteggere l'estensimetro possibilmente attraverso una capsula. Particolarmente dannose possono infatti risultare le azioni di umiditá e di sporcizia oltre alle giá citate azioni meccaniche.

5. *Rivestimenti protettivi*
   L'ultimo passo per il fissaggio dell'estensimetro prevede la protezione di esso tramite rivestimenti idonei per proteggere la griglia da condizioni che possono modificare la sua sensibilitá.

Si rimanda al manuale tecnico fornito da ogni produttore di estensimetri, poiché, a seconda dell'applicazione e del tipo di estensimetro, viene prevista una determinata procedura di installazione.

2.5 Come scegliere l'estensimetro

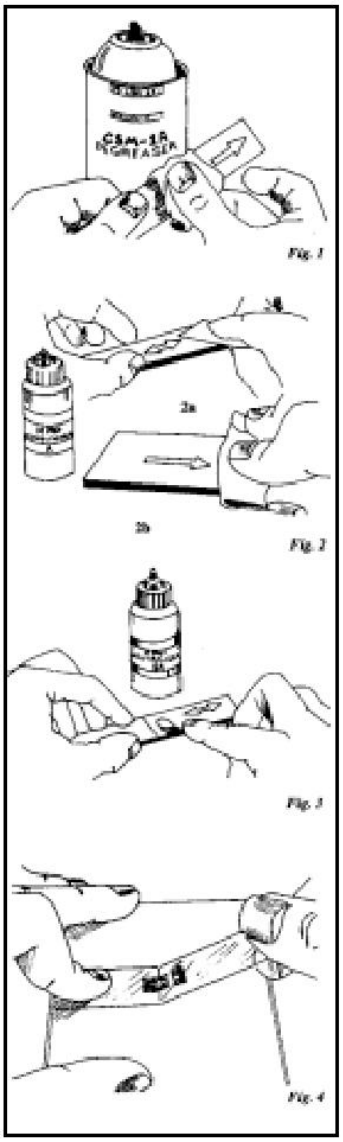
Gli estensimetri possono essere usati per misurare delle grandezze fisiche a partire dalla deformazione di un elemento meccanico, in maniera diretta o indiretta. La grande precisione ottenibile dagli estensimetri consente, quando sono incollati su degli elementi meccanici sensibili, di fornire un segnale elettrico proporzionale ad una grandezza fisica quale il peso, la forza, la pressione, la coppia, l'accelerazione e di costituire cosí un sensore. I sensori sono oggi parte integrante dell'automazione e dei sistemi di controllo, la cui diffusione é aumentata per l'uso sempre piú generalizzato dei computer. Sia per l'analisi sperimentale delle tensioni che per la realizzazione di sensori, é importante scegliere l'estensimetro appropriato in funzione dei requisiti quali la precisione, la durata di vita a fatica, il campo di temperatura e le condizioni ambientali. I principali parametri e criteri per la selezione di un estensimetro sono:

- *Il materiale su cui incollare gli estensimetri*
  Esistono estensimetri specifici per alluminio o acciaio o altri materiali. La differenza tra un tipo e l'altro é principalmente la base polimerica e il coefficiente di dilatazione termico α del materiale;

- *Stato di tensione presente*
  Esistono molteplici tipologie di estensimetri con diverse forme. Questo é pensato per facilitare la misura delle varie componenti tensionali presenti nel materiale.

- *Topologia del campo di tensione*
  Presenza di un campo tensionale omogeneo o disomogeneo, l'esistenza di variazioni discrete, la necessitá del valore medio della tensione presente o il valore puntuale. Questi dati sono fondamentali nella scelta delle dimensioni dell'estensimetro. Se, ad esempio, si volesse misurare il valore puntuale delle tensioni é consigliabile scegliere un estensimetro

ING. FRANCO LUCHSINGER snc CURNO (BG)	MANUALE D'USO M-Bond 200	Codice B-127-IT Rev. 2 del 18-11-99 Pag. 3 di 6



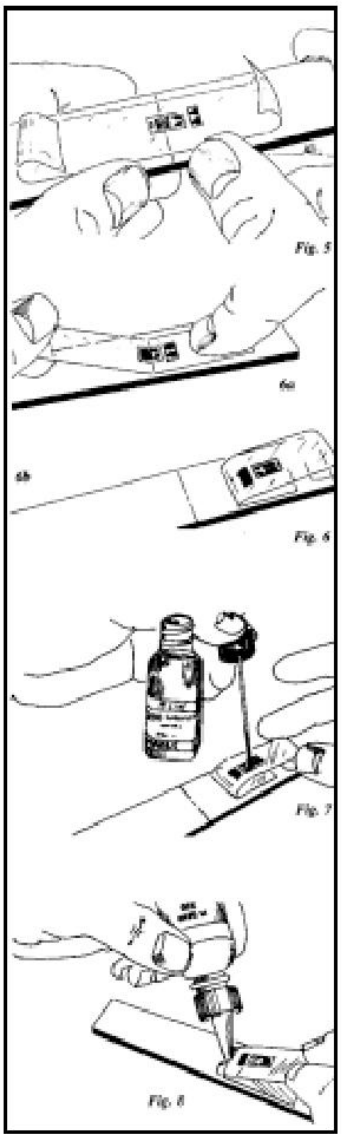
PUNTO 1
Pulire bene l'area dove sarà incollato l'estensimetro con solvente CSM-1A (Chlorotene) oppure GC-6 (Alcool isopropilico). Il primo prodotto è preferibile, ma alcuni materiali come il titanio e le plastiche reagiscono con solventi clorinati. In questo caso si consiglia di usare Alcool. Tutti gli sgrassaggi devono essere fatti con solventi puri; si consiglia quindi di usare prodotti in contenitori mono-uso, come per esempio le bombolette di aerosol.

PUNTO 2
Dapprima trattare a secco la superficie con carta abrasiva al carburo di silicio, grana 220 o 320 (fig. 2a). Quindi trattare con carta carburo grana 320 o 400 bagnata con M-Prep Conditioner A. Asciugare con garza. Ripetere questa operazione e asciugare passando lentamente con la garza come nella Figura 2b. Con un matita dura 4H o biro tracciare (non incidere) la linea per il posizionamento dell'estensimetro.
Applicare nuovamente M-Prep Conditioner A e pulire con gli stecchetti di cotone fino a scolorire il segno tracciato. Per eliminare i residui passare lentamente con una garza inumidita con M-Prep Conditioner A. Non lasciare asciugare alcuna sostanza sulla superficie, poichè questa lascerebbe uno strato di contaminazione che riduce le qualità dell'incollaggio.

PUNTO 3
Applicare un buon quantitativo di M-Prep Neutralizer 5 e strofinare con uno stecchetto di cotone (vedere fig.3). Con una sola passata asciugare la superficie con una garza.
Attenzione: Non strofinare in avanti/indietro, in quanto questo può contaminare la superficie.

PUNTO 4
Togliere l'estensimetro dalla bustina con una pinzetta e depositarlo (superficie da incollare verso il basso) su un vetro o su una scatola di estensimetri, preventivamente pulite. Se si usano basette, posizionarle presso l'estensimetro lasciando una distanza di circa 1,6 mm tra supporto dell'estensimetro e basetta.
Posizionare una striscia di 10-15 cm di nastro adesivo M=M tipo PCT-2A sopra l'estensimetro e la basetta. Sollevare con cura il nastro adesivo con un angolo piccolo rispetto alla superficie (circa 45°) per staccarlo con l'estensimetro come indicato nella figura 4.

ING. FRANCO LUCHSINGER snc CURNO (BG)	MANUALE D'USO M-Bond 200	Codice B-127-IT Rev. 2 del 18-11-99 Pag. 4 di 6



PUNTO 5
Posizionare l'insieme estensimetro/nastro adesivo in modo da allineare i segni di riferimento dell'estensimetro con la linea tracciata sul provino (figura 5). Se non fosse ben allineato, risollevare il nastro adesivo con un angolo piccolo fino a liberare il provino Procedere ad un nuovo allineamento che può essere fatto senza pericolo di contaminazione usando il nastro PCT-2A. Questo nastro trattiene il mastice quando viene tolto dal provino.

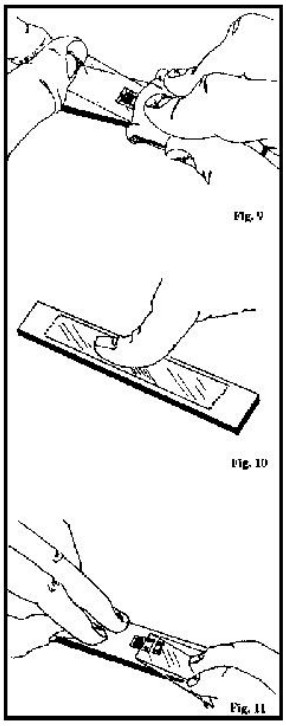
PUNTO 6
Sollevare il nastro adesivo con un angolo piatto come raffigurato nella figura 6a. Continuare a sollevarlo fino a circa 13 mm dalla basetta. Rivoltare l'estremità libera del nastro e incollarla sul provino (fig.6b) in modo che l'estensimetro e la basetta appaiano paralleli con la superficie da incollare esposta verso l'alto.

PUNTO 7
Applicare il catalizzatore sul retro dell'estensimetro e della basetta. L'adesivo M-Bond 200 polimerizza anche senza catalizzatore, ma molto più lentamente. Un piccolo quantitativo di catalizzatore deve essere applicato in modo uniforme e pellicolare. Estrarre il pennellino dal boccettino di catalizzatore e strofinarlo 10 volte contro il bordo per eliminare il quantitativo in eccedenza. Applicare il catalizzatore passando una volta sull'estensimetro e sulla basetta, evitando di ripassare più volte (fig. 7). Non muovere il pennello avanti e indietro. Prima di sollevare il pennellino spostarlo fino all'area adiacente del nastro adesivo. Lasciare asciugare il catalizzatore per almeno un minuto a 24°C e 30/65% di umidità relativa.

NOTA: *i tre punti successivi devono essere completati nella sequenza indicata nel tempo ottimale da 3 a 5 secondi. Leggere attentamente punto 8, 9 e 10 prima di procedere.*

PUNTO 8
Sollevare il nastro adesivo che era stato rivoltato e, mantenendolo nella stessa posizione, applicare 1 o 2 gocce di adesivo M-Bond 200 alla giunzione fra nastro adesivo e provino (fig.8). Questo adesivo sarà circa a 13 mm dall'area d'installazione dell'estensimetro. Questo garantisce che quando avrà luogo la polimerizzazione, al momento del contatto tra estensimetro e provino, non si formeranno irregolarità.

ING. FRANCO LUCHSINGER snc CURNO (BG)	MANUALE D'USO M-Bond 200	Codice B-127-IT Rev. 2 del 18-11-99 Pag. 5 di 6



PUNTO 9
Ruotare*Immediatamente* il nastro di circa 30° in modo che l'estensimetro si trovi sopra l'area dove deve essere installato. Tenendo con una mano il nastro, lentamente ma con fermezza, passare sopra l'insieme nastro adesivo/estensimetro con una garza (fig.9) portando l'estensimetro esattamente sopra il segno d'allineamento sul provino. Applicare una pressione con le dita quando si passa sopra con la garza. Il migliore incollaggio si ottiene quando lo strato di adesivo è molto sottile.

PUNTO 10
Subito dopo essere passati con la garza, applicare una pressione con il dito sopra l'estensimetro e la basetta (fig. 10).
La pressione deve essere applicata per 1 minuto circa. In ambienti a bassa umidità (sotto il 30%) o/e a bassa temperatura (sotto i 20°C) la pressione deve essere applicata per alcuni minuti. Se fosse necessario incollare un estensimetro grande o su superfici curve, sarà bene applicare la pressione con un attrezzo preformato. Il tempo di pressione dovrà essere aumentato se non viene applicata con il dito; infatti il calore del dito aumenta la velocità di polimerizzazione dell'adesivo.
Attendere da 2 a 5 minuti prima di togliere il nastro.

PUNTO 11
Estensimetro e basetta sono ora incollati. Per togliere il nastro adesivo tirarlo indietro sopra se stesso, staccandolo lentamente e liberando la superficie (fig. 11). Questo permette di evitare il sollevamento della griglia e di danneggiare l'installazione. Non è necessario togliere immediatamente il nastro. Se lasciato sul posto protegge l'estensimetro.

PROCEDURA FINALE

1. Scegliere lo stagno riferendosi al catalogo Micro-Measurements A-110 e saldare i cavi. Prima di ogni saldatura coprire con del nastro crespato tipo PDT-1 tutte te parti scoperte della griglia per evitare danni.
2. Rimuovere il flussante con M-Line Rosin Solvent tipo RSK-1.
3. Scegliere ed applicare il protettivo secondo il catalogo Micro-Measurements A-110.

Fig. 2.4: Manuale d'uso per incollaggio degli estensimetri con M-BOND 200, Luchsinger s.n.c.

con una dimensione della base ridotta. Nel caso in cui lo stato di tensione varia si puó utilizzare una catena di estensimetri per valutare la variazione continua o discreta della tensione presente;

- *Indice della frazione utile della misura rispetto alla frazione di disturbo*
  Per esempio in presenza di una forza normale sovrapposta a momento torcente si avrebbe una frazione utile. La conoscenza di questo permette il migliore posizionamento degli estensimetri. Infatti se si volesse misurare il momento flettente di asse x-x di una trave sollecitata anche da momento flettente di asse y-y, gli estensimetri vanno posizionati sulla faccia superiore e/o inferiore della trave con asse degli stessi ortogonale all'asse x della trave. In questo modo si aumenta la selettivitá degli estensimetri a favore della misura del momento di interesse[10];

- *La durata della misurazione e la temperatura a cui verrá effettuata*
  Quest'informazione é importante per poter scegliere un estensimetro con una base polimerica opportuna in modo che le temperature di esercizio e il ciclo di carico non la degradino. Inoltre la conoscenza della durata della misurazione e la temperatura di esercizio sono fondamentali per scegliere un adesivo adatto;

- *I disturbi ambientali*
  La conoscenza dei disturbi é fondamentale per la scelta e la progettazione di un valido sistema protettivo dei sensori che altrimenti potrebbero degradarsi piú velocemente e portare a misure non corrette;

- *Condizioni elettriche nel punto di misura*
  Questo fattore non é fondamentale nella scelta dell'estensimetro da utilizzare, ma risulta importante considerare le condizioni elettriche per un'adeguata realizzazione del circuito elettrico di acquisizione del segnale [11]. Infatti, facendo le opportune considerazioni, é possibile scegliere il tipo di tensione di alimentazione del ponte e il tipo di collegamento in base a vari fattori come la distanza, la resistenza dei cavi, gli spinotti di collegamento. Inoltre, in base al circuito di condizionamento che si ha a disposizione, é necessario scegliere un estensimetro

[10] Per ulteriori informazioni sul posizionamento degli strain gauge si rimanda alla figura 3.5 dove si illustrano i vari tipi di disposizioni del ponte di Wheatstone.

[11] Per condizioni elettriche si intende la presenza di campi elettromagnetici che possono essere percepiti dalle apparecchiature, in particolari dai cavi utilizzati per collegare gli estensimetri alla centralina. I cavi, se non opportunamente schermati o protetti dall'influenza di campi elettrici esterni, possono risultare delle antenne e quindi possono modificare il segnale tensione ai capi dell'estensimetro e quindi produrre errori di misura. Per ulteriori informazioni si rimanda a testi specifici sulla compatibilitá elettromagnetica.

con opportuna resistenza, in modo da bilanciare la linea e permettere il corretto trasferimento del segnale.

2.6 *Tecniche di realizzazione*

Gli estensimetri, in passato, erano realizzati con una resistenza applicata su di uno strato isolante e adesivo, peró questo tipo di estensimetro ha svantaggi notevoli. I moderni estensimetri vengono realizzati utilizzando la tecnica della *fotoincisione*. Questa tecnica é molto utilizzata in vari campi della tecnologia, dalla realizzazione dei circuiti stampati (PCB, printend circuit board) a lavorazioni metalliche particolari difficilmente ottenibili con altre tecnologie. La fotoincisione é anche una delle fasi di realizzazione dei circuiti integrati. La tecnica della fotoincisione consiste nel predisporre una matrice con il disegno dell'estensimetro. Questa matrice ha dimensioni maggiori rispetto a quelle finali dell'estensimetro e dipendono dalla tecnologia con cui la si realizza. Ora viene proiettata una luce, che puó essere una luce a raggi UV, attraverso questa matrice su di una lastra ricoperta di un film fotosensibile il quale é posto su uno strato metallico depositato sopra un supporto isolante. La luce ha come effetto quello di fissare il disegno, proprio come avviene nello sviluppo delle fotografie. Un successivo lavaggio permette di visualizzare il metallo da asportare, ed infine l'immersione in un bagno acido asporta il metallo in eccesso, lasciando sullo strato isolante l'estensimetro pronto da utilizzare. Tra i principali vantaggi c'é: la precisione, si hanno piccole tolleranze di produzione, la riproducibilitá, piccole dimensioni del foglio di supporto, ampia superficie esposta, ovvero disperde bene il calore e ampi contatti terminali, la facilitá di collegamento con la catena di acquisizione dati. Tra i principali svantaggi della fotoincisione, che la rendono conveniente solo in elevati volumi di produzione, c'é la necessitá di realizzare opportune maschere e la non trascurabile quantitá di materiale di scarto. Un'altra tecnica che si sta diffondendo nella realizzazione degli estensimetri é *l'inkjet printing*. Il miglioramento e la diffusione di questa tecnica é legata alle esigenze di prototipizazione rapida di dispositivi elettronici e sensori a basso costo, specialmente negli ambiti della ricerca e dello sviluppo. A differenza della fotoincisione questa tecnica non richiede maschere o microlavorazioni a vantaggio dei tempi realizzativi e dei costi. Questa tecnica consiste nello stampaggio, su un supporto base, del sensore. Per la stampa si possono usare anche delle comuni stampanti a inchiostro anche se presentano delle limitazioni legate a problemi di compatibilitá tra inchiostri utilizzati e testine di stampa, ai substrati utilizzati e all'assenza di feedback visivi sul processo. Esistono inchiostri sia organici che inorganici con caratteristiche

diverse. Gli inchiostri per la realizzazione di estensimetri sono tipicamente inorganici, basati su metalli quali argento, oro, rame e alluminio dispersi in un solvente.

3. BLOCCO DI CONDIZIONAMENTO

Il sistema di acquisizione dati per misure estensimetriche é fornito come kit di misura detto centralina estensimetrica[1]. La centralina mette a disposizione tutta la componentistica per:

- Completare il ponte Wheatstone
- Alimentarlo
- Bilanciarlo e amplificare il segnale
- Leggere lo sbilanciamento sotto carico
- Fornire la misura in termini di microdeformazioni

Il blocco di condizionamento nella catena di misura é dato dai primi tre punti. Gli ultimi due invece vengono eseguiti da una parte circuitale legata all'ADC e al processo di elaborazione dati del sistema. Il sistema di acquisizione dati completo é dato dall'insieme estensimetro/i e centralina. In generale, il *blocco di condizionamento* é un sistema che opera sul segnale prodotto dal sensore al fine di adattare le informazioni in uscita dal sensore con le caratteristiche in ingresso degli elementi successivi della catena di misura. Il blocco d condizionamento del segnale esegue due funzioni:

- amplificare e adattare il segnale al range di ingresso del blocco successivo
- rafforzare il segnale senza avere distorsioni

In base al tipo di sensore, *attivo* o *passivo*[2], il blocco dovrá essere in grado di alimentare il sensore per poter ottenere il segnale da condizionare. Questo

[1] La centralina estensimetrica é tutto il sistema di acquisizione dati escluso l'eventuale estensimetro: consiste, quindi, nell'unione di tutti i blocchi, da quello d condizionamento del segnale, all'ADC, all'elaborazione dati e all'output della misura.

[2] Un sensore attivo é un sensore che richiede di essere alimentato, come nel caso dell'estensimetro. Un sensore passivo invece non ha bisogno di essere alimentato, ad esempio una termocoppia

stadio della catena di misura é un circuito elettronico che trasferisce, tramite una determinata funzione transcaratteristica, il segnale: condizionando il segnale, cioé adattandolo al successivo elemento della catena, si dovrá far in modo che il segnale non venga distorto o disturbato, in modo da non produrre errori aggiuntivi che andranno ad aumentare l'incertezza sulla misura che si deve effettuare.

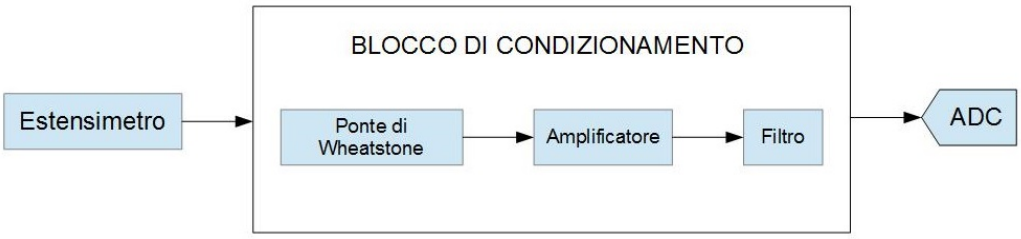


Fig. 3.1: Circuito di Condizionamento

Definendo il tipo di circuito di collegamento e il fattore di taratura G dell'estensimetro, la centralina fornisce direttamente il valore della deformazione lungo la direzione della griglia di misura. Il collegamento a ponte di Wheatstone permette di utilizzare sia resistenze di completamento interne alla centralina che esterne, in questo caso collegate assieme all'estensimetro nel circuito di misura. Il circuito a ponte di Wheatstone, utilizzato nella misura della deformazione con l'utilizzo di estensimetri elettrici a resistenza, puó essere alimentato a tensione costante o a corrente costante; in entrambi i casi l'alimentazione sará fornita da una sorgente esterna. Il segnale dato dallo squilibrio del ponte é un segnale prossimo allo zero, in quanto le deformazioni stesse sono limitate e di conseguenza le variazioni di resistenza degli estensimetri non possono essere misurate direttamente con un ohmetro. Per poter avere un segnale ad un livello tale da poter essere analizzato, si introduce nel sistema di misura un amplificatore. Il segnale in uscita dall'amplificatore puó essere elaborato e convertito in una grandezza leggibile dall'operatore. L'output del sistema di misura puó essere di tipo statico o dinamico[3]. Nel primo caso la centralina estensimetrica fornisce un segnale stabile nel tempo mentre nel secondo caso é possibile acquisire un segnale variabile nel tempo.

[3] Si parla di misura dinamica quando bisogna misurare una forza che applicata ad un corpo libero, gli fa cambiare velocitá. Si parla di misura statica quando bisogna misurare una forza che applicata ad un corpo vincolato, lo deforma.

Fig. 3.2: La figura mostra i blocchi di condizionamento del segnale prodotti dalla Micro Measurements. Questi sistemi possono essere collegati a tutte le configurazioni del ponte di Wheatstone e hanno la possibilitá di regolare l'amplificazione e filtrare la tensione di uscita.

3.1 Il ponte di Wheatstone

Il ponte di Wheatstone, rappresentato in figura 3.3 é un circuito costituito da quattro rami ciascuno contenente una resistenza. Esso viene normalmente alimentato per mezzo di un generatore di tensione costante ΔV_{AB} ed é utilizzato allo scopo di determinare il valore incognito di una delle quattro resistenze. É possibile individuare una diagonale di alimentazione AB e una diagonale di rivelazione CD, da cui é possibile rilevare lo sbilanciamento del circuito misurando la tensione Δ_{CD}.

$$\Delta V_{CD} = V_C - V_D = \Delta V_{AB} * (\frac{R_c}{R_c + R_d} - \frac{R_b}{R_a + R_b}) \tag{3.1}$$

Il ponte si dice in condizioni di equilibrio quando la tensione ΔV_{CD} é nulla; si avrá dunque:

$$\Delta V_{CD} = V_C - V_D = 0 \tag{3.2}$$

Dalle equazioni precedenti si ottiene che:

$$\frac{R_c}{R_c + R_d} - \frac{R_b}{R_a + R_b} = 0 \Rightarrow R_a R_c = R_b R_d \Rightarrow \frac{R_a}{R_b} = \frac{R_d}{R_c} = k \tag{3.3}$$

La relazione matematica stabilisce la condizione di equilibrio del ponte di Wheatstone. Con k si indica il rapporto delle resistenze sui due rami del ponte. In tale condizione risulta pertanto uguale il prodotto incrociato delle resistenze dei rami oppure, equivalentemente, risulta uguale il rapporto tra le due resistenze dei due rami. La condizione di equilibrio, come si puó dedurre, non é influenzata da eventuali instabilitá della tensione di alimentazione e questo rappresenta un ulteriore vantaggio dell'utilizzo del ponte di Wheatstone nelle misure di resistenza. Nel caso in cui il ponte non sia bilanciato, cioé non si verifica la relazione 3.3, perché i valori nominali delle resistenze del ponte non sono quelli effettivi, basta modificare una resistenza del ponte in modo da ottenere il bilanciamento. Per modificare la resistenza basta inserire in serie la resistenza, se si vuole incrementare il valore del prodotto, o in parallello, se si vuole diminuire il valore.
Dall'equazione 3.1 possiamo ricavare la formulazione della differenza di tensione al variare della resistenze. Infatti ogni resistenza puó essere riscritta come somma di un valore costante R_{i0} e di un valore variabile che si puó denominare ΔR_i, ovvero, nel caso della resistenza R_a si puó dire che:

$$R_a = R_{a0} + \Delta R_a \tag{3.4}$$

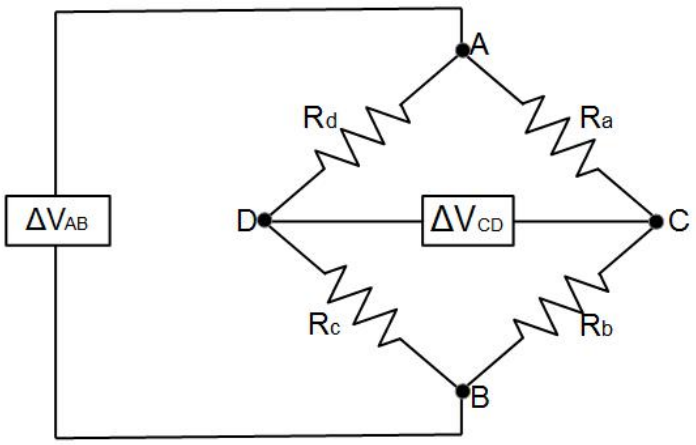


Fig. 3.3: Ponte di Wheatstone

Quindi l'equazione puó essere riscritta cosí:

$$\Delta V_{CD} = \Delta V_{AB} * (\frac{R_{c0} + \Delta R_c}{R_{c0} + \Delta R_c + R_{d0} + \Delta R_d} - \frac{R_{b0} + \Delta R_b}{R_{a0} + \Delta R_a + R_{b0} + \Delta R_b}) \tag{3.5}$$

Prendiamo il primo dei due termini all'interno delle parentesi dell'equazione precedente. Moltiplicando e dividendo per $R_{c0} - \Delta R_c + R_{d0} - \Delta R_d$, dopo alcuni passaggi algebrici, si arriva alla formulazione seguente:

$$\frac{R_{c0}^2 + R_{c0}R_{d0} - R_{c0}\Delta R_d + R_{d0}\Delta R_c - \Delta R_c^2 - \Delta R_c \Delta R_d}{R_{c0}^2 + 2R_{c0}R_{d0} + R_{d0}^2 - \Delta R_c^2 - 2\Delta R_c \Delta R_d - \Delta R_d^2} \tag{3.6}$$

Trascurando i termini prodotto di tipo ΔR_i^2 o $\Delta R_c \Delta R_d$ poiché di ordine infinitesimo si puó scrivere:

$$\frac{R_{c0}^2 + R_{c0}R_{d0} - R_{c0}\Delta R_d + R_{d0}\Delta R_c}{R_{c0}^2 + 2R_{c0}R_{d0} + R_{d0}^2} = \frac{R_{c0}}{R_{c0} + R_{d0}} - \frac{R_{c0}R_{d0}}{(R_{c0} + R_{d0})^2} * (\frac{\Delta R_c}{R_c} - \frac{\Delta R_d}{R_d}) \tag{3.7}$$

Con gli stessi passaggi si arriva ad avere la stessa struttura per il secondo membro dell'equazione 3.5. Quindi si potrá riscrivere la differenza di potenziale ΔV_{CD}:

$$\begin{aligned}\Delta V_{CD} =& \Delta V_{AB}[\frac{R_{c0}}{R_{c0} + R_{d0}} - \frac{R_{c0}R_{d0}}{(R_{c0} + R_{d0})^2} * (\frac{\Delta R_c}{R_c} - \frac{\Delta R_d}{R_d}) - \frac{R_{b0}}{R_{a0} + R_{b0}} + \\ &+ \frac{R_{a0}R_{b0}}{(R_{a0} + R_{b0})^2} * (\frac{\Delta R_b}{R_b} - \frac{\Delta R_a}{R_a})].\end{aligned} \tag{3.8}$$

Nel caso in cui é verificato che $\frac{R_a}{R_b} = \frac{R_d}{R_c} = k$ si puó scrivere che:

$$\frac{R_{c0}}{R_{c0} + R_{d0}} = \frac{R_{b0}}{R_{a0} + R_{b0}} \tag{3.9}$$

Con questi accorgimenti possiamo riscrivere la tensione di uscita ΔV_{CD} cosí:

$$\Delta V_{CD} = \Delta V_{AB} * \frac{k}{(k+1)^2} * (\frac{\Delta R_b}{R_b} - \frac{\Delta R_a}{R_a} + \frac{\Delta R_d}{R_d} - \frac{\Delta R_c}{R_c}) \tag{3.10}$$

Il ponte di Wheatstone ha la massima sensibilitá[4], ossia quella condizione in cui la tensione di squilibrio risulta massima a fronte di una minima variazione

[4] La sensibilitá del ponte di Wheatstone é definita dal rapporto $\frac{k}{(k+1)^2}$ e risulta massima per $k = 1$

di una resistenza, quando $k = 1$. Sfruttando la relazione 2.8[5] si ottiene che:

$$\Delta V_{CD} = \frac{\Delta V_{AB}}{4} * G * (\epsilon_b - \epsilon_a + \epsilon_d - \epsilon_c) \Rightarrow \Delta V_{CD} = \frac{\Delta V_{AB}}{4} * G * \epsilon_{tot} \quad (3.11)$$

Dall'ultima equazione[6] si vede che la differenza di potenziale tra i punti C e D del ponte é proporzionale alla deformazione delle resistenze, a paritá di tensione di alimentazione e fattore di taratura. Come visto precedentemente, le resistenze subiscono una variazione di forma,e conseguentemente si modifica il valore della tensione, sia per effetto della sollecitazione meccanica che per una variazione di temperatura. Quindi possiamo affermare che ϵ_{tot} é l'insieme di tutte le deformazioni che ogni singola resistenza del ponte subisce. Il ponte viene formato con estensimetri e resistenze di completamento in funzione della misura da effettuare; viene scelto il tipo di circuito piú semplice, ovvero con il minor numero possibile di estensimetri montati, compatibilmente con le esigenze di:

- compensare la deformazione termica apparente;
- depurare la misura dalle eventuali deformazioni non desiderate;
- innalzare il valore misurato, aumentando cosí il rapporto segnale/rumore della misura, ovvero ottenere un SNR elevato;[7]

A seconda delle esigenze si possono usare differenti modalitá di collegamento

- *a quarto di ponte*, usato per prove dinamiche in prova alta e bassa temperatura;
- *a mezzo ponte*, viene utilizzato per compensare la deformazione termica apparente e per eliminare le deformazioni spurie, in piú c'é un incremento del segnale del doppio;
- *a ponte intero*,viene utilizzato per compensare la deformazione termica apparente e per eliminare le deformazioni spurie, in piú c'é un incremento del segnale del quadruplo;

[5] $\frac{\Delta R}{R} = G * \epsilon$

[6] L'equazione é riferita al caso in cui tutte le resistenze subiscono delle deformazioni

[7] Si ricorda che $SNR = P_u/P_r$, dove P_u é la potenza del segnale utile e dove P_r é la potenza del rumore. Questo implica l'uso di filtri per ridurre la banda. Si rimanda alla lettura del paragrafo 3.6.

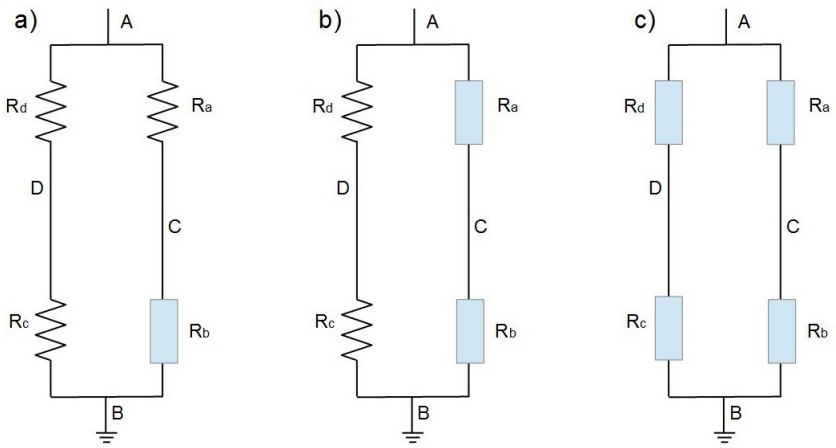


Fig. 3.4: La figura mostra i collegamenti **a)** a quarto di ponte, **b)** a mezzo ponte e **c)** a ponte intero

3.1.1 Collegamento a quarto di ponte

Nei circuiti a quarto di ponte (in figura 3.4 **a)**) solo una delle resistenze del ponte é data da quella interna dell'estensimetro, quindi variabile, mentre le altre tre resistenze che completano il ponte e sono costanti. La deformazione totale misurata vale:

$$\epsilon_l = (\epsilon_f + \epsilon_{\Delta T})\frac{G}{G_T} \tag{3.12}$$

dove con ϵ_f si indica la deformazione reale e con $\epsilon_{\Delta T}$ si indica la deformazione termica apparente, come visto nel paragrafo 2.2.1. Il collegamento a quarto di ponte puó essere utilizzato per determinare le deformazioni provocate da sollecitazioni di trazione, flessione o torsione, ma in tutti i casi la deformazione misurata puó essere contaminata dalla deformazione apparente. In questa configurazione il ponte non é compensato in temperatura: infatti si richiede che l'estensimetro sia autocompensato. Questo tipo di estensimetro non é soggetto a deformazioni termiche apparenti dovute a variazioni della temperatura.

3.1.2 Collegamento a mezzo ponte

Il collegamento a mezzo ponte (in figura 3.4 **b)**) prevede l'uso di due estensimetri, uno per ramo del ponte (ad esempio R_b e R_c), e viene sfruttato per compensare, dalla deformazione apparente, l'estensimetro. A seconda di come si dispongono i due estensimetri si possono avere dei miglioramenti:

- *Caso 1: Eliminazione della deformazione apparente*
  Applicando due estensimetri alla trave, come in figura, in modo che uno solo dei due sia soggetto alla sollecitazione meccanica si avrá che la deformazione totale sará:

$$\epsilon_{tot} = (\epsilon_f + \epsilon_{\Delta T}) - (\epsilon_{\Delta T}) = \epsilon_f \tag{3.13}$$

  La deformazione totale quindi é data solo dalla deformazione di origine meccanica.

- *Caso 2: Rafforzamento del segnale*
  Disponendo gli estensimetri come in figura si ottiene che:

$$\epsilon_{tot} = (\epsilon_f + \epsilon_{\Delta T}) - (\epsilon_f + \epsilon_{\Delta T}) = 2\epsilon_f \tag{3.14}$$

  L'estensimetro applicato sopra é soggetto ad una sollecitazione di trazione, mentre quello sotto é soggetto a comprensione. Oltre ad eliminare la deformazione apparente, il segnale verrá rinforzato e raddoppiato. Un altro modo per rafforzare il segnale in uscita dal sensore é rappresentata in figura. In questo caso, per l'equazione di Lamé, si ha che:

$$\epsilon_{tot} = (\epsilon_f + \epsilon_{\Delta T}) - (\nu\epsilon_f + \epsilon_{\Delta T}) = (1 + \nu)\epsilon_f \tag{3.15}$$

3.1.3 Collegamento a ponte intero

In questo caso tutti i lati del ponte sono costituiti da estensimetri. Nel circuito in figura 3.4 **c)** si collegano su una coppia di lati opposti gli estensimetri posti sulla faccia tesa e sulla rimanente coppia di lati opposti gli estensimetri posti sulla faccia compressa. Il risultato é una misura pari a quattro volte la deformazione di flessione su ogni faccia:

$$\epsilon_{tot} = 2(\epsilon_f + \epsilon_{\Delta T}) - 2(\epsilon_f + \epsilon_{\Delta T}) = 4\epsilon_f \tag{3.16}$$

Nel circuito di figura si collegano su una coppia di lati opposti gli estensimetri soggetti a trazione e sulla rimanente coppia di lati opposti gli estensimetri soggetti alla contrazione trasversale:

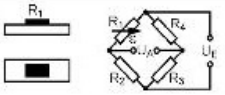
$$\epsilon_{tot} = 2(\epsilon_f + \epsilon_{\Delta T}) - 2(\nu\epsilon_f + \epsilon_{\Delta T}) = 2(1 + \nu)\epsilon_f \tag{3.17}$$

Come si vede, in entrambi i casi, il segnale risulta compensato dalle deformazioni apparenti oltre che amplificato.

6 Table on different circuit configurations

The table below* shows the dependence of the geometrical position of the strain gages, the type of bridge circuit used and the resulting bridge factor B for normal forces, bending moments, torques and temperatures. The small tables given for each example specify the bridge factor B for each type of influencing quantity. The equations are used to calculate the effective strain from the bridge output signal U_A/U_E. If strain measuring devices are used, equations (7) or (11) can be applied accordingly.

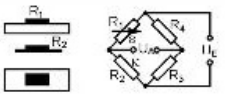
1



$$\varepsilon = \varepsilon_n + \varepsilon_b = \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E} - \varepsilon_s$$

T	F_N	M_b	M_d
1	1	1	0

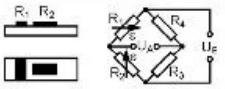
2



$$\varepsilon = \varepsilon_n + \varepsilon_b = \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E}$$

T	F_N	M_b	M_d
0	1	1	0

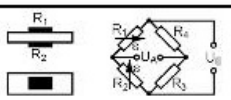
3



$$\varepsilon = \varepsilon_n + \varepsilon_b = \frac{1}{(1+\mu)} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E}$$

T	F_N	M_b	M_d
0	1+υ	1+μ	0

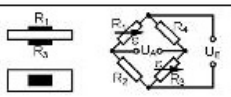
4



$$\varepsilon = \varepsilon_b = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E}$$

T	F_N	M_b	M_d
0	0	2	0

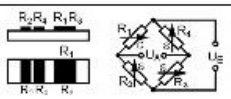
5



$$\varepsilon = \varepsilon_n = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E} - \varepsilon_S$$

T	F_N	M_b	M_d
2	2	0	0

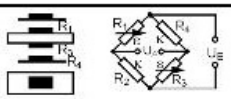
6



$$\varepsilon = \varepsilon_n + \varepsilon_b = \frac{1}{2(1+\nu)} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E}$$

T	F_N	M_b	M_d
0	2(1+υ)	2(1+υ)	0

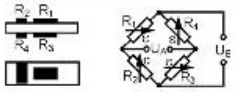
7



$$\varepsilon = \varepsilon_n = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E}$$

T	F_N	M_b	M_d
0	2	0	0

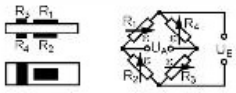
9



$$\varepsilon = \varepsilon_n = \frac{1}{2(1+\mu)} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E}$$

T	F_N	M_b	M_d
0	2(1+υ)	0	0

10



$$\varepsilon = \varepsilon_b = \frac{1}{2(1-\mu)} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E}$$

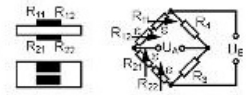
T	F_N	M_b	M_d
0	0	2(1+υ)	0

11

$$\varepsilon = \varepsilon_b = \frac{1}{2(1+\mu)} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E}$$

T	F_N	M_b	M_d
0	0	2(1+υ)	0

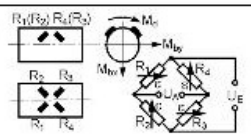
12



$$\varepsilon = \varepsilon_b = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E}$$

T	F_N	M_b	M_d
0	0	2	0

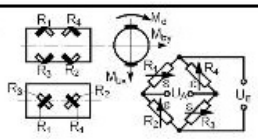
13



$$\varepsilon = \varepsilon d = \frac{1}{4} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E}$$

T	F_N	M_{bx}	M_{by}	M_d
0	0	0	0	4

14

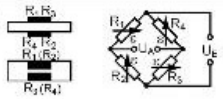


$$\varepsilon = \varepsilon_d = \frac{1}{4} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E}$$

Tt	F_N	M_{bx}	M_{by}	M_d
0	0	0	0	4

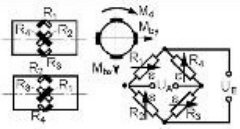
15

8



$$\varepsilon = \varepsilon b = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E}$$

T	F_N	M_b	M_d
0	0	4	0



$$\varepsilon = \varepsilon_d = \frac{1}{4} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E}$$

t	F_N	M_{bx}	M_{by}	M_d
0	0	0	0	4

Note: A cylindrical shaft is assumed for torque measurement, examples 13, 14, 15. For reasons of symmetry, bending in X and Y direction is allowed. The same conditions also apply for the bar with square or rectangular cross section. Explanation of symbols:

T= temperature

F_N = longitudinal = normal force

M_b = bending moment

M_{bx}, M_{by} = bending moment for X and Y directions

M_d = torque

These influences result in strains ε_s, ε_n, ε_b, ε_{bx}, ε_{by}, ε_d respectively.

ε = the effective strain at the point of measurement Z_0 for P and M_b in normal direction, for M_d under φ = + 45°

υ = Poisson's ratio

= active strain gage

= strain gage for temperature compensation

= passive strain gage or resistor

*Table compiled by Mr. J. Bomhardt, first published in ELEKTRONIK 16 (1967) No. 19.

Fig. 3.5: La figura mostra vari tipi di configuazioni per ricavare, a seconda della sollecitazione esterna, la deformazione superficiale misurata dal ponte

3.2 *Bilanciamento degli errori dovuti alle resistenze dei cavi*

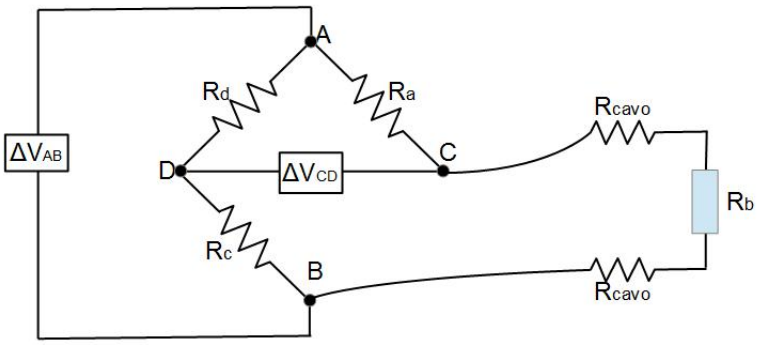


Fig. 3.6: I cavi di collegamento introducono delle resistenze aggiuntive che modificano il ponte

Il collegamento tra la centralina e il sensore viene effettuato tramite cavi: anch'essi presentano una resistenza, che cresce a seconda della lunghezza, e quindi andranno a modificare il bilanciamento del ponte. Il segnale sará modificato anche dalla presenza e dalla distanza tra la centralina e il sensore. Infatti come si puó notare dalla figura si hanno delle resistenze aggiuntive. A seconda del tipo di collegamento possiamo risolvere il problema con uno dei seguenti metodi:

- *Collegamento a tre fili*
  Nel caso di collegamento a quarto di ponte lo schema piú adatto é quello definito a *tre fili*. Con questa tecnica si ottiene il bilanciamento del ponte in quanto si ha che il rapporto k rimane invariato tra il ramo destro e sinistro dei noi A e B, come si puó vedere in figura 3.7, poiché il ramo AC risulta essere uguale al ramo CB, essendo la somma di componenti uguali. Il terzo cavo utilizzato per leggere lo squilibrio del ponte non introduce errori in quanto in esso praticamente non circola corrente e quindi la caduta di tensione ai suoi capi é trascurabile.
  Nel collegamento a mezzo ponte, come si puó vedere in figura 3.8, si usa un collegamento a tre fili simile al precedente. Questo schema permette di eliminare le deformazioni apparenti. Questo schema risulta giá bilanciato: infatti i rami che presentano estensimetri presentano lo stesso valore.[8] La deformazione totale effettiva ϵ_{tot} e quella misurata

[8] Si puó ritenere che gli estensimetri utilizzati risultino alla medesima distanza dalla

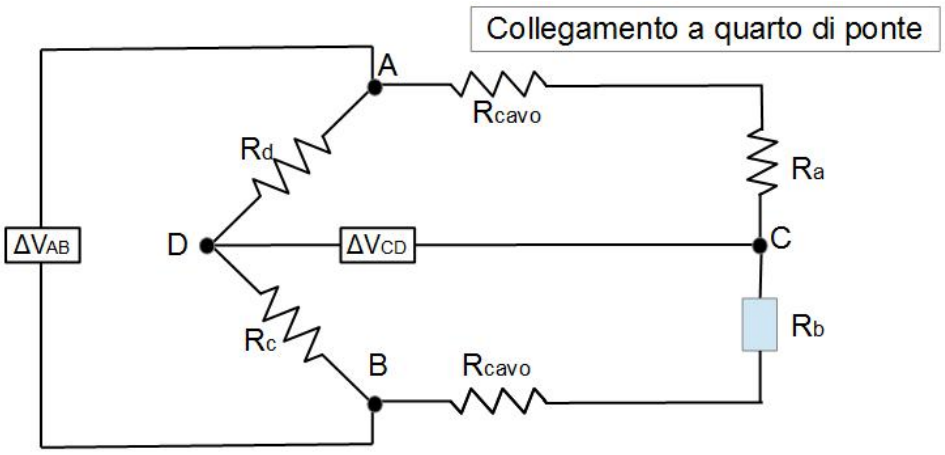


Fig. 3.7: Risoluzione per configurazione a quarto di ponte

ϵ'_{tot} sono legate dalla seguente relazione:

$$\epsilon_{tot} = \epsilon'_{tot} \frac{R + R_{cavo}}{R} \tag{3.18}$$

- *Collegamento a quattro fili*
  Nella configurazione a ponte intero si usa il collegamento a quattro fili che cancella le deformazioni apparenti indotte dai cavi. Oltre alle deformazioni apparenti, la presenza dei cavi nel circuito causa attenuazione del segnale di misura, crescente con la lunghezza del cavo ed é necessario perció utilizzare cavi i piú corti [9] possibili.

$$\epsilon_{tot} = \epsilon'_{tot} \frac{R + 2R_{cavo}}{R} \tag{3.19}$$

La caduta di tensione dovute ai cavi sono trascurabili rispetto alle resistenze degli estensimentri perché la resistenza dei cavi dipende dalla lunghezza, minore é la lunghezza minore sará la riduzione di tensione ad essi collegata. Prendendo un cavo resistivo di rame da lungo 5 m, la resistenza dei conduttori é di 1,272 Ohm (linee di andata e ritorno), e con cavo lungo 50 m

centralina, per cui la lunghezza dei cavi, che é un parametro che modifica il valore della resistenza, risulta la stessa.

[9] Un cavo viene considerato "lungo" quando la sua resistenza é confrontabile con la resistenza dell'estensimetro.

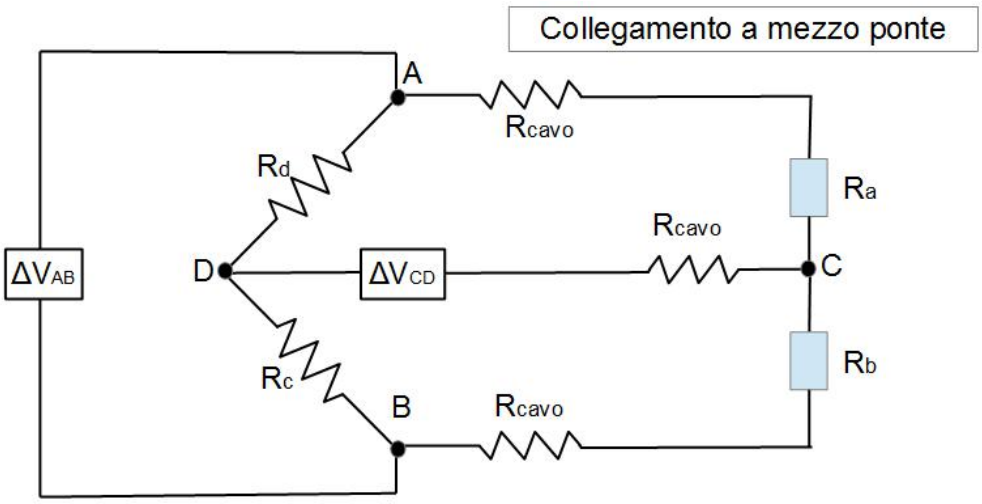


Fig. 3.8: Risoluzione per configurazione a mezzo ponte

essa é di 12,72 Ohm : all'aumentare della sezione il valore delle resistenza diminuisce.[10] Pertanto, la tensione applicata al circuito a ponte sará inferiore e, di conseguenza, sará minore anche il segnale di uscita. In definitiva, si ha una perdita di sensibilitá che nei casi considerati é dello 0,36% per il cavo lungo 5 m ed aumenta al 3,6 % per quello da 50 m. Queste variazioni sono consentite se rientrano nella taratura, cioé la sensibilitá specificata nel rapporto di prova o certificato di taratura resta valida per sensori aventi il cavo di collegamento giá montato. É importante osservare che le perdite dovute a cadute di tensione avvengono principalmente nei cavi di alimentazione in quanto i cavi di misura entrano nell'amplificatore che presenta per definizione resistenza interna elevata, a differenza del generatore di tensione che invece ha resistenza interna molto piccola. L'attenuazione indotta dai cavi non puó essere evitata da particolari accorgimenti ma solo corretta tramite adeguata taratura.

3.3 *Alimentazione del ponte*

L'alimentazione del ponte, o meglio il collegamento del ponte con l'alimentatore e il voltmetro, puó essere effettuata in due modi, come si puó vedere in figura 3.9.

- *Metodo a quattro fili*: due cavi vengono utilizzati per collegare l'alimentatore

[10] Catalogo Berica Cavi S.p.a.

ai capi A e B del ponte, mentre due cavi collegano i punti C e D del ponte al voltmetro;

- *Metodo a sei fili*: l'aggiunta dei due conduttori, rispetto al metodo precedente, va fatta nel collegamento dei punti A e B del ponte: grazie ad essi si puó regolare la tensione di alimentazione al ponte. Se la resistenza del cavo dovesse variare a causa dell'influenza della temperatura od alla variazione della lunghezza del cavo, l'amplificatore effettua un riaggiustamento interno fino a raggiungere di nuovo il valore preimpostato.

Il tipo ed il valore della tensione di alimentazione da fornire al ponte estensimetrico dipendono dalle caratteristiche degli estensimetri e dalla natura della misura che si deve eseguire. Il livello di tensione da applicare é scelto tenendo conto di due esigenze opposte. Infatti, per ridurre l'errore di misura é auspicabile che la tensione di alimentazione V sia elevata in modo da aumentare la tensione di sbilanciamento a paritá di deformazione; d'altra parte la tensione di alimentazione V deve essere moderata per evitare di surriscaldare la griglia

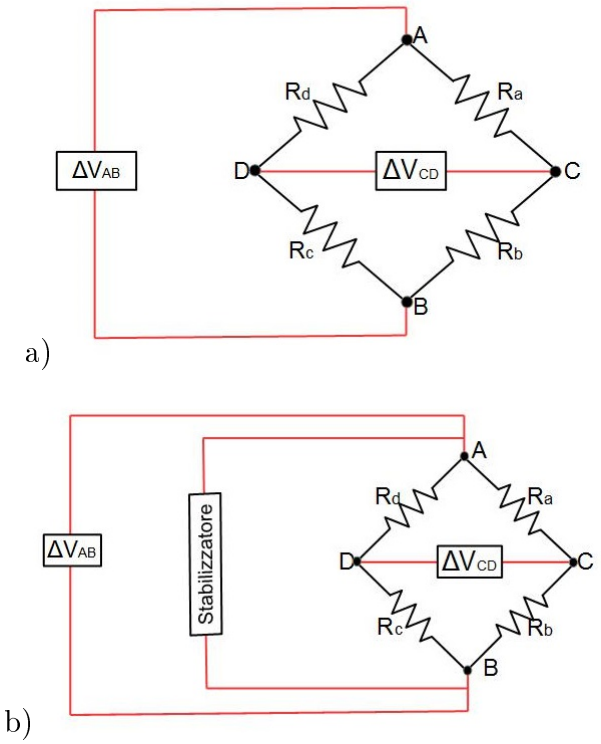


Fig. 3.9: Nelle figure sono rappresentate le due tipologie di alimentazione del ponte di Wheatstone.

e di conseguenza introdurre delle deformazioni apparenti, risultato dell'effetto Joule. Normalmente i costruttori forniscono per ogni tipo di estensimetro il corrispondente valore di alimentazione massimo ammesso; i valori usuali oscillano tra 0,5 e 20 V, proporzionalmente alle dimensioni della griglia e alla sua resistenza elettrica. In mancanza di informazioni specifiche, valori indicativi della potenza elettrica massima per unitá di superficie $[mW/mm^2]$ della griglia P' sono i seguenti:

Al, Cu di spessore elevato	8-16
Acciaio di spessore elevato	3-8
Al, Cu di spessore limitato	1.5-3
Resine rinforzate	0.3-0.8

Nota P' si calcola la tensione di alimentazione da adottare con la formula seguente:

$$\Delta V_{AB} = 2\sqrt{R * A * P' * 10^{-3}} \tag{3.20}$$

dove con A s indica la superficie della griglia e R la resistenza dell'estensimetro. Alimentare il ponte con corrente continua porta a due svantaggi:

* ci sono problemi di *deriva termica* poiché la potenza dissipata per effetto Juole andrá a surriscaldare andando ad incrementare la deformazione apparente dell'estensimetro;

* l'amplificatore risulta molto piú costoso rispetto a quello in corrente alternata.

3.4 Test del ponte

Prima di effettuare la misura della deformazione é importante testare il ponte per poter sopperire ad eventuali errori commessi nell'installazione del ponte. Esistono strumenti, come quello mostrato in figura 3.10, che permettono di misurare la resistenza di isolamento, cioé valuta eventuali dispersioni a terra, o le resistenze del ponte per poter calibrare il sistema ed ottenere misurazioni piú accurate. Come si é visto precedentemente le resistenze possono avere delle variazioni per cui producono variazioni sulla tensione di uscita. Il tester in figura é in grado di:

* leggere la resistenza di isolamento fino a $20000M\Omega$ con tensione di $15V$ in continua

Fig. 3.10: Tester per installazione del ponte estensimetrico, prodotto dalla Micro Measurements

* misurare la variazione della resistenza dell'estensimetro dal valore standard con una risoluzione del 0,02%

* verificare il ponte di Wheatstone includendo anche le perdite dovute ai cavi.

3.5 *Amplificazione del segnale*

Il ponte di Wheatstone permette, come visto precedentemente, di ottenere un segnale: a questo punto il sistema di acquisizione dovrá andare a leggerlo. All'interno del blocco di condizionamento il segnale verrá amplificato cosí da poter analizzare meglio la variazione della tensione. Infatti lo sbilanciamento del ponte produce un segnale in tensione basso. Sará quindi importante adattare la scala di tensione in uscita dal ponte, che normalmente varia da 10 mV a 100 mV, all'input range dell'ADC l'adattamento di scala é un'operazione importante poiché se eseguita in maniera corretta si potrá sfruttare pienamente la capacitá dell'ADC. Per poter eseguire questa operazione é bene utilizzare uno stadio di amplificazione del segnale. Vengono utilizzati, principalmente, due tipi di circuiti che operano sul segnale:

1. amplificatore operazionale differenziale

2. amplificatore per strumentazione

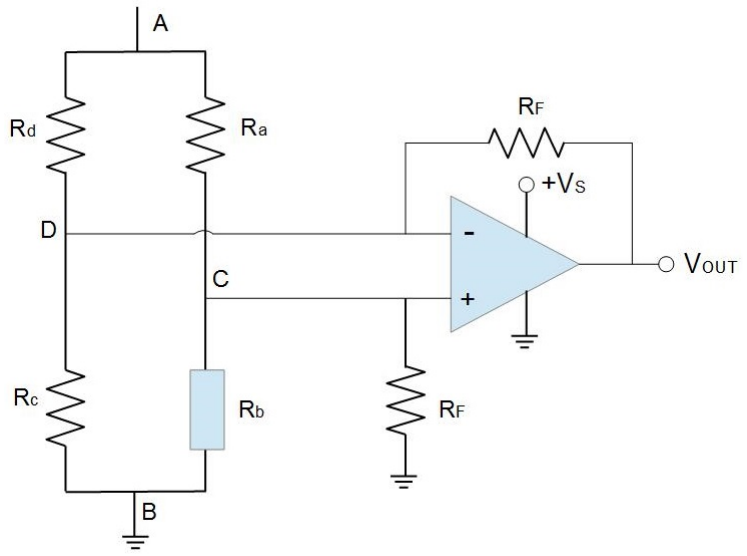


Fig. 3.11: La figura mostra la configurazione standard

3.5.1 *Amplificazione con amplificatore differenziale*

Al ponte di Wheatstone viene collegato un amplificatore operazionale: questa configurazione é semplice e viene utilizzata anche se ha degli svantaggi da tener presente, poiché ha un rendimento globale scarso. L'amplificatore operazionale, come si vede dalla figura 3.11, introduce un carico che va a sbilanciare il ponte e quindi produrrá un errore sulla misura su la resistenza del carico R_f. Altri svantaggi sono dovuti al basso guadagno e alla scarsa accuratezza. Il guadagno dipende, oltre che dalle resistenze del ponte, anche da R_f. É difficile poter aumentare il guadagno senza peggiorare il CMRR[11](Common Mode Rejection Ratio). L'impedenza vista dal polo negativo dell'amplificatore é variabile: varia con il variare della tensione di uscita che causa una leggera non linearitá. Una configurazione migliore é rappresentata in figura 3.12. Questo tipo di amplificatore, detto instrumentation amplifier (in-amp), provvede ad una migliore amplificazione: i moderni amplificatori in-amp possono avere un gain range che va dai 10 ai 1000. L'amplificazione é data dalla resistenza R_g: cosí si ha un'alta impe-

[11] Il CMRR, common mode rejection ratio, indica il rapporto tra l'amplificazione del segnale di modo comune e l'amplificazione del modo differenziale. $CMRR = A_c/A_d$ Indica la proprietá di un amplificatore differenziale di respingere il segnale che si presenta uguale ai due ingressi, come nel nostro caso. Per fare in modo di amplificare solo il segnale differenziale, che é quello che ci interessa, poiché rielaborandolo possiamo ottenere la deformazione, devo eliminare il modo comune del segnale: per ció il CMR deve avere valori elevati.

denza di carico tra i nodi C e D del ponte: questo fa si che non si avrá uno sbilanciamento dovuto alle resistenze introdotte dal circuito di amplificazione. Questa configurazione ha inoltre un ottimo CMRR. Comunque, a causa delle caratteristiche intrinseche del ponte, si avrá un'uscita non lineare: puó essere corretta tramite software, nel caso in cui si ha una elaborazione digitale. Un punto a favore di entrambe le configurazioni é il fatto che possono essere alimentate tramite una singola polaritá: il vantaggio é dato dal fatto che tutti i circuiti a ponte polarizzano gli ingressi dell'amplificatore con una tensione $\Delta V_{AB}/2$, una gamma di tensione tipicamente compatibile con i requisiti di polarizzazione dell'amplificatore.

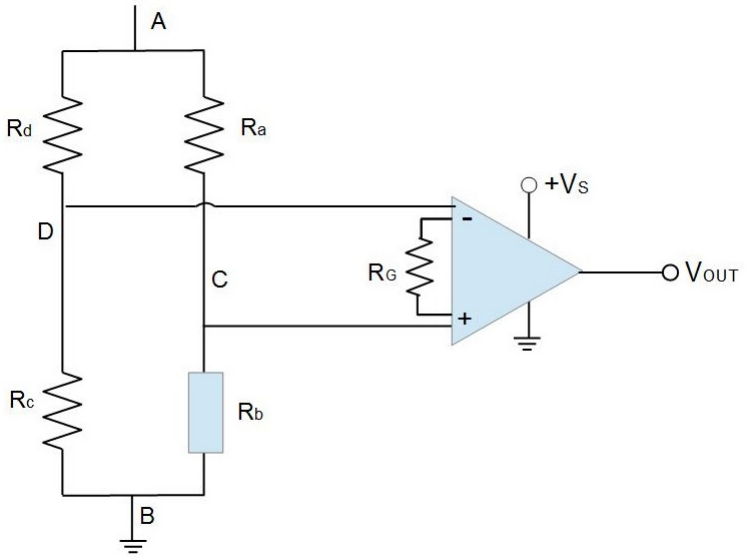


Fig. 3.12: La figura rappresenta la configurazione migliore

3.5.2 *Amplificazione con amplificatore per strumentazione*

Nella configurazione, mostrata in figura 3.13, é possibile regolare separatamente l'amplificazione dal CMRR. La configurazione rappresentata in figura é quella di un amplificatore per strumentazione: é composto da due amplificatori operazionali in configurazione non invertente e da uno sottrattore.La tensione di uscita dipende dalle tensioni di ingresso. La differenza di tensione $V_a - V_b$ che entra nell'amplificatore sottrattore risulta:

$$V_a - V_b = i(R_f + R_g + R_f) = i(2R_f + R_g) \tag{3.21}$$

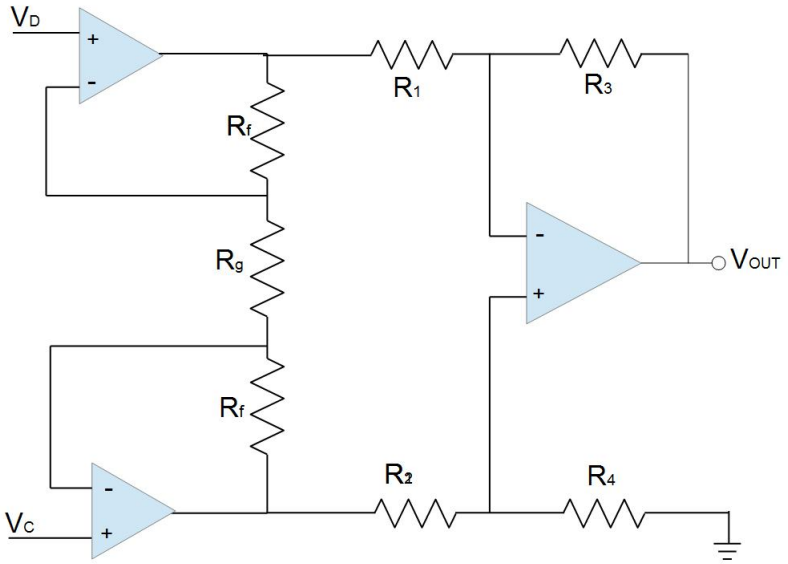


Fig. 3.13: La figura mostra la configurazione di un amplificatore per strumentazione

La tensione ai capi della resistenza R_g é la differenza di tensione $V_D - V_C$ poiché la tensione agli ingressi degli operazionali deve essere uguale, infatti si ha che $v_+ = v_-$. Per cui la corrente i é:

$$i = \frac{V_D - V_C}{R_g} \tag{3.22}$$

Per cui si ha che:

$$V_a - V_b = \frac{V_D - V_C}{R_g}(2R_f + R_g) \Rightarrow V_a - V_b = (V_D - V_C)(1 + \frac{2R_f}{R_g}) \tag{3.23}$$

La precedente equazione ci dá il valore della tensione di ingresso ai capi dell'amplificatore sottrattore. La tensione di uscita risulta pari a:

$$V_{out} = V_1 - i_3 R_3 = \frac{R_1 + R_3}{R_1} V_1 - \frac{R_3}{R_1} V_a \tag{3.24}$$

L'amplificatore impone che $V_1 = V_2$. La tensione V_2 si ottiene da:

$$V_2 = V_b - R_2 * i_2 = V_b - \frac{R_2}{R_4} V_2 \Rightarrow V_2 = \frac{R_4}{R_4 + R_2} V_b \tag{3.25}$$

Per cui sostituendo la 3.25 nella 3.24 si ottiene la

$$V_{out} = \frac{R_1 + R_3}{R_1} \frac{R_4}{R_4 + R_2} V_b - \frac{R_3}{R_1} V_a \tag{3.26}$$

Con l'ipotesi che $R_1 = R_2$ e $R_3 = R_4$ si ha che:

$$V_{out} = \frac{R_4}{R_1} V_b - \frac{R_3}{R_1} V_a = \frac{R_3}{R_1}(V_b - V_a) \tag{3.27}$$

Quindi riprendendo l'equazione 3.23 si ottiene la tensione di uscita in funzione delle tensione V_C e V_D; risulta che:

$$V_{out} = -(V_D - V_C) \underbrace{\frac{R_3}{R_1}}_{CMRR} \underbrace{(1 + \frac{2R_f}{R_g})}_{gain} \tag{3.28}$$

Dalla tensione di uscita si puó vedere che per amplificare il segnale di ingresso basta modificare la resistenza R_g: infatti per aumentare il guadagno basta diminuire il valore della resistenza. Il CMRR invece dipende dal rapporto tra le resistenze che caratterizzano l'amplificatore sottrattore. Il vantaggio di questa configurazione sta nel fatto che si puó migliorare il guadagno senza peró andare a influenzare il CMRR. Infatti i primi due blocchi di amplificazione forniscono l'amplificazione dei segnali di ingresso, mentre il secondo blocco, il sottrattore, va a togliere i modi comuni dei segnali e confrontarli tra loro, ottenendo cosí la differenza di tensione V_{out}. Un secondo vantaggio di questa configurazione sta nel fatto che non sbilancia il ponte poiché le resistenze di ingresso degli amplificatori sono elevate.

3.6 Filtri

Un filtro é un sistema o dispositivo che realizza delle funzioni di trasformazione o elaborazione (signal processing) di segnali posti al suo ingresso. Ad esempio una sua funzione puó essere quella di eliminare determinate bande di frequenza lasciando passare tutte le altre, cosa che si ottiene attenuando le frequenze piú alte o piú basse di un valore determinato (filtri passa-basso e passa-alto), o quelle comprese in un intervallo prestabilito (filtri passa-banda ed elimina banda).

I filtri per il segnale possono essere vari poiché a seconda dell'esigenza si vuole "pulire" il segnale da eventuali disturbi che provengono dall'esterno o dallo stesso sistema di amplificazione e comunicazione. Nel caso di misure estensimetriche si vuole un segnale "pulito" dal White Noise (rumore bianco), in quanto puó influenzare la misura durante il processo di digitalizzazione

del segnale. Piú l'ADC ha risoluzione elevata piú puó essere influenzato dal rumore che fará variare il segnale e quindi modificare il valore di uscita del processo di conversione. Il rumore generato a livello elettronico é quello piú significativo poiché puó essere prodotto dall'amplificazione del segnale in uscita dal ponte di Wheatstone: quindi é importante scegliere un'amplificazione con CMRR alto in modo da ridurre gli errori dovuti al rumore.

Per ridurre questo problema é necessario utilizzare componenti a basso rumore interno, ma puó essere utile inserire un filtro di tipo passa basso nella catena di acquisizione.

Il filtro oltre ad andare ad agire sul rumore va a modificare anche la risposta dinamica del sistema infatti, tramite la nota relazione che lega la banda passante del sistema con il tempo di salita, riducendo la banda del sistema si va ad aumentare il tempo di salita, perció quello che otterremo sará un sistema piú lento nel tempo [12]. Abbiamo perció due aspetti uno in contrasto con l'altro. Si vorrebbe infatti una banda molto piccola per ridurre il piú possibile il rumore nel sistema ed un tempo di salita ridotto per avere un sistema pronto e veloce.

3.7 *Sistemi di trasferimento dei dati*

Al giorno d'oggi é possibile trovare in commercio sia sistemi di collegamento cablati e sistemi wireless di trasmissione dei dati. I sistemi cablati, sono tutt'ora usati soprattutto nel caso si debbano usare molti estensimetri che verranno collegati ad un sistema di acquisizione e memorizzazione dati, come é possibile vedere dalla figura. I vantaggi sono:

* robusti ai segnali esterni, con cavi schermati, o twistati, non si hanno distorsioni di segnale dovute a onde elettromagnetiche

* si possono percorrere lunghe distanze, centinaia di metri

Gli svantaggi sono dovuti al fatto che il sistema é:

* costoso

* ingombrante a corto raggio per via della sovrapposizione dei cavi

I sistemi wireless vengono impiegati nel caso in cui ci sono pochi estensimetri in uso. Il blocco di condizionamento prevede anche una parte dedicata all'invio del segnale tramite frequenze radio. Il vantaggio principale é a livello economico perché si evita l'uso di cavi; ma si ha anche un vantaggio a livello

[12] Si ricorda che il tempo di salita e la banda passante é: $t_s * B_3 = K$, dove $K \simeq 0,4$

di ingombro dei cavi a corto raggio. Tra gli svantaggi dei sistemi wireless si ha:

- qualitá del segnale inferiore; infatti dipende dalla distanza tra il trasmettitore e il sistema ricevitore. Nel tragitto il segnale puó essere distorto da altri segnali elettromagnetici, per cui il sistema deve prevedere un sistema di controllo dei dati inviati

- raggio limitato: infatti per un sistema di tipo IEEE 802.11b[13] si puó arrivare a circa 100m in caso ideale, realmente si arriva a qualche decina di metri; questo é dovuto al livello di inquinamento elettromagnetico.

3.8 Sistemi di acquisizione digitali

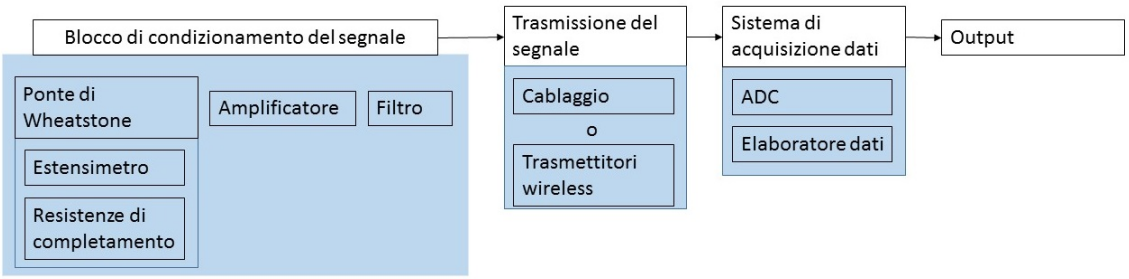
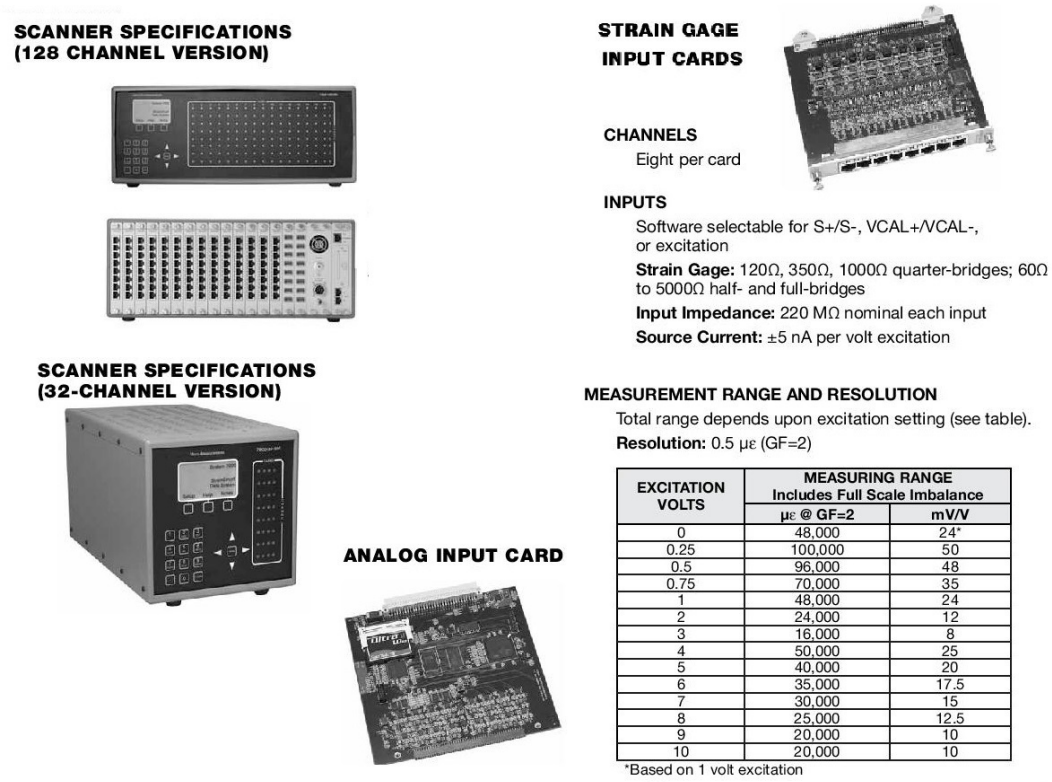


Fig. 3.14: Sistema di misura

Come si puó vedere dallo schema, mostrato in figura 3.14, per effettuare la misurazione della deformazione di un componente sotto carico bisogna costruire una catena di misura abbastanza complessa. Al giorno d'oggi, come si é giá detto precedentemente si hanno delle centraline estensimetriche che contengono tutto il necessario per effettuare la misurazione. In figura 3.15 si mostra uno scanner che permette l'acquisizione di dati direttamente dall'estensimetro, condizionando il segnale e convertendolo per poter inviarli direttamente ad un PC esterno per la memorizzazione e la rielaborazione.

Lo scanner, mostrato in figura 3.15, é composto da schede analogiche e schede di input per gli strain gage. Le schede hanno la funzione di acquisire i dati, convertirli da analogici a digitali e quindi memorizzarli in schede di memoria; praticamente sono l'unione del blocco di condizionamento e del sistema di acquisizione dati che nell'immagine 3.14 erano separati.

[13] standard di comunicazione WLAN



EXCITATION VOLTS	MEASURING RANGE Includes Full Scale Imbalance	
	με @ GF=2	mV/V
0	48,000	24*
0.25	100,000	50
0.5	96,000	48
0.75	70,000	35
1	48,000	24
2	24,000	12
3	16,000	8
4	50,000	25
5	40,000	20
6	35,000	17.5
7	30,000	15
8	25,000	12.5
9	20,000	10
10	20,000	10

Fig. 3.15: La figura mostra un sistema di acquisizione dati: in particolare si ha il modello con 128 canali e 32 canali con una risoluzione di 24-bit per entrambi. Nella figura si trovano anche le schede di ingresso analogica e di ingresso per gli strain gage: per quest'ultima sono riportati alcuni dati tecnici.

La scheda analogica di ingresso, in figura 3.15, puó costituire il ponte d'eccitazione (in ogni sua configurazione) e calibrarlo, puó condizionare il segnale (filtrandolo e amplificandolo) prima di inviarlo alla scheda di input per gli strain gage. Questa avrá il compito di convertire il segnale da analogico e digitale per poi inviarlo tramite l'ingresso Ethernet. Questo sistema di acquisizione puó essere collegato ad un PC, o un Laptop, con delle caratteristiche tecniche di base, legate alla velocitá di elaborazione e alla memorizzazione esterna di dati, per permettere la rielaborazione in un seconda momento. Il sistema preso ha bisogno almeno di un PC dotato di una CPU Intel Core-2, una RAM di 4 GB e almeno 20 GB liberi di ROM. Per la rielaborazione dei dati serve un software prodotto dall'azienda produttrice del sistema di acquisizione.

CONCLUSIONI

In questo lavoro si é voluta concentrare l'attenzione sulle scelte da fare per realizzare la prima parte della catena di misura per tensioni superficiali, sfruttando come sensori estensimetri a resistenza elettrica. Per poter ottenere una buona stima del valore reale si deve prestare attenzione a che tipo di sensore usare e come applicarlo, a come impostare il ponte di Wheatstone e il blocco di condizionamento.

Dall'analisi eseguita si é riscontrato che ci sono molti fattori che possono portare alla nascita di errori non trascurabili; in primo luogo si deve prendere in considerazione il variare della temperatura poiché la resistivitá cambia in funzione di essa. Un'ulteriore problema che é stato affrontato riguarda l'applicazione dell'estensimetro: é importante che sia disposto in maniera tale da essere realmente sollecitato dalla tensione superficiale agente in quel punto del componente meccanico. É peró possibile ridurre al minimo questo problema sfruttando leghe metalliche che hanno coefficienti di dilatazioni minori o estensimetri autocompensati, oppure attraverso un'elaborazione dati successiva, come visto nei paragrafi 2.2.3 e 2.5.

Per ottenere il segnale, da cui stimare la misura, bisogna strutturare il ponte di Wheatstone. A seconda delle sollecitazioni agenti é bene disporre gli estensimetri come nella figura 3.5: ogni tipo di collegamento ha riportato a lato per quale tipo di sollecitazione puó essere utilizzata la configurazione e quanto vale la deformazione misurata in funzione della tensione applicata e della tensione misurata. Si ricorda, inoltre, che si dovrá bilanciare il ponte, come illustrato nella sezione 3.2.

Come visto nei paragrafi relativi all'amplificazione del segnale e dei filtri, é importante ridurre il piú possibile il livello dei disturbi e del rumore che viene introdotto da questi stadi di elaborazione analogica; sará dunque importante scegliere amplificatori con CMRR elevato. L'utilizzo di filtri aiuta a diminuire il valore del rumore introdotto dagli stadi precedenti, peró modifica il segnale. Infatti é ben nota la relazione che lega la banda passante del sistema con il tempo di salita: riducendo la banda del sistema, in altre parole cercando di eliminare i disturbi, si va ad aumentare il tempo di salita, perció quello che otterremo sará un segnale modificato.

Eseguire misure non é un'attivitá semplice perché piccole variazioni o

disattenzioni possono essere sorgente di errori importanti. É dunque bene analizzare e scegliere con particolare cura le attrezzature da utilizzare in modo da rilevare risultati soddisfacenti, in altre parole ottenere una stima prossima al valore reale.

ELENCO DELLE FIGURE

1.1 Sistemi di riferimento 9

2.1 Estensimetro elettrico 13
2.2 Vari tipi di strain gauges 21
2.3 Le figure mostrano vari tipi di estensimetri: la figura a) mostra una rosetta disposta a 45 gradi, la figura b) mostra una rosetta a 60 gradi, c) mostra una coppia sovrapposta di estensimetri, d) mostra una rosetta sovrapposta a 45 gradi, e) mostrano due estensimetri a 90 gradi, f) é una rosetta delta 23
2.4 Manuale d'uso per incollaggio degli estensimetri con M-BOND 200, Luchsinger s.n.c. 29

3.1 Circuito di Condizionamento 34
3.2 La figura mostra i blocchi di condizionamento del segnale prodotti dalla Micro Measurements. Questi sistemi possono essere collegati a tutte le configurazioni del ponte di Wheatstone e hanno la possibilitá di regolare l'amplificazione e filtrare la tensione di uscita. 35
3.3 Ponte di Wheatstone 36
3.4 La figura mostra i collegamenti **a)** a quarto di ponte, **b)** a mezzo ponte e **c)** a ponte intero 39
3.5 La figura mostra vari tipi di configuazioni per ricavare, a seconda della sollecitazione esterna, la deformazione superficiale misurata dal ponte 42
3.6 I cavi di collegamento introducono delle resistenze aggiuntive che modificano il ponte 43
3.7 Risoluzione per configurazione a quarto di ponte 44
3.8 Risoluzione per configurazione a mezzo ponte 45
3.9 Nelle figure sono rappresentate le due tipologie di alimentazione del ponte di Wheatstone. 46
3.10 Tester per installazione del ponte estensimetrico, prodotto dalla Micro Measurements 48
3.11 La figura mostra la configurazione standard 49

3.12 La figura rappresenta la configurazione migliore 50
3.13 La figura mostra la configurazione di un amplificatore per strumentazione 51
3.14 Sistema di misura 54
3.15 La figura mostra un sistema di acquisizione dati: in particolare si ha il modello con 128 canali e 32 canali con una risoluzione di 24-bit per entrambi. Nella figura si trovano anche le schede di ingresso analogica e di ingresso per gli strain gage: per quest'ultima sono riportati alcuni dati tecnici. 55

BIBLIOGRAFIA

[1] M. Bertocco and A. Sona, Introduzione alle misure elettroniche. online: www.lulu.com, 2nd ed., 2012.

[2] R. C. Jaeger and T. N. Blalock, Microelettronica. McGraw-Hill, 3nd ed., 2009. ISBN 978-88-386-6504-2.

[3] M. Quaresimin and N. D. Rossi, Introduzione all'estensimetria applicata alla misura di deformazioni e carichi. Documentazione online.

[4] Ing. E. Zappa, Misure di deformazione meccanica. Documentazione online.

[5] S. Cova, Estensimetri o strain gauge. documentazione online. http://home.dei.polimi.it/.

[6] A. Ajovalasit, Estensimetri elettrici a resistenza. Aracne,2nd ed, 2008.

[7] J. Karki, Signal Conditioning Wheatstone Resistive Bridge Sensors. Documentazione online.

[8] A. Bemporad, Sensori di deformazione. Documentazione online.

[9] Estensimetria e fotoelasticitá. Luchsinger srl, 2014. Documentazione online.

[10] Strain Indicator and Recorder. Vishay Precision Group, 2011. Documentazione Online http://www.vishaypg.com/.

[11] Signal Conditioning Amplifier. Vishay Precision Group, 2014. Documentazione Online http://www.vpgsensors.com/