

# MISURE DI DEFORMAZIONE MECCANICA

## Estensimetri

Misure estensimetriche sono misure che riguardano la deformazione. Le deformazioni locali di struttura sono proporzionali agli sforzi locali. Misurare le deformazioni permette di stimare gli sforzi e misurare altre grandezze (stimo la forza in funzione alla deformazione). La deformazione è la variazione di lunghezza per unità di lunghezza, lo sforzo invece è il prodotto tra la deformazione e il modulo elastico di Young. La deformazione è adimensionale. La misura di deformazione superficiale viene eseguita mediante dei trasduttori chiamati estensimetri. Vediamo ora le caratteristiche di un estensimetro:

- La costante di taratura dell'estensimetro deve essere stabile e non variare nel tempo, per effetti termici o altri fattori ambientali
- Deve misurare la deformazione locale e non quella media, quindi deve misurare lo spostamento relativo tra due punti molto vicini
- Deve avere una buona risposta in frequenza, si desidera una misura istantanea e quindi una misura rapida
- Deve essere economicamente accessibile per permetterne un largo impiego poiché molto spesso non si analizzano le deformazioni in un unico punto della struttura, ma in molti punti

Esistono diversi tipi di estensimetri:

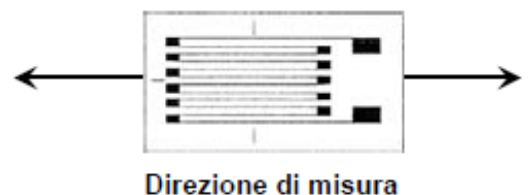
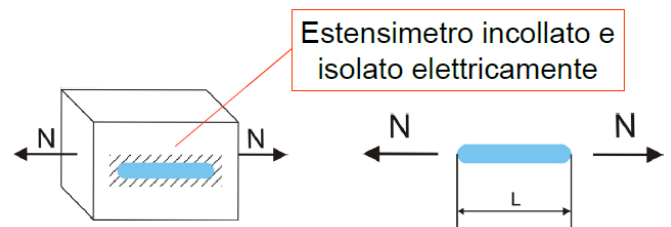
- Meccanici = sfruttano il principio della leva meccanica
- Ottici = sfruttano il principio della leva ottica
- Acustici = sfruttano variazioni di frequenza propria di una corda con la tensione
- A resistenza elettrica = sfruttano la variazione di resistenza di un conduttore con la deformazione

## Estensimetri a resistenza elettrica

Gli estensimetri elettrici funzionano con un semplice principio di funzionamento: si prende un filo conduttore e lo si incolla sul materiale e viene isolato elettricamente. Se si sottopone il materiale a trazione il conduttore, essendogli incollato, si allunga e si striziona così la sua sezione che diventa più piccola. Il filo conduttore varierà la sua resistenza poiché si modifica la lunghezza e contemporaneamente la sezione del conduttore. Ricordiamo che la resistenza di un materiale si calcola come:

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

La resistenza dipende quindi da due fattori che sono legati alla deformazione: lunghezza e sezione del conduttore. La resistenza dipende però anche dalla resistività che dipende da una serie di elementi quali la temperatura. L'estensimetro è un filo che, anziché avere un'unica linea, è costituita da un filo fatto a griglia. Il filo dell'estensimetro è montato su del materiale plastico che rappresenta l'appoggio e prende il nome di supporto. È importante sottolineare che gli estensimetri misurano solo deformazioni superficiali nella sola direzione della griglia. Generalmente hanno valori di resistenza nominale pari a 120 o 350  $\Omega$  e hanno una base, cioè la lunghezza di un filo della griglia o meglio è la lunghezza dei fili sensibili della deformazione, compresa tra gli 0,6 e gli 200 mm. I punti di inversione di direzione del filo nella griglia sono fatti con un materiale più spesso perché la resistenza elettrica di tratti grossi è molto molto piccola e quindi il suo effetto è trascurabile sulla resistenza complessiva calcolata. I terminali dell'estensimetro possono essere fissati alla piazzola o possono essere a filo. Generalmente sui supporti vengono messi dei segni di riferimento che indicano la mezzeria dello strumento in

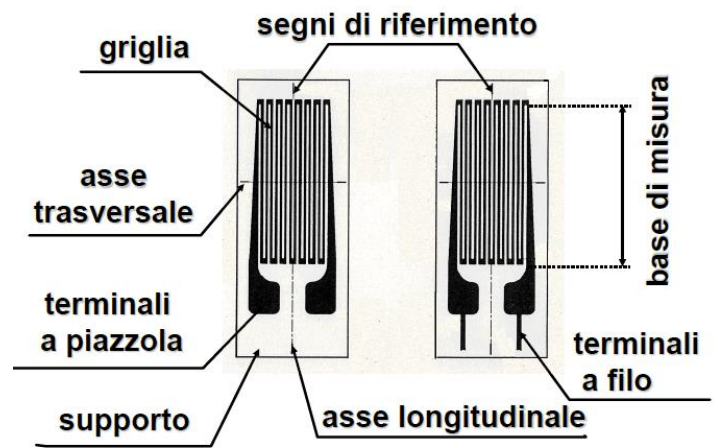


ambo le dimensioni così da poterlo posizionare nel migliore modo possibile. estensimetri elettrici vengono realizzati con la fotoincisione. Estensimetri con fili inclinati servono per misurare deformazioni torsionali.

### Applicazione degli estensimetri

Il montaggio dell'estensimetro, che risulta una procedura molta particolare e che richiede un esame e una certificazione, si divide in queste fasi:

- Abrasione con carta vetrata della zona di applicazione = serve per rimuovere eventuali residui od ossidi. È un passaggio importante perché se l'estensimetro non si incolla bene sulla superficie dell'oggetto non si deformerà con il pezzo e quindi fornirà misure errate
- Pulizia della zona di applicazione, solitamente con acetone, per facilitare così l'incollaggio
- Posizionamento dell'estensimetro = per posizionare correttamente l'estensimetro, senza rischiare che l'adesivo secchi prima del corretto posizionamento, normalmente si usa dello scotch
- Applicazione dell'adesivo = si stacca una parte dello scotch, si mette l'adesivo e infine si riposiziona l'estensimetro nella posizione voluta. Una volta applicato l'adesivo, si riposiziona l'estensimetro semplicemente riattaccando il lato di scotch che avevamo staccato
- Pressione sull'estensimetro = si effettua una pressione sull'estensimetro così da far aderire bene tutti i punti
- Saldatura dei terminali
- Saldatura e fissaggio dei cavi
- Applicazione del protettivo che ha la funzione di proteggere l'estensimetro da acqua o umidità, ad esempio

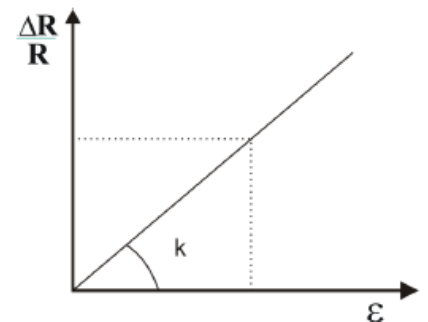


### Sensibilità dell'estensimetro

Definiamo la sensibilità come il rapporto tra l'uscita e l'ingresso di un sistema di misura. Nel nostro caso si definisce sensibilità del singolo estensimetro la grandezza adimensionale che indica il rapporto tra la variazione di resistenza relativa e la deformazione:

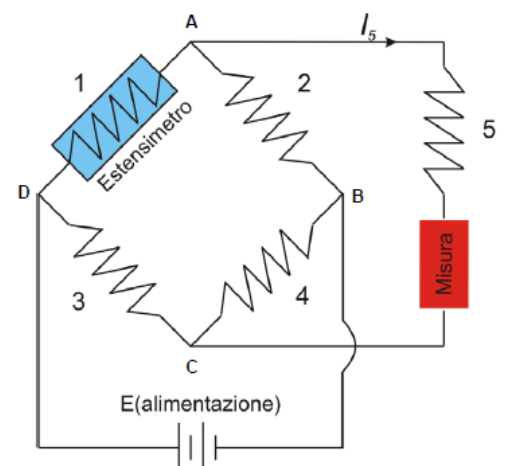
$$k = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\epsilon}$$

Graficamente essa rappresenta una retta. Negli estensimetri a conduttori generalmente k è pari a 2, per gli estensimetri a semiconduttore invece vale 100. La sensibilità è massimizzata nella direzione di misura e minimizzata nella direzione ortogonale.



### Ponti di Wheatstone

La variazione di resistenza elettrica dell'estensimetro è in genere molto limitata e dunque difficile da misurare con precisione. Si utilizza quindi un circuito, chiamato Ponte di Wheatstone che permette di leggere anche le più piccole variazioni della resistenza elettrica. Di fatto è un circuito elettrico romboidale che viene realizzato chiudendo in una maglia 4 resistenze, una delle quali è proprio l'estensimetro cioè, appunto, una resistenza variabile. Una diagonale di questo rombo viene alimentata con una tensione E, mentre l'altra diagonale permette di effettuare la misura o di corrente o di tensione. Nel disegno a fianco la diagonale DB è alimentata dalla tensione E, mentre la diagonale AC permette di effettuare la misura desiderata.



Se le resistenze sono identiche, la tensione di alimentazione  $E$  comporterà una caduta di potenziale pari a  $E/2$  sulle quattro resistenze: notiamo che le resistenze  $R_1$  e  $R_3$  sono in serie così come  $R_2$  e  $R_4$ . La differenza di potenziale tra A e C sarà dunque nulla e quindi non verrà misurata nessuna corrente. Se le quattro resistenze invece non sono uguali si creerà una differenza di potenziale tra i capi AC che comporterà una certa quantità di corrente passante nella diagonale di misura. Tale variazione di corrente non è lineare. Condizione necessaria e sufficiente alla linearità è la condizione di azzeramento del ponte:

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \rightarrow I_5 = 0$$

Nel caso di azzeramento del ponte non si ha corrente circolante nella diagonale di misura. Se il ponte non è inizialmente bilanciato e una delle resistenze subisce una variazione, la tensione, o corrente, di uscita non è proporzionale alla variazione di quella resistenza. Se invece si parte dalla condizione di ponte bilanciato si ha linearità tra le variazioni di resistenza e la corrente, o tensione, vista sulla diagonale di misura.

La misura della resistenza grazie all'uso del ponte può essere effettuata in due diversi modi:

1. Misura per deflessione o sbilanciamento (effettuata con il voltmetro) = si misura la tensione sulla diagonale di misura. In questo caso il ponte, partendo da una situazione bilanciata, ha un legame lineare tra  $\Delta R_1$  e  $\Delta V_5$ :

$$\Delta I_5 = \frac{1}{R_5} \frac{E \Delta R_1}{4 R_1}$$

$$\Delta V_5 = \frac{E \Delta R_1}{4 R_1}$$

Vediamo ora quali sono i passi necessari per effettuare tale misura:

- Si parte dal ponte azzerato
  - Si carica il ponte
  - Si misura la variazione di tensione
  - Si ricava la variazione dell'estensimetro che è pari alla variazione della resistenza
2. Misure per azzeramento (effettuata con il galvanometro) = si misura la questa variazione della resistenza  $R_2$  necessaria a riportare il ponte in una situazione di equilibrio. Si ha una situazione di non equilibrio perché, partendo da una situazione bilanciata, è stato modificato il valore di una resistenza e ciò genera un passaggio di corrente nella diagonale di misura perché avrà una tensione diversa da 0:

$$\Delta I_5 = \frac{E \Delta R_1}{2R_1^2 + R_2 R_1}$$

Vediamo ora quali sono i passi necessari per effettuare tale misura:

- Si parte dal ponte azzerato
- Si carica e si legge una corrente sulla diagonale di misura
- Si modifica una resistenza, diversa dall'estensimetro, in modo da annullare la corrente circolante
- La variazione di resistenza applicata è pari alla variazione subita dell'estensimetro

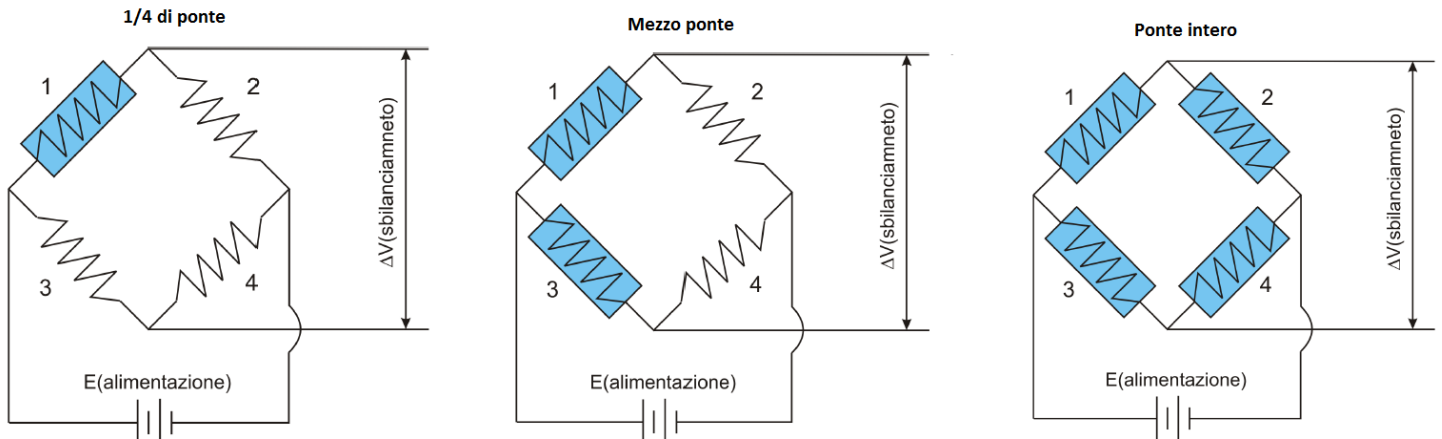
È importante sottolineare che a causa del doppio azzeramento le misure per azzeramento si prestano solo per misure statiche e non dinamiche. Tipicamente il metodo di misura più utilizzato è quello per deflessione.

L'alimentazione  $E$  influenza, ovviamente, la misura della tensione sulla diagonale: maggiore la tensione di alimentazione maggiore sarà la corrente passante nel ponte. Ciò comporta però un problema di surriscaldamento. Proprio per questo motivo i valori tipici dell'alimentazione sono compresi tra 1 e 5 V.

Esistono diverse configurazioni di ponte:

- 1/4 di ponte: una sola resistenza è un estensimetro
- Mezzo ponte: due lati contigui sono estensimetri e due sono resistenti normali contigue

- Ponte intero: si hanno quattro estensimetri



La legge che descrive la variazione di tensione sulla diagonale di misura è l'equazione che regge il ponte. Questa equazione ci permette di legare la variazione di uscita del ponte stesso, con la variazione di resistenza di ciascuno dei 4 lati:

$$\Delta V = \frac{E}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_4}{R_4} - \frac{\Delta R_3}{R_3} \right)$$

Dove  $R_1, R_2, R_3, R_4$  sono le resistenze quando il ponte è azzerato mentre  $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$  sono le variazioni di resistenze quando il ponte non è bilanciato. Si può notare che gli effetti sui lati opposti del ponte si sommano mentre le variazioni su lati contigui si sottraggono. Se le variazioni sui lati opposti sono le medesime si ha una doppia sensibilità perché:

$$\Delta V = \frac{E}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_4}{R_4} - \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) = \frac{E}{4} \left( 2 \frac{\Delta R}{R} \right)$$

Se sono uguali tra loro le variazioni su lati contigui si possono eliminare gli effetti indesiderati perché la tensione è nulla:

$$\Delta V = \frac{E}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_4}{R_4} - \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) = 0$$

Dunque le variazioni di resistenze relativi a lati contigui si sottraggono mentre le variazioni si resistenze relative a lati opposi si sommano.

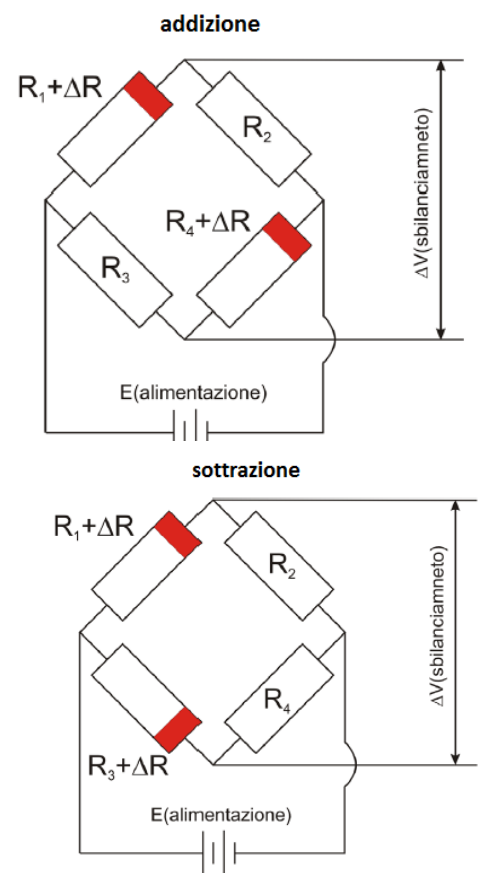
### Effetti della temperatura

Con l'aumento della temperatura l'estensimetro si danneggia e inoltre influenza tre fattori: sensibilità, coefficiente di dilatazione e resistività. Analizziamo più approfonditamente questi due casi:

1. La sensibilità dell'estensimetro elettrico in generale varia al variare della temperatura = spesso queste variazioni sono trascurabili per oscillazioni termiche dell'ordine di alcuni gradi, tuttavia è necessario tenerle in conto, soprattutto quando è necessario avere un'incertezza di misura molto contenuta. Si definisce dunque il coefficiente di temperatura del fattore di taratura:

$$\beta_k = \frac{k_T - k}{k} \frac{1}{\Delta T}$$

Dove:  $k$             fattore di taratura alla temperatura di riferimento  
 $k_T$             fattore di taratura alla temperatura di prova



$\Delta T$  variazione di temperatura subita dal provino

2. La griglia dell'estensimetro varia la sua lunghezza in funzione della temperatura = durante la fase di misurazione potrebbe non essere trascurabile la differenza di coefficiente di dilatazione fra il materiale che costituisce la griglia dell'estensimetro e il materiale del pezzo di cui si vuole misurare le deformazioni. A seguito di una variazione di temperatura si ha una dilatazione termica diversa tra estensimetro e pezzo e questo induce una misura fittizia, nel senso che si misurano le deformazioni anche se il pezzo non è sottoposto a sforzo. Il coefficiente di deformazione differenziale o coefficiente di dilatazione si calcola come:

$$\varepsilon_{di} = (\alpha - \alpha_e)\Delta T$$

Dove:  $\alpha$  coefficiente di dilatazione termica lineare del pezzo  
 $\alpha_e$  coefficiente di dilatazione termica lineare dell'estensimetro  
 $\Delta T$  variazione di temperatura subita dal provino

3. La resistività del materiale di cui è costituita la griglia dell'estensimetro dipende dalla temperatura e quindi le variazioni termiche inducano variazioni della resistenza elettrica dell'estensimetro, anche se non vi è alcuna variazione della deformazione. Vediamo analiticamente come la resistività cambia con la temperatura e quindi come la resistenza varia:

$$\rho = \rho_0(1 + \beta\Delta T)$$

$$R = R_0(1 + \beta\Delta T)$$

È possibile stimare la deformazione apparente data dalla variazione della temperatura T:

$$\varepsilon_{\alpha,\rho} = \frac{\Delta R/R}{k} = \frac{R - R_0}{R_0 k} = \frac{\beta\Delta T}{k}$$

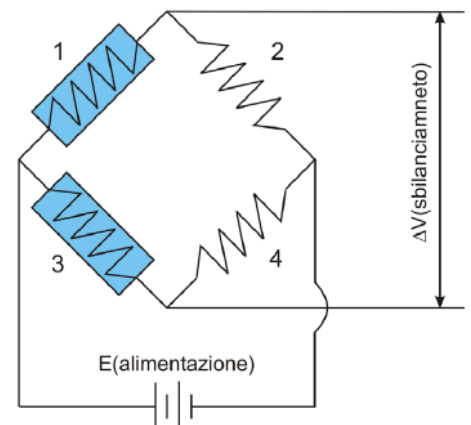
Condensando tutti questi effetti in un'unica equazione si ottiene l'espressione della deformazione apparente in funzione della variazione della temperatura:

$$\varepsilon_a = \left( \frac{\beta}{k} + (\alpha - \alpha_e) \right) \Delta T$$

$\varepsilon_a$  è proprio la deformazione indicata da un estensimetro installato su un provino soggetto ad una variazione uniforme di temperatura, libero di deformarsi e non soggetto a sollecitazioni. Estensimetri per cui  $\alpha = \alpha_e$  oppure  $\frac{\beta}{k}$  si compensa con  $(\alpha - \alpha_e)\Delta T$  sono detti estensimetri autocompensati.

### Estensimetri compensatori

Per compensare gli effetti della variazione di temperatura è possibile usare gli estensimetri compensatori. Questo è un estensimetro elettrico, uguale a quello incollato sul pezzo da misurare, ma applicato su una porzione di materiale non sollecitato. Il pezzo non sollecitato deve essere dello stesso materiale del pezzo da misurare ed essere sottoposto alle stesse variazioni termiche del pezzo da misurare. In questo modo gli effetti termici si applicano a entrambi i pezzi: quello da misurare e quello scarico. Essendo i 2 estensimetri collegati su due lati contigui del ponte di Wheatstone, gli effetti si sottraggono. L'estensimetro sul pezzo da misurare rileva sia le deformazioni meccaniche, sia quelle termiche. L'estensimetro compensatore rileva solo le deformazioni termiche. La differenza fra i 2 estensimetri permette di misurare solo le deformazioni meccaniche, compensando quelle termiche.

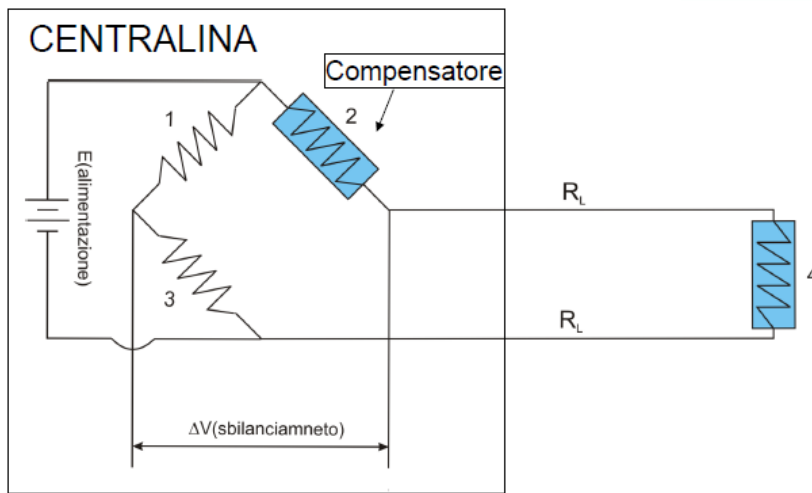


### Collegamenti tra estensimetri e centralina

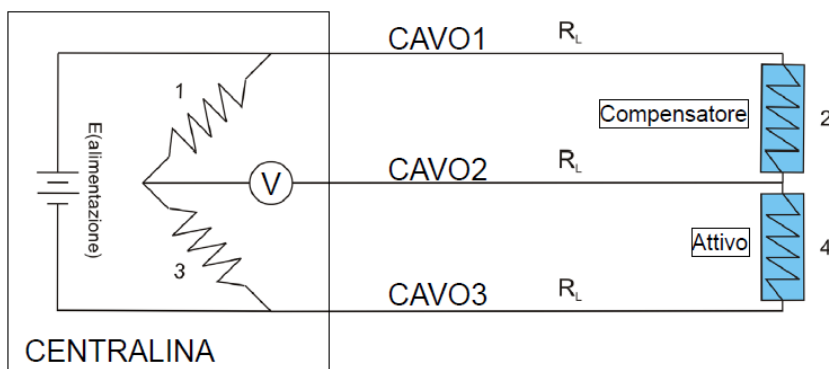
I collegamenti degli estensimetri alla centralina sono importanti per la qualità della misura, in particolare quando la lunghezza dei cavi di collegamento non è trascurabile. Infatti la resistenza elettrica dei cavi influenza la misura, soprattutto quando le variazioni termiche inducono variazioni di resistenza elettrica sui cavi, e quindi inducono delle variazioni della lettura che non sono dovute a deformazioni. Vediamo ora diversi casi:

1. Compensatore vicino = se l'estensimetro di misura ( $R_4$ ) è lontano dal ponte, si deve tener conto delle resistenze dei cavi. Il problema non è la resistenza dei cavi ( $R_L$ ) ma la variazione della resistenza  $R_L$  con la temperatura. Infatti se cambia la temperatura, si modifica  $R_L$  (variazione di resistività) e quindi si ha una variazione della lettura del ponte, che non dipende dalla deformazione di  $R_4$  ma solo dalla temperatura. In questo caso si hanno dunque variazioni di resistenza dei cavi  $\Delta R_L$  non compensate. Inoltre si può notare che  $R_L$  sono in serie alla resistenza dell'estensimetro e dunque si ha minor variazione percentuale di resistenza:

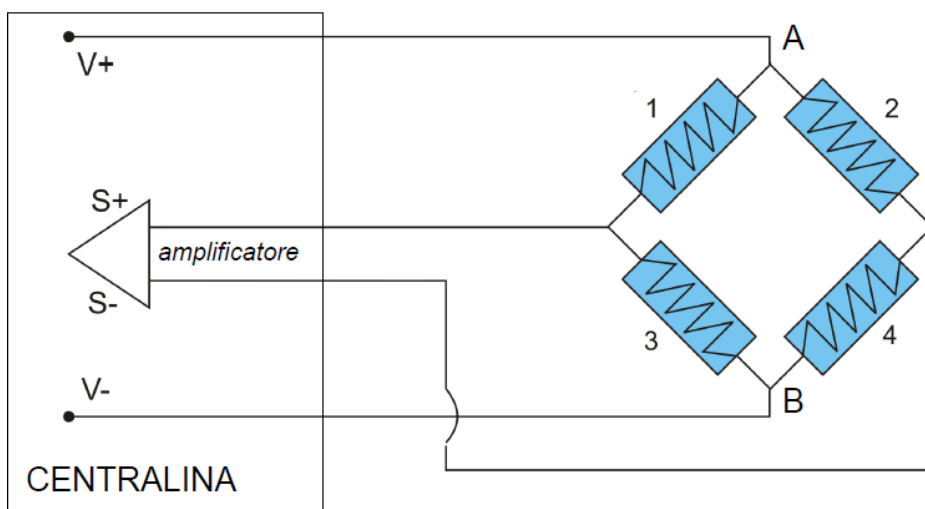
$$\frac{\Delta R_L + \Delta R_{est}}{R_L + R_{est}} \neq \frac{\Delta R_{est}}{R_{est}}$$



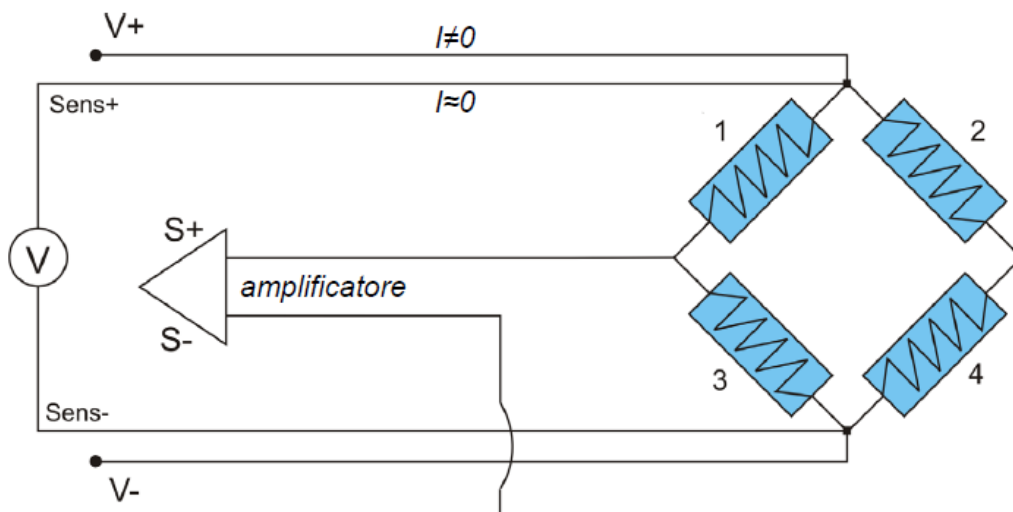
2. Collegamento a 3 fili = nel caso di collegamento a 3 fili, il compensatore è vicino all'estensimetro di misura. In questo modo le variazioni di resistenza dei cavi CAVO1 e CAVO3 sono rispettivamente in serie a  $R_2$  e  $R_4$ . Sono cioè su lati contigui del ponte: i rispettivi effetti si compensano per le proprietà del ponte (e quindi le variazioni termiche a carico dei cavi 1 e 3 non hanno effetto sulla misura). Il CAVO2 invece, essendo sulla diagonale di misura, si trova in serie al voltmetro. Dato che il voltmetro ha una impedenza di ingresso molto elevata (ordine di  $10^6$  ohm almeno), la resistenza del CAVO2 è trascurabile. Quindi anche se la resistenza del CAVO2 varia con la temperatura, non influenza la misura. In sintesi, con questa configurazione, le variazioni termiche sui cavi 1, 2 e 3 e quelle sugli estensimetri (lati 2 e 4 del ponte) non hanno effetto sulla misura. Quindi tutto ciò che succede sul lato 4 per la temperatura è uguale a quello che succede su lato 2 ed essendo su lati contigui si sottrae.



3. Collegamento a 4 fili = nel collegamento a 4 fili l'intero ponte è in prossimità del punto di misura; i cavi di collegamento con la centralina possono essere lunghi. Se i cavi sono corti, la tensione di alimentazione generata dalla centralina si applica senza cadute apprezzabili alla diagonale di alimentazione AB. Se invece i cavi sono lunghi, la tensione sulla diagonale di alimentazione è inferiore a quella generata dalla centralina, per via della caduta di potenziale sui cavi di alimentazione. Il problema è che, se si ha caduta di potenziale sui cavi di alimentazione, non si conosce esattamente la tensione di alimentazione reale del ponte. Questo è causa di errore nella misura perché lo sbilanciamento del ponte è legato alla deformazione del pezzo da misurare ma nella formula compare la tensione di alimentazione del ponte. La tensione di alimentazione da considerare è quella realmente applicata al ponte, quindi non quella generata dalla centralina ma quella al netto delle cadute di potenziale sui cavi di alimentazione. In pratica si pensa di alimentare a  $V_0$  il ponte e invece alimento ad esempio a  $V_0 - dV$ , dove  $dV$  è la caduta sui cavi. Quindi non misuro correttamente. Quindi questa soluzione è corretta solo se i cavi sono corti perché non si ha una caduta di tensione sui fili dell'alimentazione apprezzabile



4. Collegamento a 6 fili = il collegamento a 6 fili risolve il problema del collegamento a 4 fili, perché si hanno 2 fili aggiuntivi, detti di *sensing*, che servono per misurare la reale tensione di alimentazione del ponte. Sui cavi di sensing la caduta di potenziale è trascurabile, perché sono in serie al voltmetro, quindi la corrente circolante sui cavi di sensing tende a zero, per questo la caduta di potenziale lungo i cavi di sensing è trascurabile. Questa soluzione è corretta se i cavi sono lunghi perché si misura l'effettiva tensione di alimentazione sulla diagonale del ponte.



## Taratura dell'estensimetro

La taratura di un sistema di questo tipo può essere fatta a diversi livelli:

- Taratura dell'estensimetro = in questo tipo di taratura lo scopo è ricavare il  $k$  dell'estensimetro. Gli estensimetri elettrici per essere utilizzati devono essere incollati, non è poi più possibile staccarli. Per questo motivo non è possibile tarare un estensimetro e poi venderlo. Si fa quindi una taratura statistica, su un campione del lotto prodotto. Si scelgono il 2-3% degli estensimetri prodotti e si tarano quelli. Poi il resto del lotto è venduto con caratteristiche metrologiche estratte dal campione tarato. Il 2-3% sono tarati tramite una taratura diretta.
- Taratura del ponte e della catena di misura:
  - Resistenza in parallelo = si conosce il valore della resistenza  $R_2$  di un lato del ponte; se si applica in parallelo a  $R_2$  una resistenza nota  $R_c$ , si ottiene un valore di resistenza che è il parallelo fra  $R_2$  ed  $R_c$ , che è un valore noto. In questo modo si genera una variazione nota della resistenza del lato 2 (originariamente  $R_2$ , dopo il parallelo  $R_2$ parallelo $R_c$ ). Una variazione di resistenza nota, simula una deformazione nota, detta epsilon elettrica perché generata con tecniche elettriche. Se si misura la variazione di tensione generata dalla epsilon elettrica si può stimare il guadagno dell'amplificatore, e quindi tarare il ponte. Attenzione: se si hanno più lati attivi, occorre tener conto che la variazione di resistenza in taratura è imposta ad un solo lato (simulo  $K_b=1$ ), mentre poi in misura si avrà un  $K_b$  diverso. In questo tipo di taratura si sfrutta dunque la deformazione meccanica simulata, non reale perché viene generata da una resistenza in parallelo e non dalla trazione di una trave, ad esempio. Di fatto si simula una deformazione in maniera elettrica:

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = k \varepsilon_{EL}$$

$$V_L = \frac{E}{4} \left( \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) = \frac{E}{4} (k \varepsilon_{EL})$$

- Calibratori interni = stesso principio di funzionamento della resistenza in parallelo. La differenza è che in questo caso la resistenza è inclusa nella centralina e c'è in genere un pulsante per metterla in parallelo ad un lato. Normalmente i calibratori interni generano uno sbilanciamento noto pari a 1 mV/V
- Calibratori esterni = anche in questo caso il principio di funzionamento è il medesimo della resistenza in parallelo e del calibratore interno. Anziché però mettere la resistenza in parallelo all'intero della centralina, si stacca l'estensimetro e lo si sostituisce con una nuova resistenza: quindi un calibro esterno viene inserito al posto dell'estensimetro.

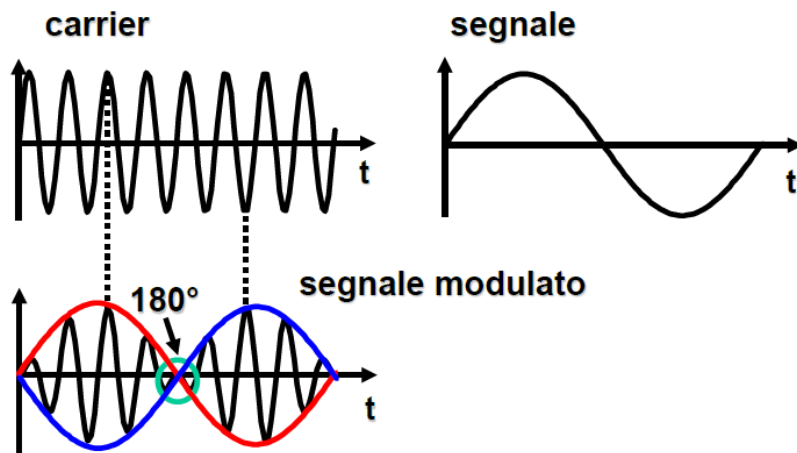
## Alimentazione in corrente alternata del ponte

Fino ad ora abbiamo sempre parlato in modo implicito di ponti alimentati a corrente continua. In realtà però la maggior parte dei ponti viene alimentata in corrente alternata; questo perché la corrente continua implica spesso dei problemi di deriva termica e, inoltre, gli amplificatori in grado di lavorare con segnali in corrente continua sono piuttosto costosi. È importante sottolineare che in corrente alternata si lavorerà non più con delle semplici resistenze, ma con delle impedenze. Se si alimenta il ponte in corrente alternata il segnale sarà armonico; la frequenza è dell'ordine del kilohertz di solito. Della sinusoide, che sarà caratterizzata da una certa frequenza, di solito dell'ordine dei kilohertz, l'informazione che ci interessa maggiormente è l'ampiezza; tale grandezza risulta essere proporzionale alle deformazioni. Il valore medio della sinusoide non è un valore importante perché dipende dalla deriva; la grandezza interessante invece è la distanza picco-picco o zero-picco. Generalmente conviene effettuare le misure statiche con la corrente alternata mentre le misure dinamiche possono essere effettuate con entrambi i metodi. Un ponte alimentato in corrente alternata avrà come condizione di bilanciamento:

$$Z_2 Z_3 - Z_1 Z_4 = 0$$



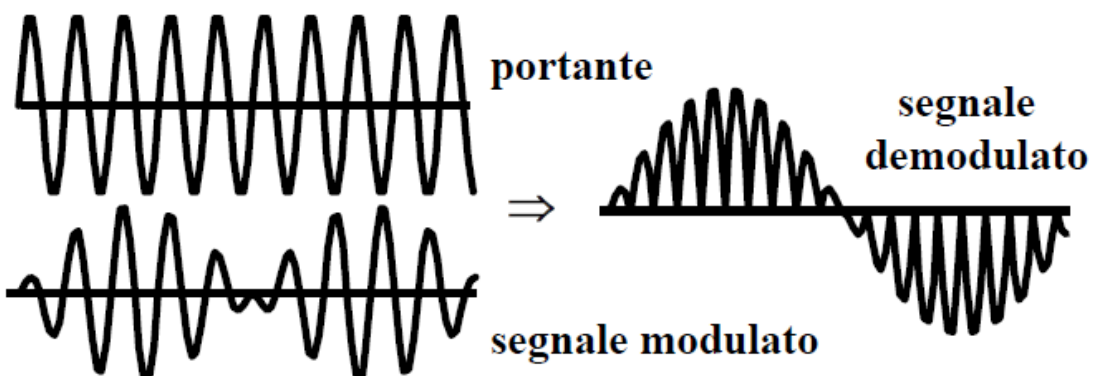
Il segnale del generatore, cioè il segnale di alimentazione, prende il nome di “carrier” ed è caratterizzato da un’ampiezza  $A_c$  e una frequenza  $F_c$ . Il segnale in uscita prende il nome di segnale armonico o di deformazione ed è caratterizzato da un’ampiezza  $A_s$  e una frequenza  $F_s$ .



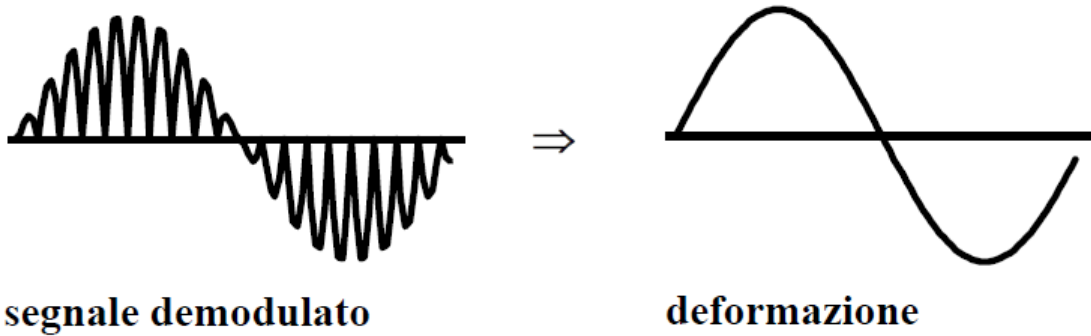
Alimentando in alternata, anche l’uscita sarà in alternata, alla stessa frequenza dell’alimentazione. L’uscita sarà però modulata in ampiezza a seconda del valore di deformazione. È quindi importante sottolineare che in uscita si ottiene il prodotto di due armoniche o in generale il prodotto tra la portante per il segnale di deformazione (tensione di alimentazione per il segnale deformazione nel tempo). Si misura quindi il prodotto di questo valore e **non** il segnale di deformazione, cioè il valore che si desidera conoscere. Per ottenere solo il segnale di deformazione, eliminando il contributo della portante, occorre demodulare il segnale tramite l’uso di un demodulatore e di un filtro. Il demodulatore è un circuito elettronico che prende in ingresso il segnale di alimentazione del ponte e il segnale in uscita dal ponte. In uscita dal demodulatore si ha un segnale, detto demodulato, che è ottenuto dal segnale modulato manipolato in questo modo: in ogni istante si confronta il segno della portante con il segno del segnale modulato: se i segni sono concordi si genera per quell’istante un segnale demodulato con segno positivo e ampiezza pari al segnale modulato nello stesso istante. Se invece i segni sono discordi si genera in uscita un segnale demodulato con segno negativo e ancora con ampiezza pari al segnale modulato in quell’istante. In pratica il demodulatore implementa questa equazione:

$$demodulato = |modulato| * signum(portante + modulato)$$

Dove signum() è una funzione che vale 1 se il segno dell’argomento è positivo e che vale -1 se il segno dell’argomento è negativo.



Una volta demodolato il segnale si applica un filtro passa-basso che rimuove le alte frequenze dovute alla modulante; ciò permette di passare dal segnale modulato al segnale rappresentativo della deformazione.



### Circuito con demodulatore

Rappresentiamo ora nello schema a blocchi il circuito completo, a partire dal ponte di Wheatstone, fino al segnale in uscita demodulato e filtrato. Si noti che il demodulatore richiede in ingresso non solo il segnale modulato ma anche la portante, in modo da poter fare istante per istante il confronto di fase (ovvero del segno) fra segnale modulato e portante.

