



Università del Salento

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Lezioni del corso di

Progettazione Assistita e Meccanica Sperimentale

prof. ing. Riccardo Nobile

Estensimetria – Lezione 2

Circuiti di misura

Il ponte di Wheatstone

La variazione di resistenza elettrica di un estensimetro deformato è dell'ordine dei $10^{-3}/10^{-4} \Omega$

Queste variazioni di resistenza vanno misurate su circuiti che hanno resistenze assolute di $10^2/10^3 \Omega$

La difficoltà della misura richiede di utilizzare un particolare circuito di misura, detto circuito a ponte o ponte di Wheatstone

Il ponte di Wheatstone viene utilizzato come base in molti strumenti di misura ed esistono almeno tre metodi di misura:

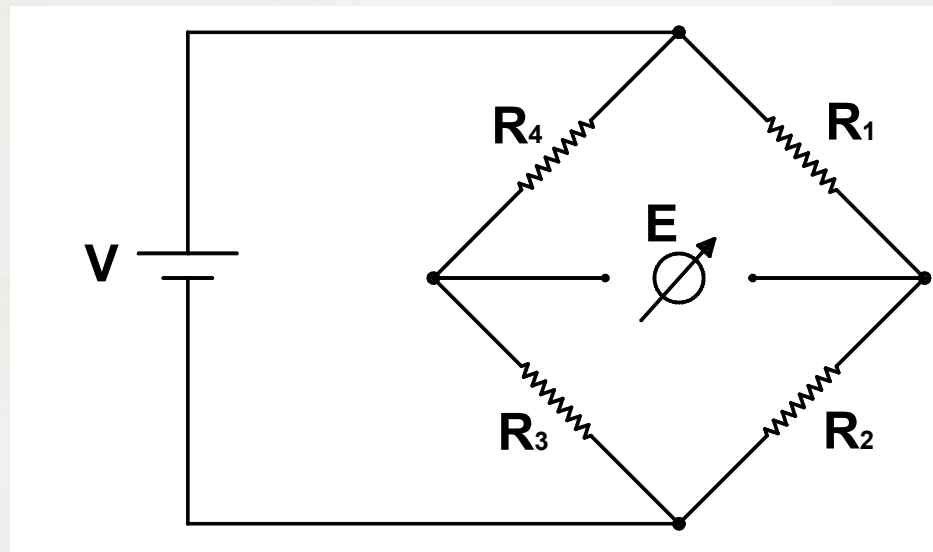
- ❖ metodo a deviazione
- ❖ metodo ad azzeramento
- ❖ metodo del ponte di riferimento

Circuiti di misura

Il ponte di Wheatstone

Per le misure estensimetriche la configurazione di misura più opportuna e universalmente adottata è quella corrispondente al ponte di Wheatstone a deviazione alimentato a tensione costante

Il ponte di Wheatstone è costituito da 4 resistenze elettriche che occupano 4 lati di un rombo

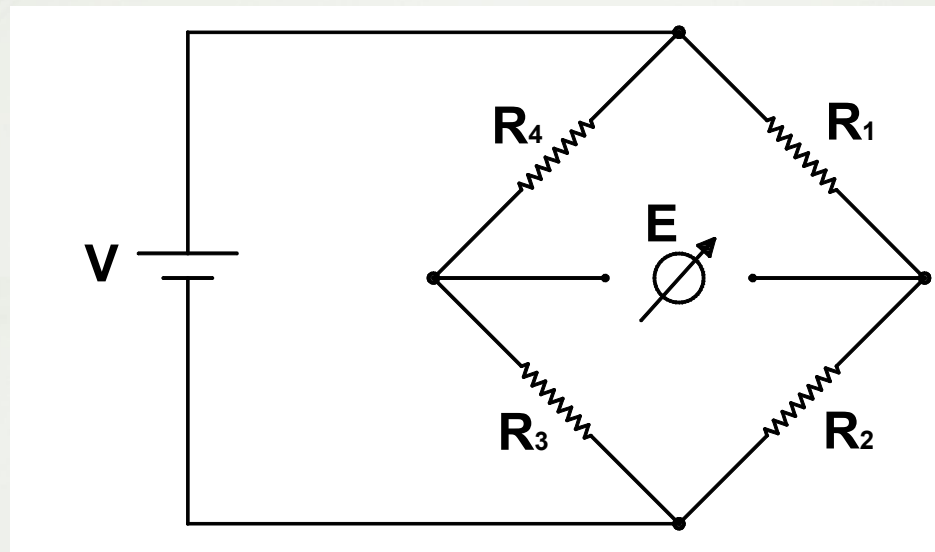


Circuiti di misura

Il ponte di Wheatstone

Il ponte viene alimentato da una tensione V ai capi della «diagonale di alimentazione»

Ai capi dell'altra diagonale, detta «diagonale di misura», si misura la tensione di sbilanciamento E

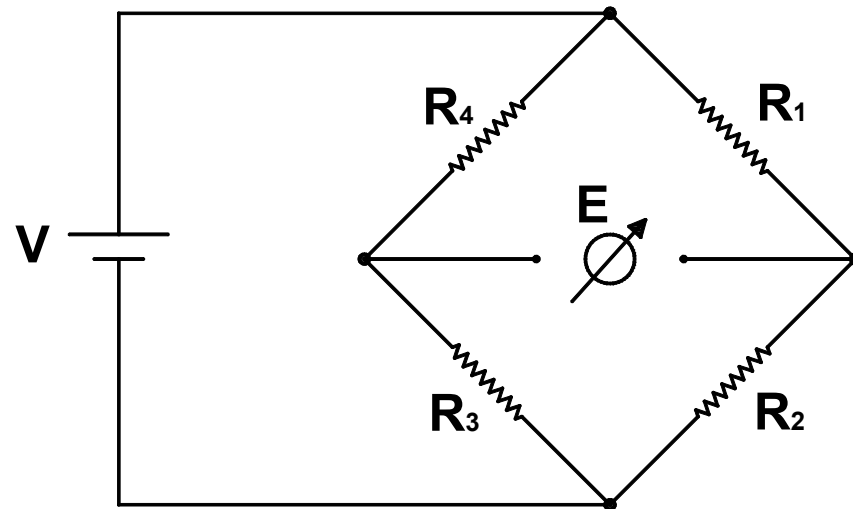


Circuiti di misura

Il ponte di Wheatstone

Se lo strumento utilizzato per la misura di E ha una impedenza infinita, la tensione di sbilanciamento è data da:

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



Circuiti di misura

Il ponte di Wheatstone

Nell'estensimetria le 4 resistenze sono costituite da estensimetri, aventi resistenza nominale identica R_0

In queste condizioni $R_1R_3 = R_2R_4$ e il ponte è bilanciato ($E = 0$)

Tenendo conto però che le 4 resistenze, essendo estensimetri, sono potenzialmente variabili, si ottiene:

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

Circuiti di misura

Il ponte di Wheatstone

Poiché le variazioni di resistenza ΔR_i sono trascurabili rispetto alle resistenze R_i (4-5 ordini di grandezza inferiori) è lecito trascurare i termini quadratici:

$$R_i = R_0$$



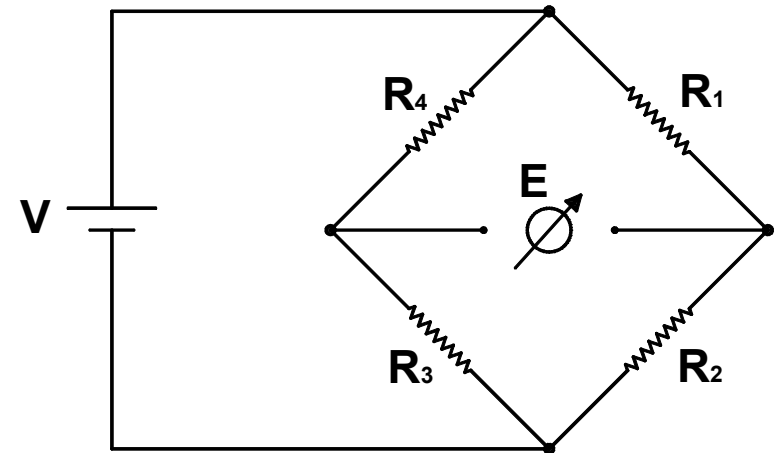
$$E = V \frac{R_0^2}{(2R_0)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$
$$E = \frac{V}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

Circuiti di misura

Il ponte di Wheatstone

Introducendo il fattore di taratura K , comune a tutti gli estensimetri, si ha:

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



Le deformazioni di estensimetri posti su lati adiacenti del ponte si sottraggono, le deformazioni di estensimetri posti su lati opposti del ponte si sommano

Circuiti di misura

Il ponte di Wheatstone

Non è necessario che tutti i lati del ponte siano occupati da estensimetri

Il ponte può essere completato con l'ausilio di resistenze calibrate installate nelle centraline di misura

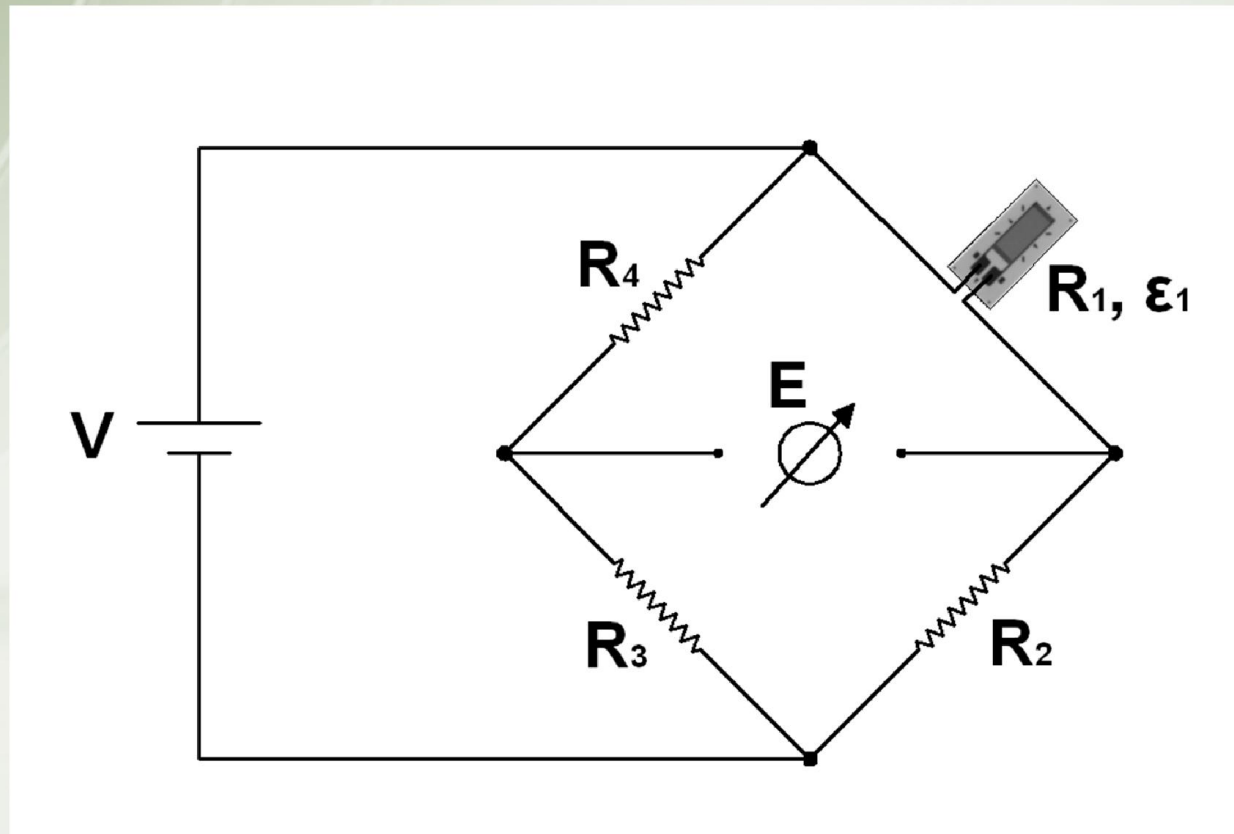
A seconda del numero di estensimetri collegati si parla di:

- ❖ **collegamento a quarto di ponte: 1 solo estensimetro occupa uno dei lati del ponte**
- ❖ **collegamento a mezzo ponte: 2 estensimetri occupano 2 lati adiacenti del ponte**
- ❖ **collegamento a ponte intero: 4 estensimetri occupano tutti e 4 i lati del ponte**

Circuiti di misura

Collegamento a quarto di ponte

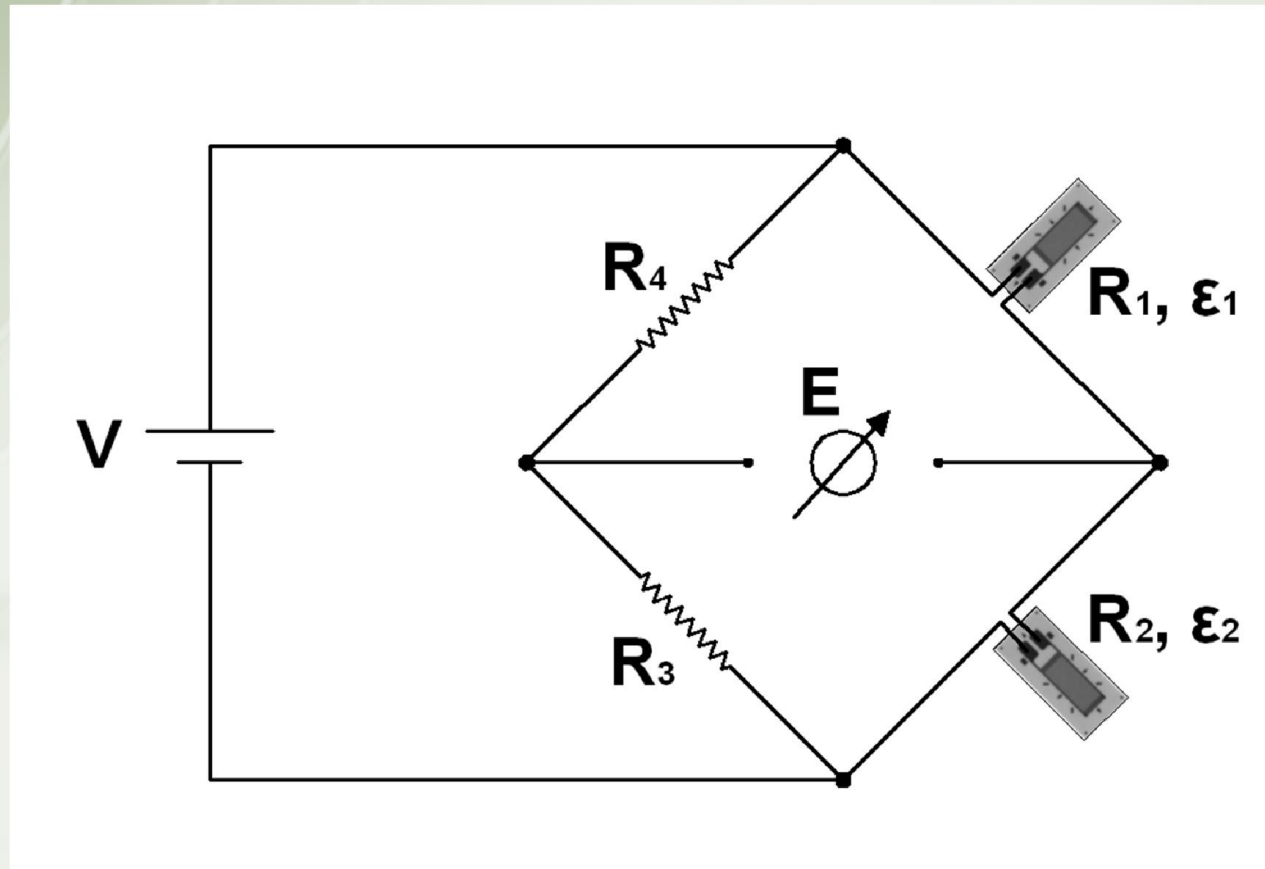
1 solo estensimetro occupa uno dei lati del ponte



Circuiti di misura

Collegamento a mezzo ponte

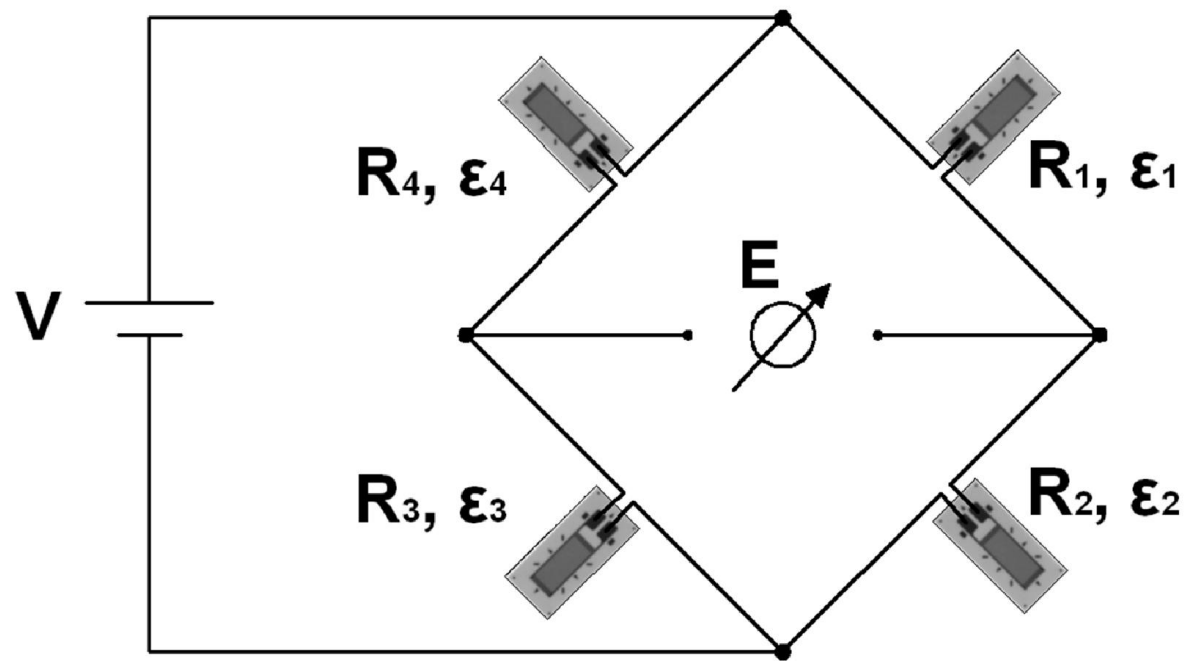
2 estensimetri occupano 2 lati adiacenti del ponte



Circuiti di misura

Collegamento a ponte intero

4 estensimetri occupano tutti e 4 i lati del ponte



Circuiti di misura

Bilanciamento iniziale del ponte

Nonostante i 4 lati del ponte di Wheatstone siano occupati da resistenze nominalmente identiche, siano esse estensimetri non deformati o resistenze calibrate, è sempre presente uno sbilanciamento iniziale del ponte

$$E = V \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \neq 0$$



$$R_1 R_3 \neq R_2 R_4$$

Per azzerare lo sbilanciamento iniziale del ponte si può aggiungere al ponte un circuito di bilanciamento che possa modificare a piacimento le resistenze R_3 e R_4 così da ottenere:

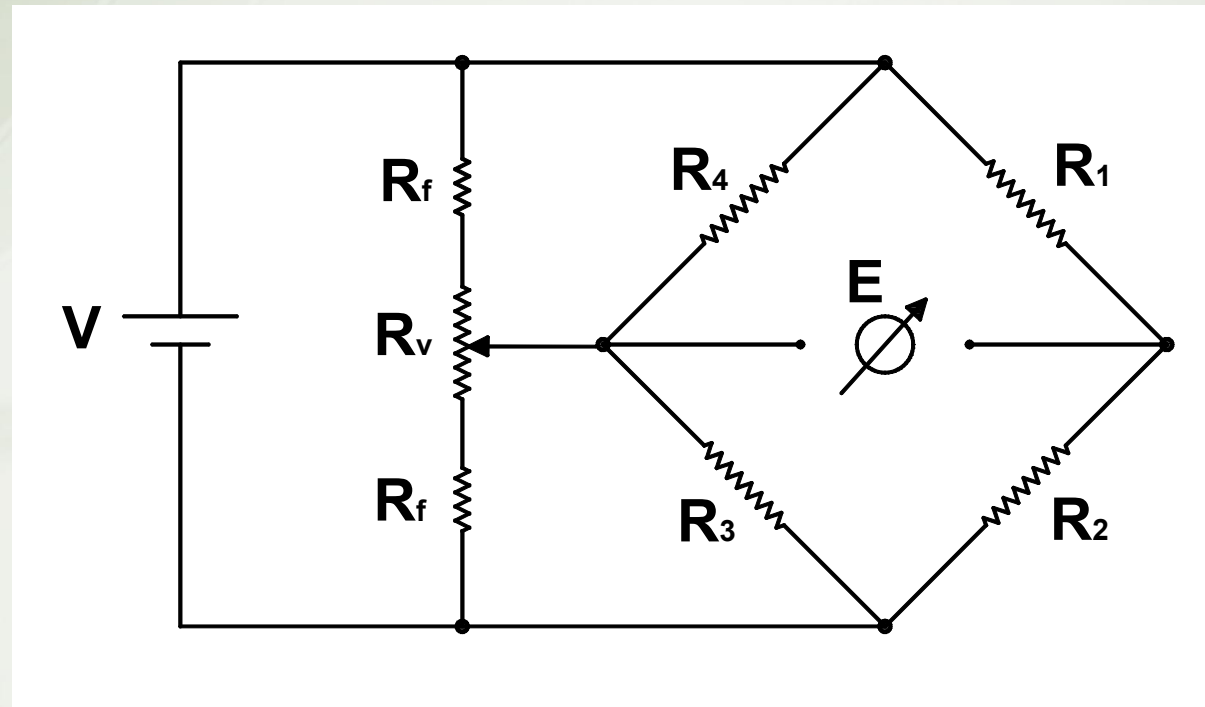
$$R_1 R'_3 = R_2 R'_4$$

Circuiti di misura

Bilanciamento iniziale del ponte

Il circuito di bilanciamento è costituito da resistenze variabili poste in parallelo con i lati 3 e 4 del ponte

Un esempio è il seguente, costituito da due resistenze fisse R_f e un reostato R_v



Circuiti di misura

Bilanciamento iniziale del ponte

L'aggiunta del circuito di bilanciamento può incrementare gli errori di misura

In alternativa all'utilizzo del circuito di bilanciamento, si può modificare la tensione di alimentazione V applicando in serie una tensione opposta allo sbilanciamento iniziale E_0

Nelle moderne centraline di misura digitali si preferisce misurare lo sbilanciamento iniziale E_0 e sottrarlo alla misura



Circuiti di misura

Influenza dei cavi

Il circuito a ponte di Wheatstone prevede che uno o più estensimetri costituiscano le resistenze dei lati del ponte

In realtà il circuito di misura è contenuto all'interno di una centralina, mentre gli estensimetri sono fisicamente localizzati sulla struttura in esame, anche a parecchi metri di distanza

Le resistenze dei cavi, dei terminali saldati, dei contatti striscianti, ecc. subiscono variazioni di temperatura e quindi variano la loro resistenza, andando potenzialmente a influenzare la misura estensimetrica

Circuiti di misura

Influenza dei cavi

Tutte queste resistenze aggiuntive sono dette interne se inserite all'interno di un lato del ponte, esterne se sono in serie con i cavi di misura

A seconda del collegamento utilizzato le resistenze dei cavi possono configurarsi come resistenze interne o esterne

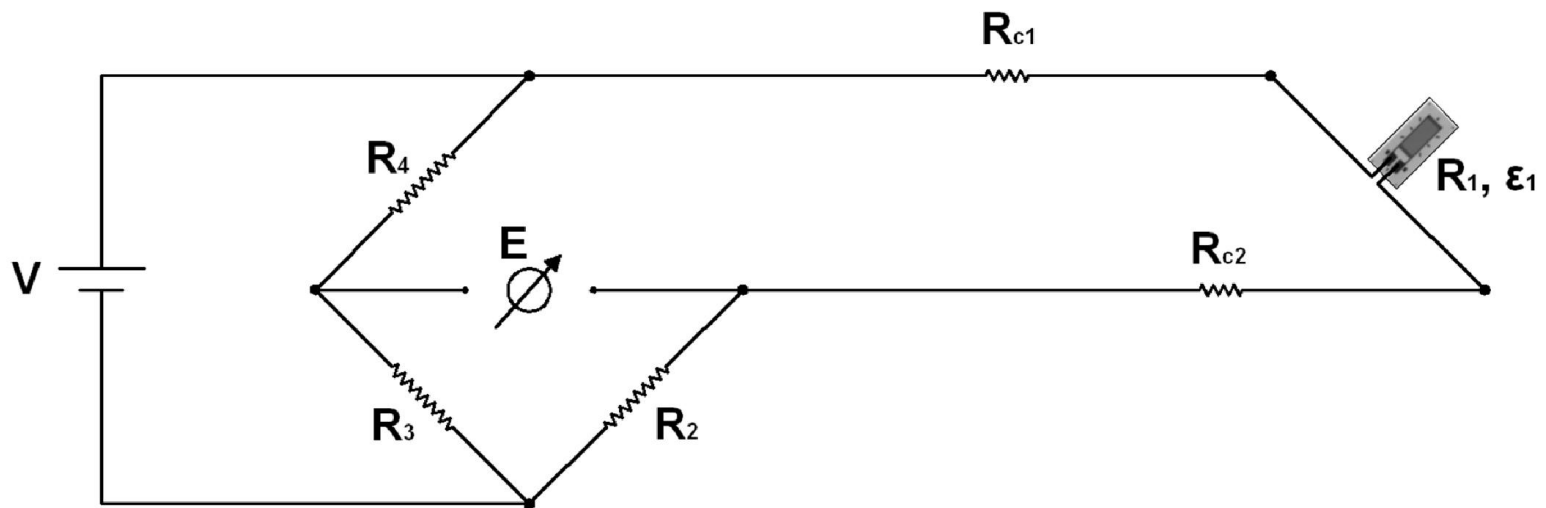
In generale la variazione di resistenza dei cavi non influenza la misura se le resistenze sono esterne al ponte

Circuiti di misura

Influenza dei cavi

Collegamento a quarto di ponte a due fili

Il collegamento più semplice è quello a quarto di ponte a due fili di resistenza R_{c1} e R_{c2}



Circuiti di misura

Influenza dei cavi

Collegamento a quarto di ponte a due fili

Ipotizzando una variazione di temperatura dei cavi ΔT e indicando con β_c il coefficiente di temperatura dei cavi, la variazione di resistenza dei cavi sarà data da:

$$\Delta R_c = (R_{c1} + R_{c2})\beta_c \Delta T$$

cui corrisponderà una deformazione apparente:

$$\varepsilon_{ac} = \frac{1}{K} \frac{R_{c1} + R_{c2}}{R_0 + R_{c1} + R_{c2}} \beta_c \Delta T$$

In prima approssimazione si può stimare $\varepsilon_{ac} = 2 \mu\epsilon / (m_{cavi} \text{ } ^\circ\text{C})$

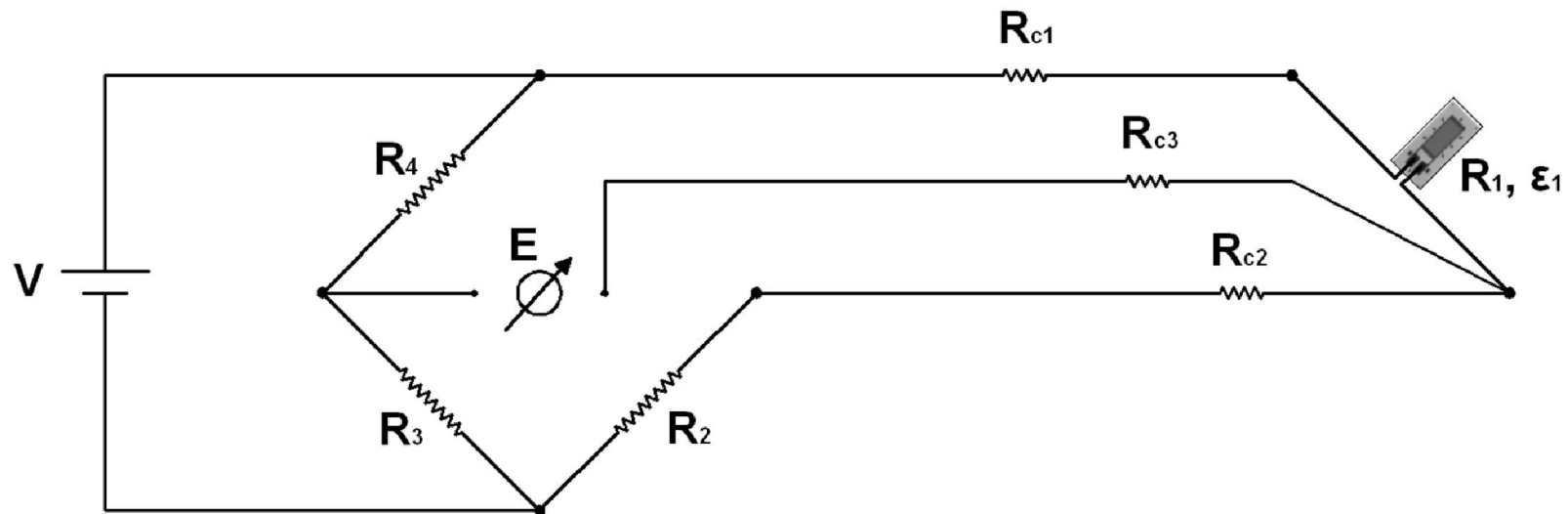
Circuiti di misura

Influenza dei cavi

Collegamento a quarto di ponte a tre fili

Per compensare la variazione di resistenza dei cavi si può utilizzare il collegamento a tre fili

In tale collegamento le resistenze R_{c1} e R_{c2} vengono a trovarsi su lati adiacenti del ponte



Circuiti di misura

Influenza dei cavi

Collegamento a quarto di ponte a tre fili

Se i cavi sono identici e subiscono la stessa variazione di temperatura, le deformazioni apparenti introdotte sono identiche e trovandosi su lati adiacenti del ponte si annullano

$$\varepsilon_{ac_1} = \frac{1}{K} \frac{R_{c1}}{R_0 + R_{c1}} \beta_c \Delta T$$
$$\varepsilon_{ac_2} = \frac{1}{K} \frac{R_{c2}}{R_0 + R_{c2}} \beta_c \Delta T$$



$$E = \frac{VK}{4} (\varepsilon_{ac_1} - \varepsilon_{ac_2})$$

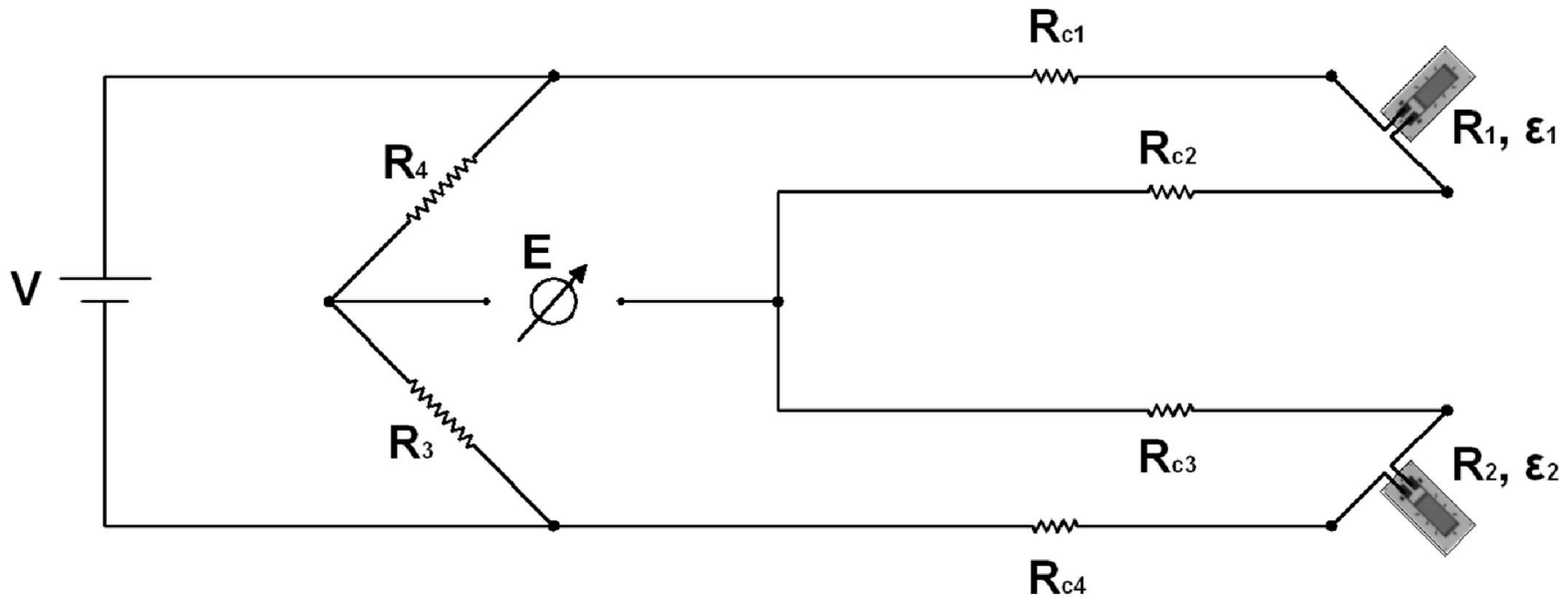
La resistenza R_{c3} , essendo inserita sulla diagonale di misura e quindi essendo esterna al ponte, non influisce sulla misura

Circuiti di misura

Influenza dei cavi

Collegamento a mezzo ponte a quattro fili

Nel collegamento a mezzo ponte a quattro fili le deformazioni termiche apparenti dei cavi vengono a trovarsi su lati adiacenti e quindi si annullano, a patto che i cavi siano identici e soggetti alle stesse variazioni di temperatura



Circuiti di misura

Influenza dei cavi

Collegamento a mezzo ponte a quattro fili

Nel collegamento a mezzo ponte a quattro fili le deformazioni termiche apparenti dei cavi vengono a trovarsi su lati adiacenti e quindi si annullano, a patto che i cavi siano identici e soggetti alle stesse variazioni di temperatura

$$\varepsilon_{ac_{12}} = \frac{1}{K} \frac{R_{c1} + R_{c2}}{R_0 + R_{c1} + R_{c2}} \beta_c \Delta T$$
$$\varepsilon_{ac_{34}} = \frac{1}{K} \frac{R_{c3} + R_{c4}}{R_0 + R_{c3} + R_{c4}} \beta_c \Delta T$$

$$E = \frac{VK}{4} (\varepsilon_{ac_{12}} - \varepsilon_{ac_{34}})$$

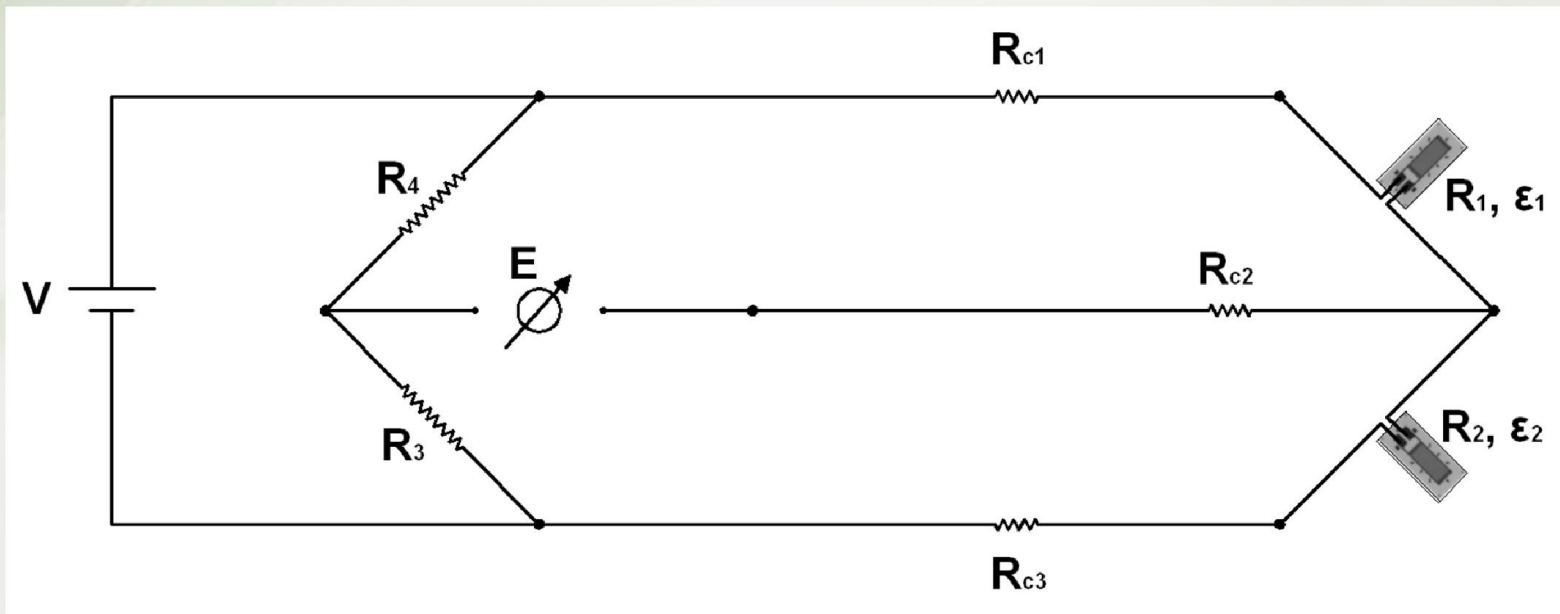
Circuiti di misura

Influenza dei cavi

Collegamento a mezzo ponte a tre fili

Qualora gli estensimetri siano fisicamente adiacenti, è preferibile utilizzare il collegamento a mezzo ponte a tre fili

Anche in questo caso le deformazioni termiche apparenti dei cavi vengono a trovarsi su lati adiacenti e quindi si annullano, a patto che i cavi siano identici e soggetti alle stesse variazioni di temperatura



Circuiti di misura

Influenza dei cavi

Collegamento a mezzo ponte a tre fili

Qualora gli estensimetri siano fisicamente adiacenti, è preferibile utilizzare il collegamento a mezzo ponte a tre fili

Anche in questo caso le deformazioni termiche apparenti dei cavi vengono a trovarsi su lati adiacenti e quindi si annullano, a patto che i cavi siano identici e soggetti alle stesse variazioni di temperatura

$$\varepsilon_{ac_1} = \frac{1}{K} \frac{R_{c1}}{R_0 + R_{c1}} \beta_c \Delta T$$

$$\varepsilon_{ac_3} = \frac{1}{K} \frac{R_{c3}}{R_0 + R_{c3}} \beta_c \Delta T$$



$$E = \frac{VK}{4} (\varepsilon_{ac_1} - \varepsilon_{ac_3})$$

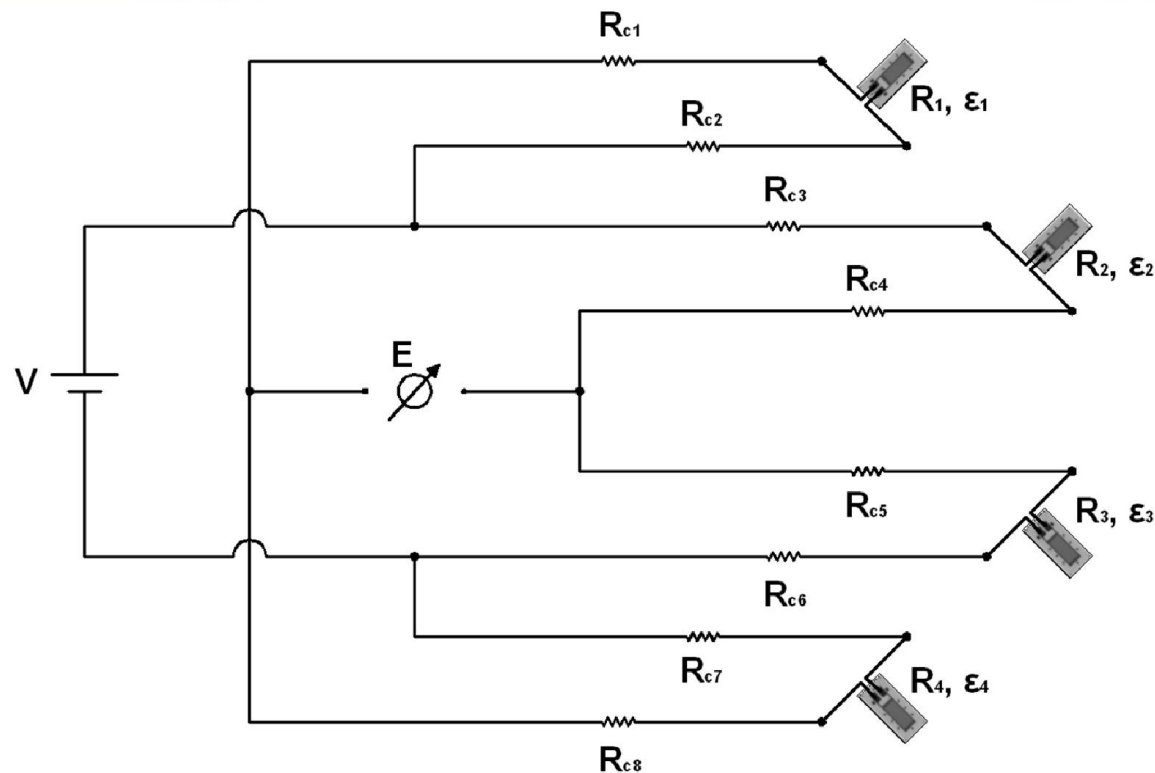
La resistenza R_{c2} , essendo inserita sulla diagonale di misura e quindi essendo esterna al ponte, non influisce sulla misura

Circuiti di misura

Influenza dei cavi

Collegamento a ponte intero a otto fili

Nel collegamento a ponte intero a otto fili le deformazioni termiche apparenti dei cavi vengono a trovarsi a coppie su lati adiacenti e quindi si annullano, a patto che i cavi siano identici e soggetti alle stesse variazioni di temperatura



Circuiti di misura

Influenza dei cavi

Collegamento a ponte intero a otto fili

Nel collegamento a ponte intero a otto fili le deformazioni termiche apparenti dei cavi vengono a trovarsi a coppie su lati adiacenti e quindi si annullano, a patto che i cavi siano identici e soggetti alle stesse variazioni di temperatura

$$\varepsilon_{acij} = \frac{1}{K} \frac{R_{ci} + R_{cj}}{R_0 + R_{ci} + R_{cj}} \beta_c \Delta T$$



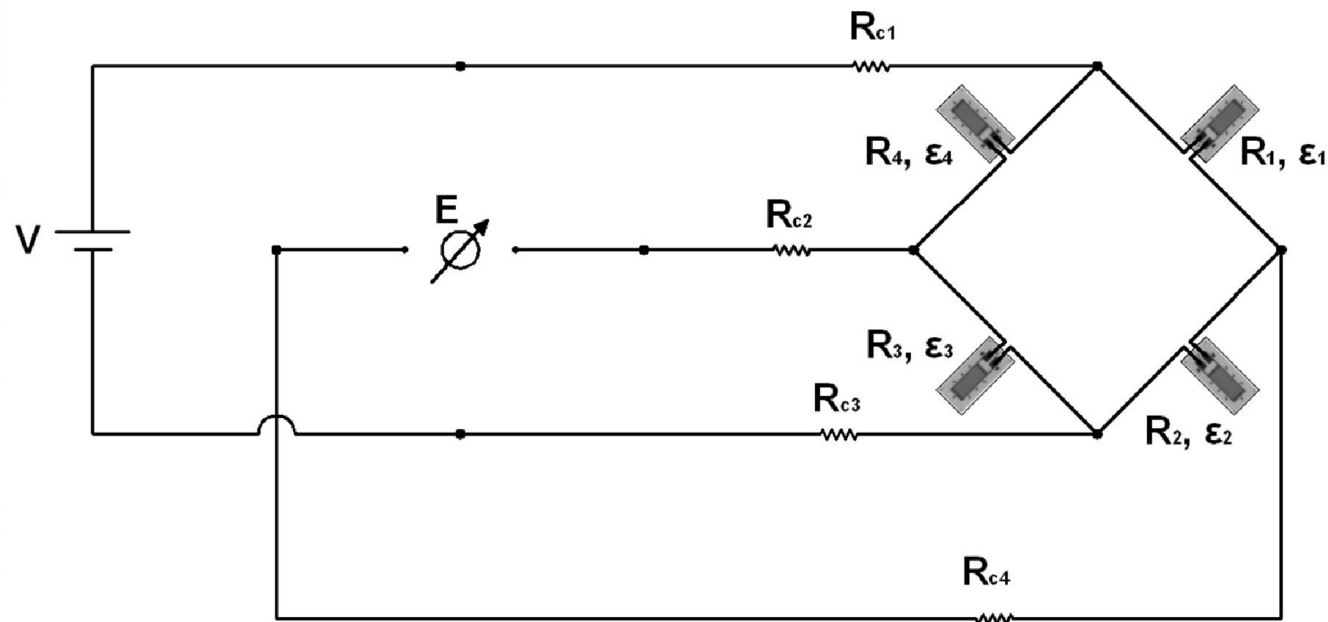
$$E = \frac{VK}{4} (\varepsilon_{ac_{12}} - \varepsilon_{ac_{34}} + \varepsilon_{ac_{56}} - \varepsilon_{ac_{78}})$$

Circuiti di misura

Influenza dei cavi

Collegamento a ponte intero a quattro fili

Qualora gli estensimetri siano fisicamente adiacenti, è preferibile utilizzare il collegamento a ponte intero a quattro fili. Tutte le resistenze R_{c_i} , essendo inserite sulla diagonale di misura e quindi essendo esterne al ponte, non influiscono sulla misura.



Taratura del ponte estensimetrico

La taratura del circuito estensimetrico serve a verificare il corretto funzionamento del circuito di misura e a correggere eventuali scostamenti delle misure introdotte dal circuito

La taratura quindi è indipendente dalla bontà di funzionamento dell'estensimetro

La taratura può essere effettuata secondo due modalità:

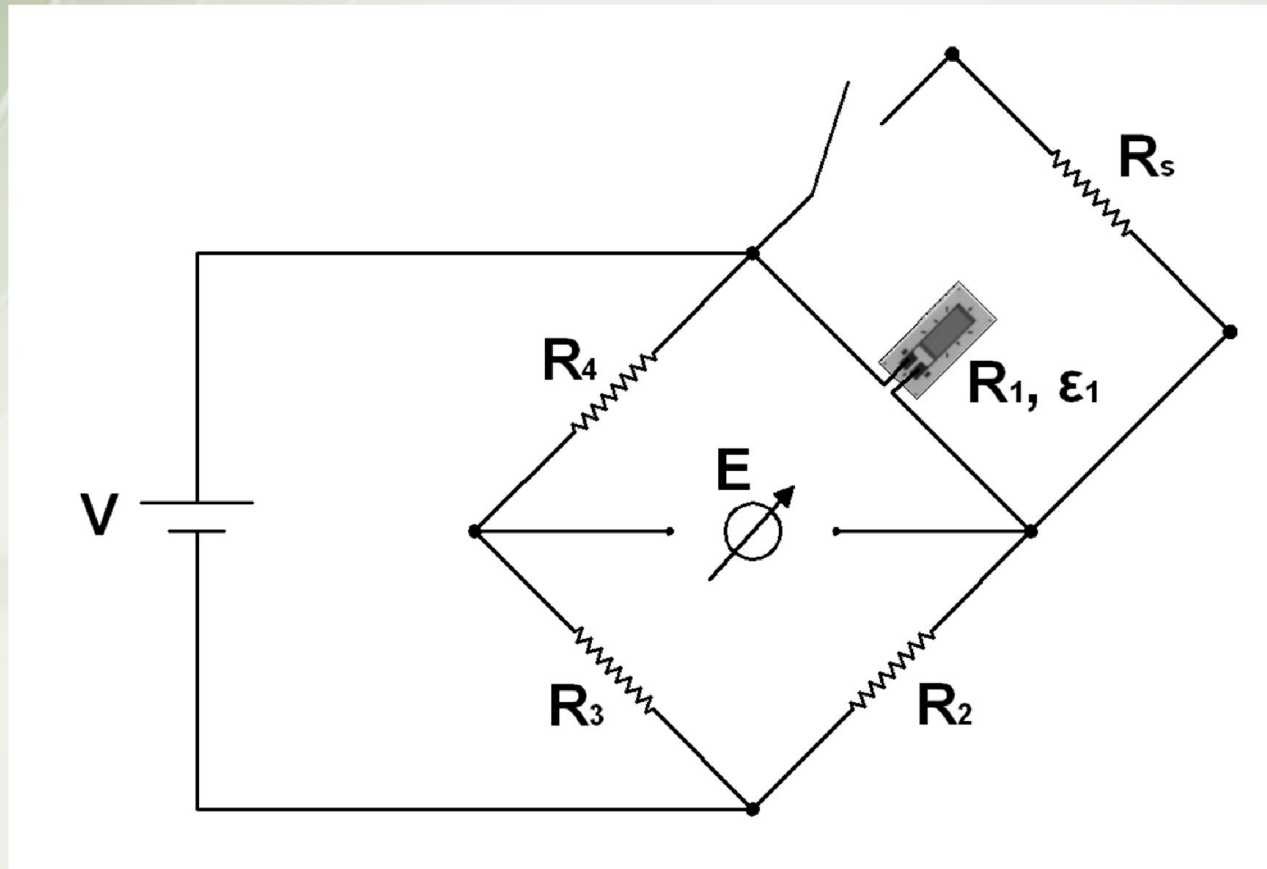
- ❖ **taratura meccanica: si applica una deformazione meccanica nota all'estensimetro**
- ❖ **taratura elettrica di shunt: si inserisce una resistenza nota in parallelo all'estensimetro**

La taratura più comunemente utilizzata è quella elettrica, che è una funzione integrata nelle moderne centraline

Circuiti di misura

Taratura del ponte estensimetrico

Inserendo in parallelo all'estensimetro una resistenza R_s , si genera una variazione di resistenza ΔR .



Circuiti di misura

Taratura del ponte estensimetrico

Supponendo che il parallelo sia sul lato 1 del ponte si ottiene:

$$\Delta R = R_f - R_i = \frac{R_0 R_s}{R_0 + R_s} - R_0 = -\frac{R_0^2}{R_0 + R_s}$$

cui corrisponde una deformazione di taratura:

$$\varepsilon_t = -\frac{1}{K} \frac{R_0}{R_0 + R_s}$$

Se la deformazione misurata dal ponte $\varepsilon_{t,mis}$ differisce da quella prevista teoricamente si può intervenire variando il fattore di taratura imposto

$$K' = K \frac{\varepsilon_{t,mis}}{\varepsilon_t}$$

Disposizioni estensimetriche

La misura delle sollecitazioni elementari

La relazione fondamentale alla base delle misure estensimetriche utilizzando il ponte di Wheatstone è la seguente:

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



$$\varepsilon_T = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4$$

avendo indicato con i pedici pari o dispari i lati opposti del ponte, per i quali le variazioni di resistenza, e quindi le deformazioni, si sommano

E' possibile sfruttare questa proprietà per misurare in maniera efficiente le deformazioni prodotte dalle sollecitazioni elementari, eliminando gli effetti spuri

Disposizioni estensimetriche

La misura delle sollecitazioni elementari

Indichiamo con questa notazione le deformazioni prodotte su un generico componente strutturale per effetto del carico di trazione N e delle due flessioni agenti M_{fx} e M_{fy}

ϵ_N = deformazione imputabile allo sforzo normale N

ϵ_{Mx} = deformazione imputabile al momento flettente M_{fx}

ϵ_{My} = deformazione imputabile al momento flettente M_{fy}

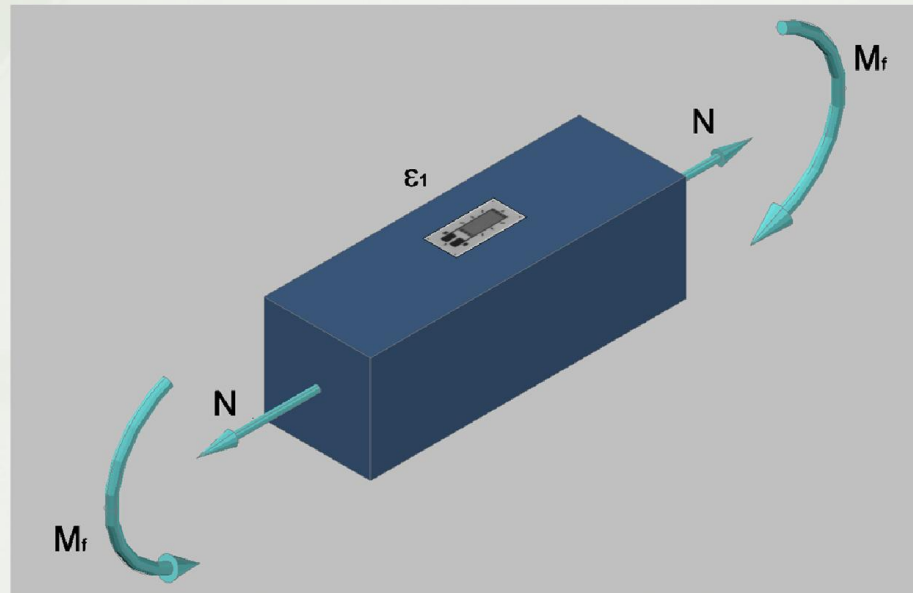
ϵ_a = deformazione apparente dovuta alle variazioni di temperatura

Disposizioni estensimetriche

La misura delle sollecitazioni elementari Trazione

Disposizione 1: un solo estensimetro collegato a 1/4 di ponte

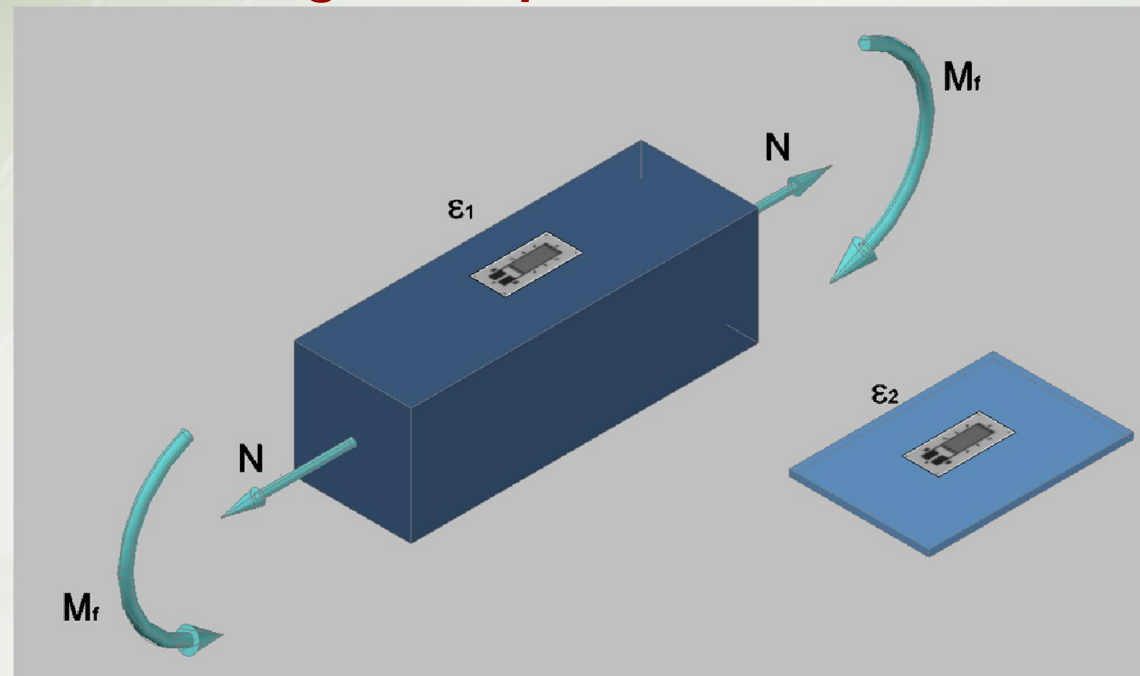
$$\varepsilon_T = \varepsilon_1 = \varepsilon_N + \varepsilon_{M_{fx}} + \varepsilon_a$$



Disposizioni estensimetriche

La misura delle sollecitazioni elementari Trazione

Disposizione 2: un estensimetro attivo e un estensimetro compensatore collegati a 1/2 ponte



$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \varepsilon_N + \varepsilon_{M_{fx}} + \varepsilon_a \\ \varepsilon_2 &= \varepsilon_a\end{aligned}$$

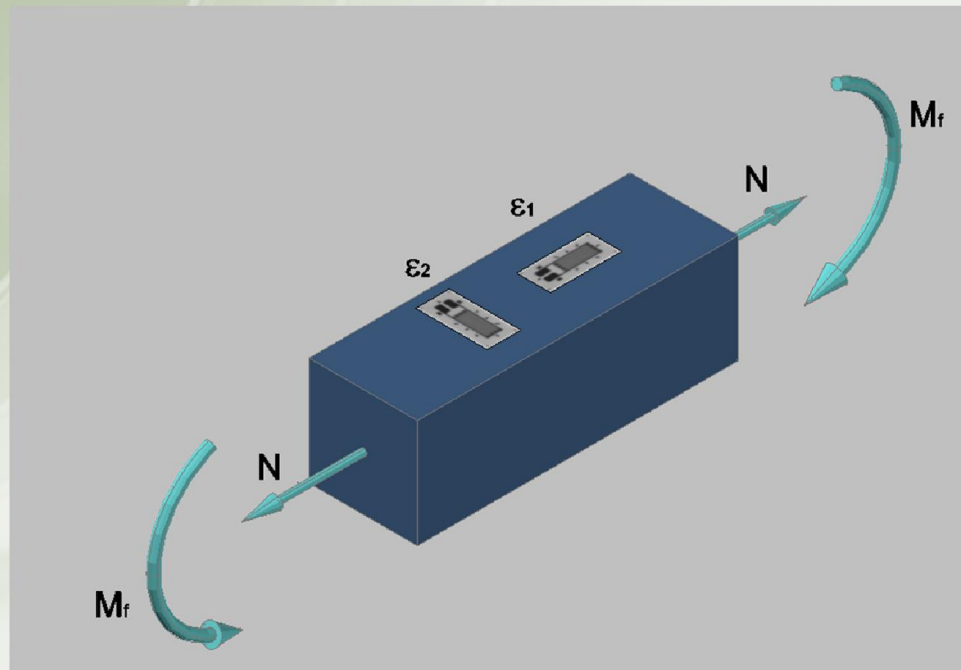
$$\varepsilon_T = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \varepsilon_N + \varepsilon_{M_{fx}}$$

35

Disposizioni estensimetriche

La misura delle sollecitazioni elementari Trazione

Disposizione 3: due estensimetri attivi montati in direzione longitudinale e trasversale collegati a 1/2 ponte



$$\varepsilon_1 = \varepsilon_N + \varepsilon_{M_{fx}} + \varepsilon_a$$

$$\varepsilon_2 = -\nu\varepsilon_N - \nu\varepsilon_{M_{fx}} + \varepsilon_a$$

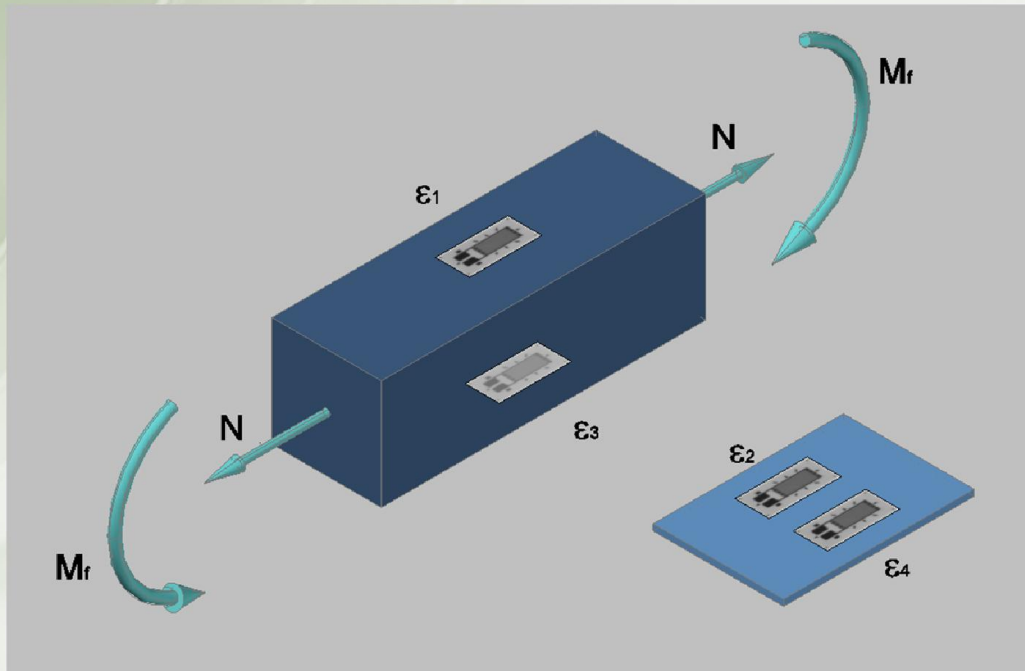


$$\varepsilon_T = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \varepsilon_N(1 + \nu) + \varepsilon_{M_{fx}}(1 + \nu)$$

Disposizioni estensimetriche

La misura delle sollecitazioni elementari Trazione

Disposizione 4: due estensimetri attivi e due estensimetri compensatori collegati a ponte intero



$$\varepsilon_1 = \varepsilon_N + \varepsilon_{M_{fx}} + \varepsilon_a$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_a$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_N - \varepsilon_{M_{fx}} + \varepsilon_a$$

$$\varepsilon_4 = \varepsilon_a$$

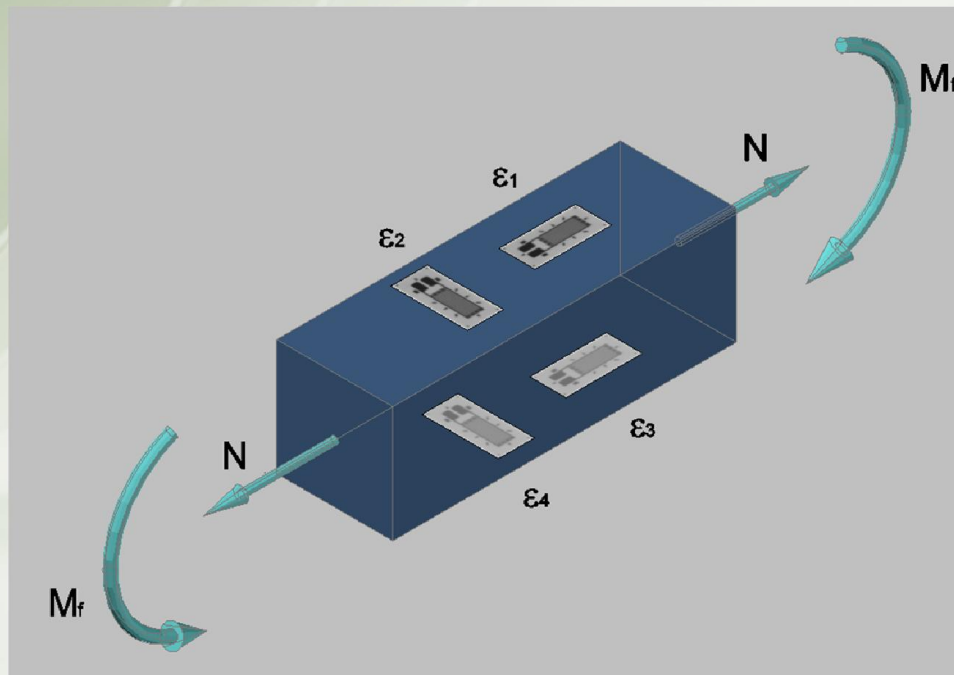


$$\varepsilon_T = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 = 2\varepsilon_N$$

Disposizioni estensimetriche

La misura delle sollecitazioni elementari Trazione

Disposizione 5: due estensimetri attivi montati su lati opposti e due estensimetri attivi montati trasversalmente collegati a ponte intero



$$\epsilon_1 = \epsilon_N + \epsilon_{M_{fx}} + \epsilon_a$$

$$\epsilon_2 = -\nu\epsilon_N - \nu\epsilon_{M_{fx}} + \epsilon_a$$

$$\epsilon_3 = \epsilon_N - \epsilon_{M_{fx}} + \epsilon_a$$

$$\epsilon_4 = -\nu\epsilon_N + \nu\epsilon_{M_{fx}} + \epsilon_a$$

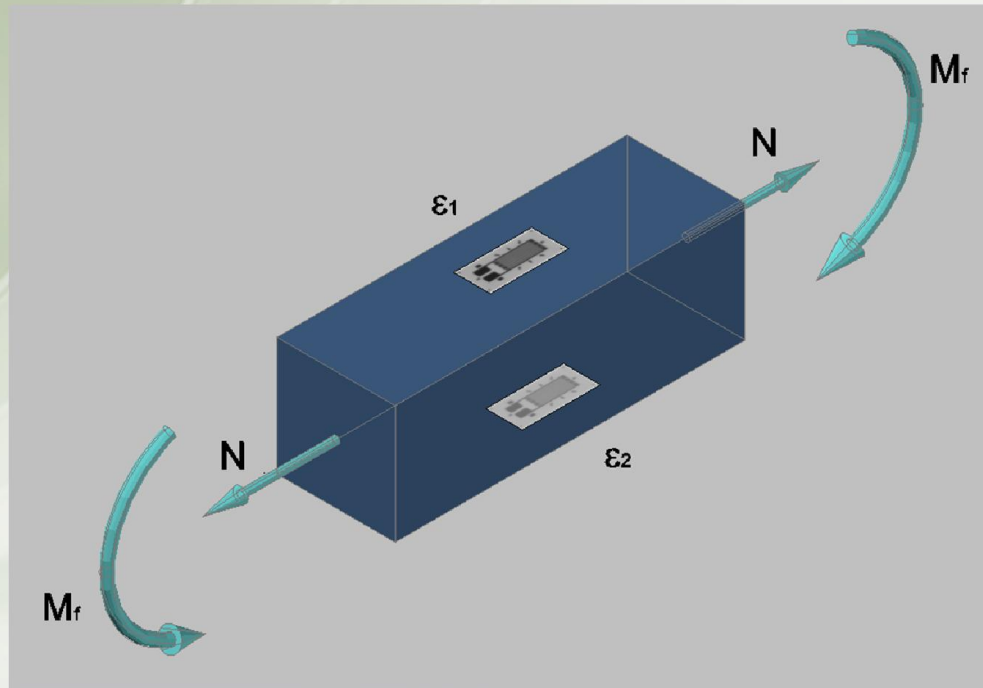


$$\epsilon_T = \epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4 = 2\epsilon_N(1 + \nu)$$

Disposizioni estensimetriche

La misura delle sollecitazioni elementari Flessione

Disposizione 1: due estensimetri attivi montati su lati opposti collegati a 1/2 ponte



$$\varepsilon_1 = \varepsilon_N + \varepsilon_{M_{fx}} + \varepsilon_a$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_N - \varepsilon_{M_{fx}} + \varepsilon_a$$

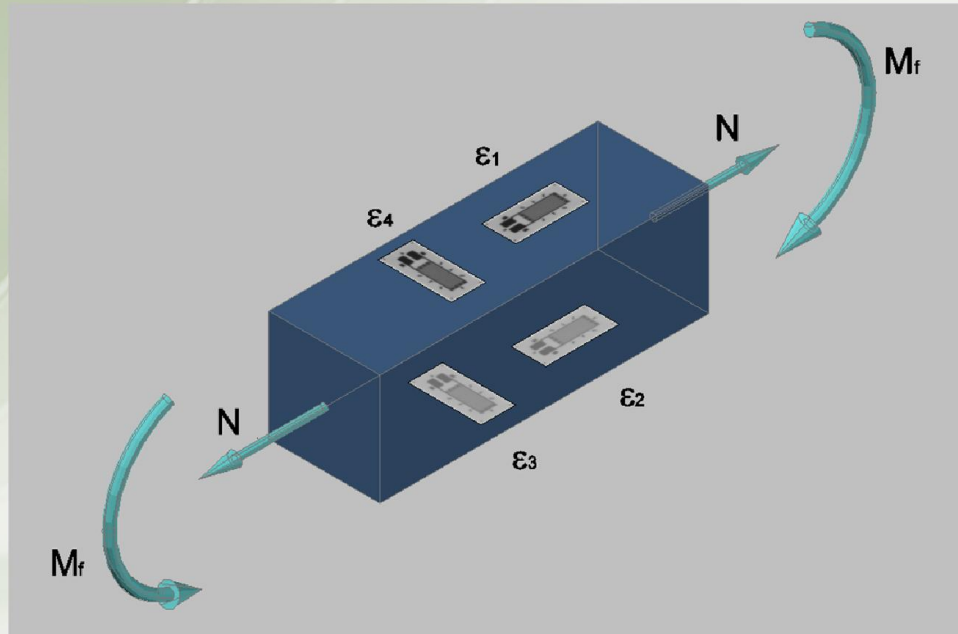


$$\varepsilon_T = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 = 2\varepsilon_{M_{fx}}$$

Disposizioni estensimetriche

La misura delle sollecitazioni elementari Flessione

Disposizione 2: quattro estensimetri attivi di cui due trasversali montati su lati opposti collegati a ponte intero



$$\epsilon_1 = \epsilon_N + \epsilon_{M_{fx}} + \epsilon_a$$

$$\epsilon_2 = \epsilon_N - \epsilon_{M_{fx}} + \epsilon_a$$

$$\epsilon_3 = -\nu\epsilon_N + \nu\epsilon_{M_{fx}} + \epsilon_a$$

$$\epsilon_4 = -\nu\epsilon_N - \nu\epsilon_{M_{fx}} + \epsilon_a$$

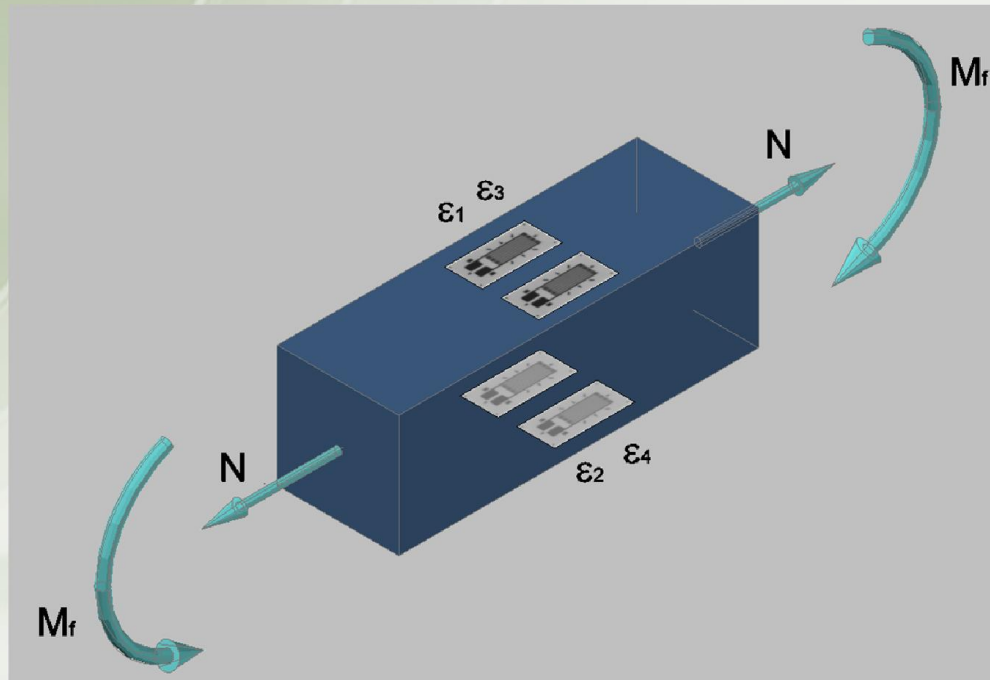


$$\epsilon_T = \epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4 = 2(1 + \nu)\epsilon_{M_{fx}}$$

Disposizioni estensimetriche

La misura delle sollecitazioni elementari Flessione

Disposizione 3: quattro estensimetri attivi montati su lati opposti collegati a ponte intero



$$\epsilon_1 = \epsilon_N + \epsilon_{M_{fx}} + \epsilon_a$$

$$\epsilon_2 = \epsilon_N - \epsilon_{M_{fx}} + \epsilon_a$$

$$\epsilon_3 = \epsilon_N + \epsilon_{M_{fx}} + \epsilon_a$$

$$\epsilon_4 = \epsilon_N - \epsilon_{M_{fx}} + \epsilon_a$$



$$\epsilon_T = \epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4 = 4\epsilon_{M_{fx}}$$

Disposizioni estensimetriche

La misura delle sollecitazioni elementari Torsione

La torsione pura è equivalente a una deformazione estensionale di trazione e una di compressione secondo due direzioni tra loro ortogonali e ruotate di 45° rispetto all'asse di torsione

Indicando con ε_{M_t} la deformazione longitudinale misurata da un estensimetro inclinato di 45° rispetto all'asse di torsione, lo scorrimento angolare γ è dato da:

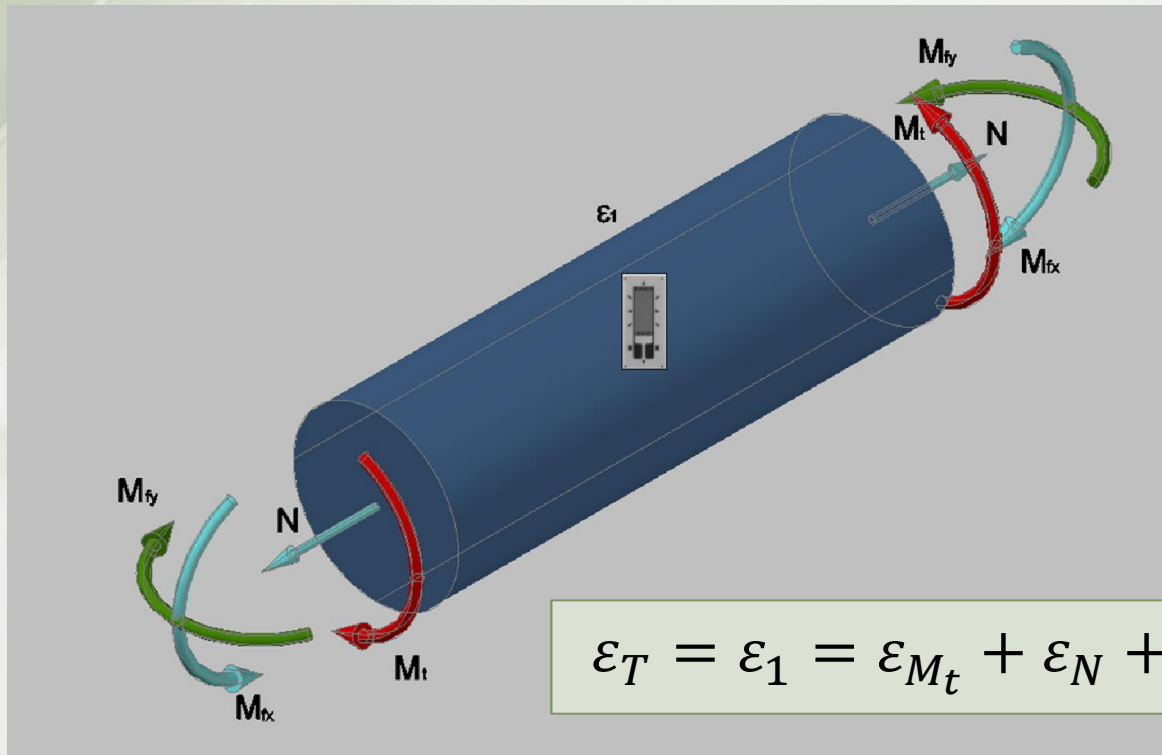
$$\gamma = 2\varepsilon_{M_t}$$

Disposizioni estensimetriche

La misura delle sollecitazioni elementari Torsione

**Disposizione 1: un solo estensimetro disposto a 45°
collegato a 1/4 di ponte**

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{M_t} + \varepsilon_N + \varepsilon_{M_{fx}} + \varepsilon_{M_{fy}} + \varepsilon_a$$



$$\varepsilon_T = \varepsilon_1 = \varepsilon_{M_t} + \varepsilon_N + \varepsilon_{M_{fx}} + \varepsilon_{M_{fy}} + \varepsilon_a$$

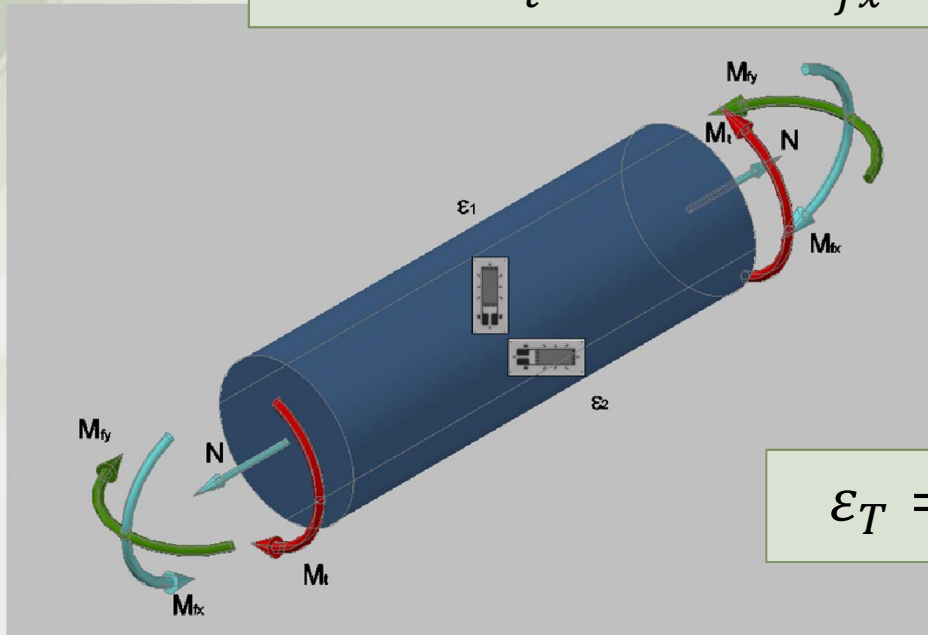
Disposizioni estensimetriche

La misura delle sollecitazioni elementari Torsione

Disposizione 2: due estensimetri attivi disposti a $\pm 45^\circ$ simmetrici rispetto al piano xz collegati a $\frac{1}{2}$ ponte

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{M_t} + \varepsilon_N + \varepsilon_{M_{fx}} + \varepsilon_{M_{fy}} + \varepsilon_a$$

$$\varepsilon_2 = -\varepsilon_{M_t} + \varepsilon_N - \varepsilon_{M_{fx}} + \varepsilon_{M_{fy}} + \varepsilon_a$$



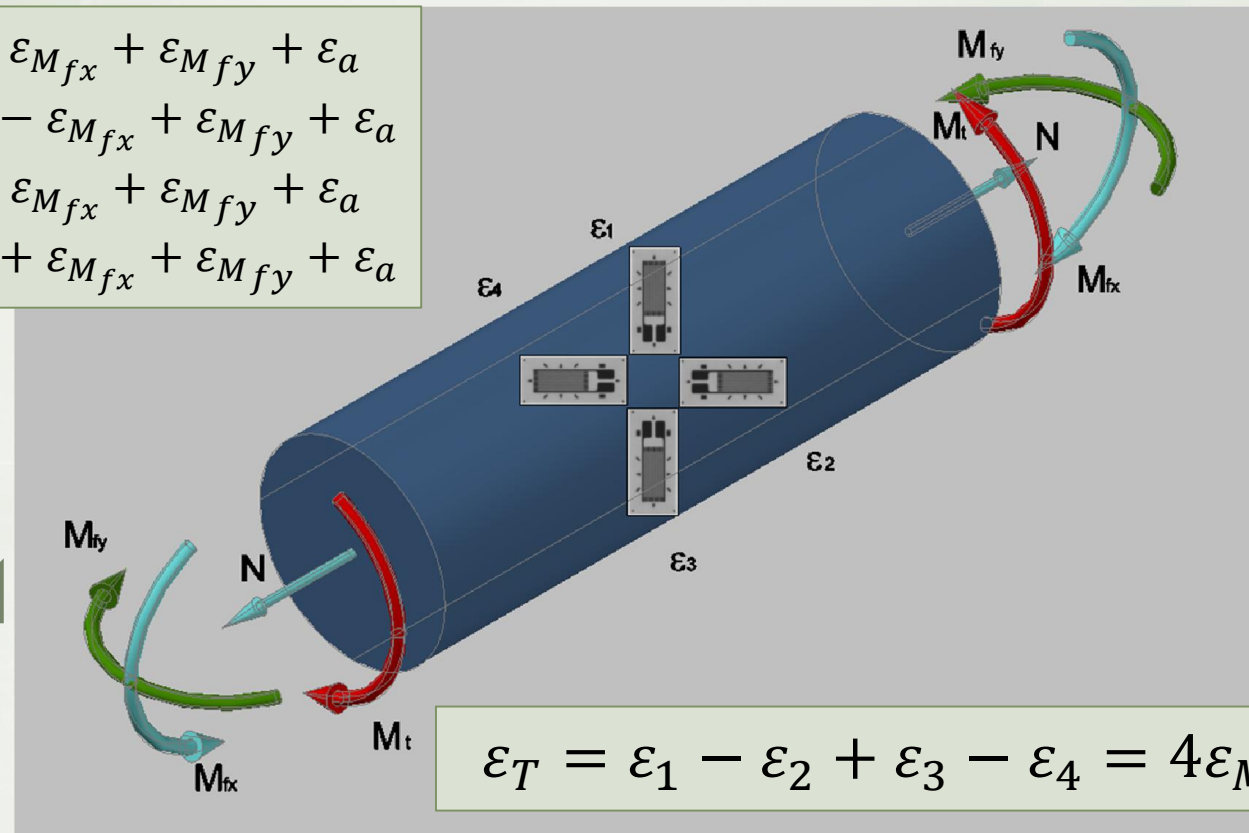
$$\varepsilon_T = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 = 2\varepsilon_{M_t} + 2\varepsilon_{M_{fx}}$$

Disposizioni estensimetriche

La misura delle sollecitazioni elementari Torsione

Disposizione 3: quattro estensimetri attivi disposti a $\pm 45^\circ$ simmetrici rispetto al piano xz collegati a ponte intero

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \varepsilon_{M_t} + \varepsilon_N + \varepsilon_{M_{fx}} + \varepsilon_{M_{fy}} + \varepsilon_a \\ \varepsilon_2 &= -\varepsilon_{M_t} + \varepsilon_N - \varepsilon_{M_{fx}} + \varepsilon_{M_{fy}} + \varepsilon_a \\ \varepsilon_3 &= \varepsilon_{M_t} + \varepsilon_N - \varepsilon_{M_{fx}} + \varepsilon_{M_{fy}} + \varepsilon_a \\ \varepsilon_4 &= -\varepsilon_{M_t} + \varepsilon_N + \varepsilon_{M_{fx}} + \varepsilon_{M_{fy}} + \varepsilon_a\end{aligned}$$



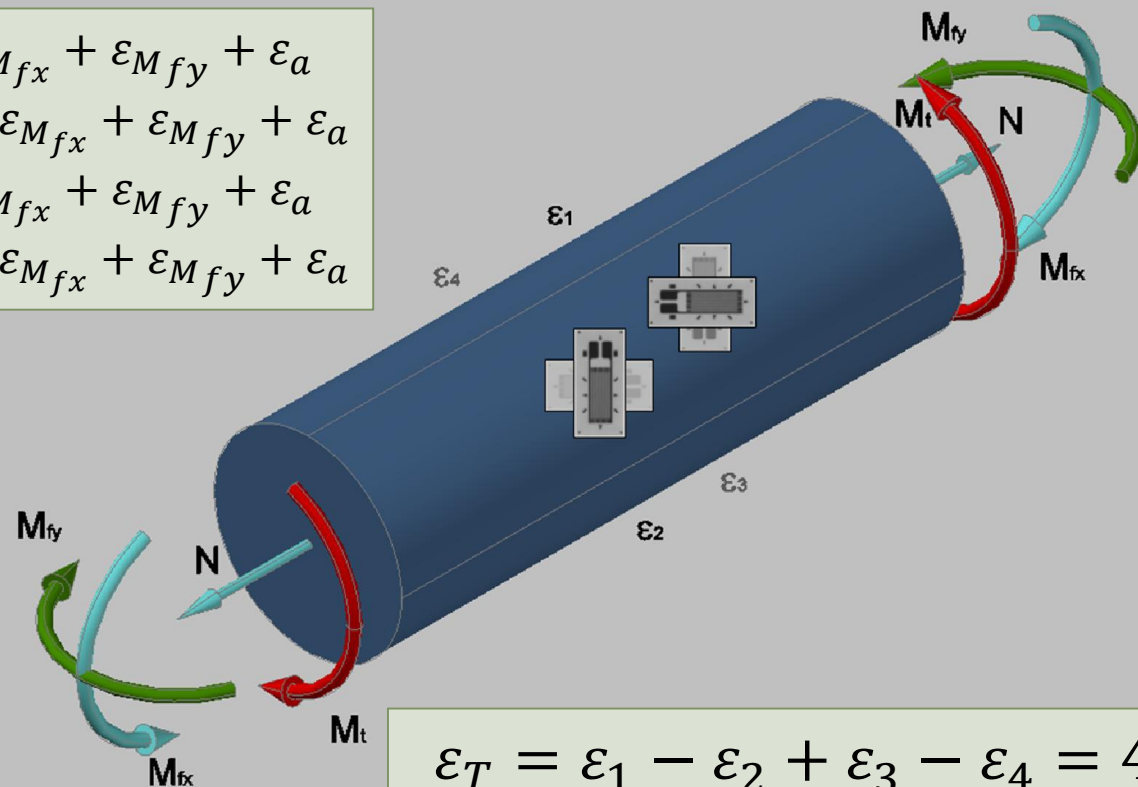
$$\varepsilon_T = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 = 4\varepsilon_{M_t}$$

Disposizioni estensimetriche

La misura delle sollecitazioni elementari Torsione

Disposizione 4: quattro estensimetri attivi disposti a $\pm 45^\circ$ sul piano xz collegati a ponte intero

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \varepsilon_{M_t} + \varepsilon_N + \varepsilon_{M_{fx}} + \varepsilon_{M_{fy}} + \varepsilon_a \\ \varepsilon_2 &= -\varepsilon_{M_t} + \varepsilon_N - \varepsilon_{M_{fx}} + \varepsilon_{M_{fy}} + \varepsilon_a \\ \varepsilon_3 &= \varepsilon_{M_t} + \varepsilon_N - \varepsilon_{M_{fx}} + \varepsilon_{M_{fy}} + \varepsilon_a \\ \varepsilon_4 &= -\varepsilon_{M_t} + \varepsilon_N + \varepsilon_{M_{fx}} + \varepsilon_{M_{fy}} + \varepsilon_a\end{aligned}$$



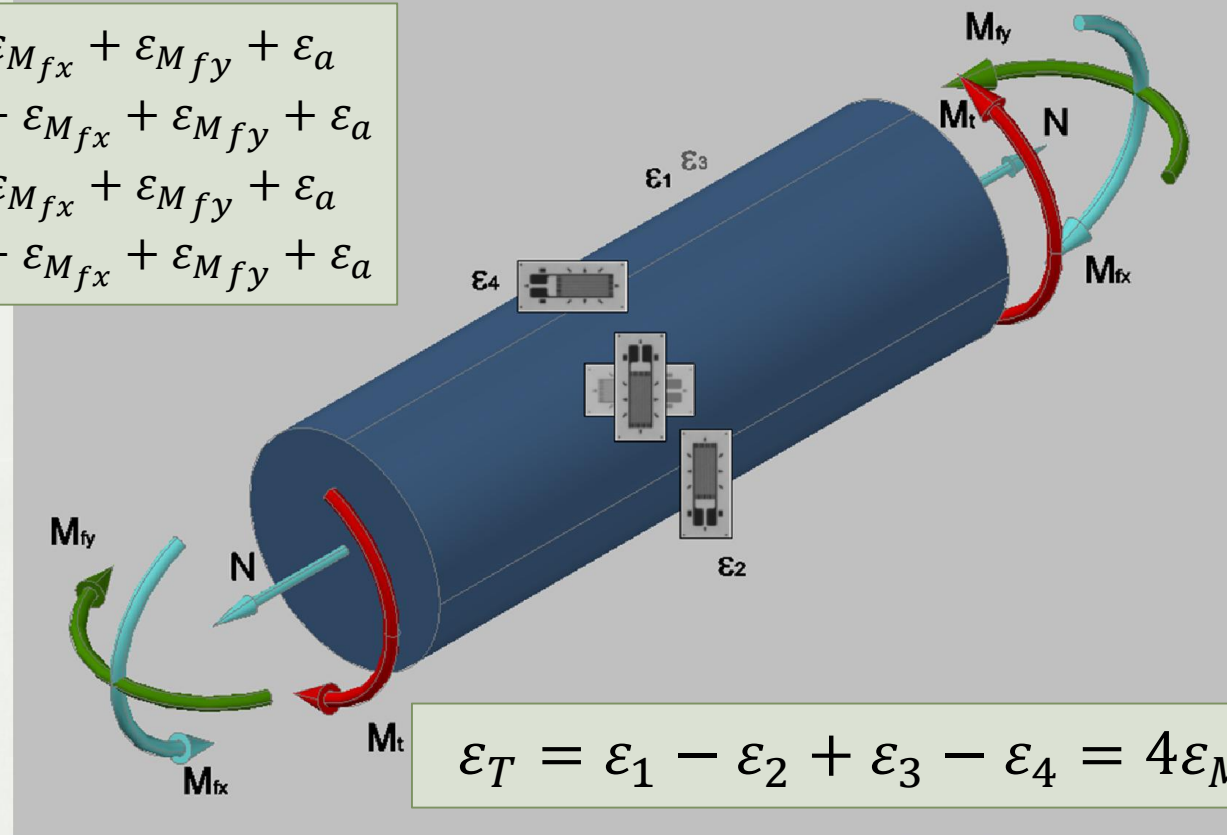
$$\varepsilon_T = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 = 4\varepsilon_{M_t}$$

Disposizioni estensimetriche

La misura delle sollecitazioni elementari Torsione

Disposizione 5: quattro estensimetri attivi disposti a $\pm 45^\circ$ sui quattro quadranti del cilindro collegati a ponte intero

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \varepsilon_{M_t} + \varepsilon_N + \varepsilon_{M_{fx}} + \varepsilon_{M_{fy}} + \varepsilon_a \\ \varepsilon_2 &= -\varepsilon_{M_t} + \varepsilon_N - \varepsilon_{M_{fx}} + \varepsilon_{M_{fy}} + \varepsilon_a \\ \varepsilon_3 &= \varepsilon_{M_t} + \varepsilon_N - \varepsilon_{M_{fx}} + \varepsilon_{M_{fy}} + \varepsilon_a \\ \varepsilon_4 &= -\varepsilon_{M_t} + \varepsilon_N + \varepsilon_{M_{fx}} + \varepsilon_{M_{fy}} + \varepsilon_a\end{aligned}$$



$$\varepsilon_T = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 = 4\varepsilon_{M_t}$$