

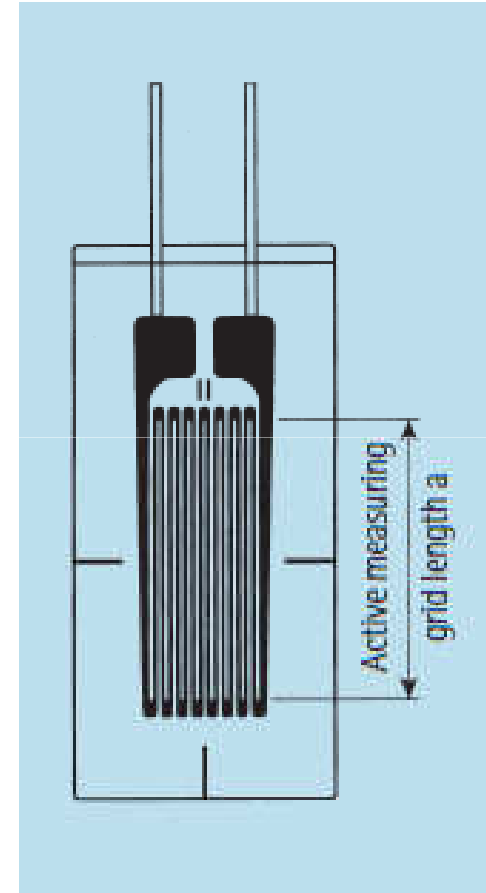
Meccanica Sperimentale

(A. A. 2019/2020)

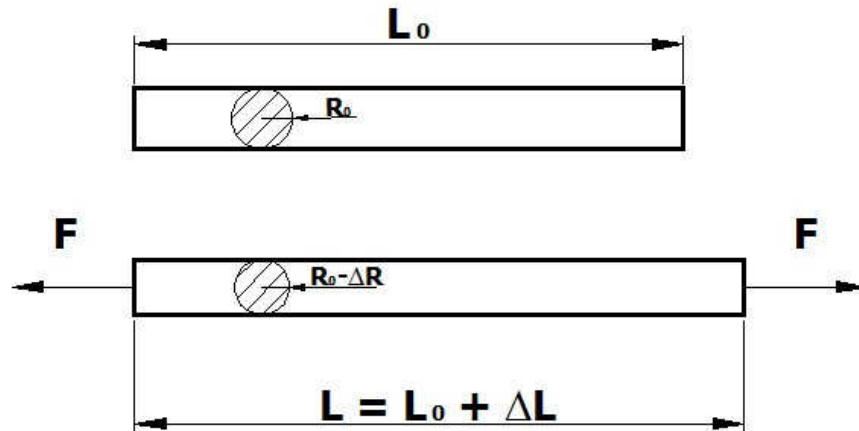
**Estensimetro elettrico a resistenza
(strain gauge)**

Sommario

- Principio di funzionamento
- Caratteristiche
- Influenza della temperatura
- Procedura di montaggio
- Circuiti di misura
- Applicazioni



Definizioni



Deformazione
(adimensionale):

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta L}{L_0}$$

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta r}{r_0}$$

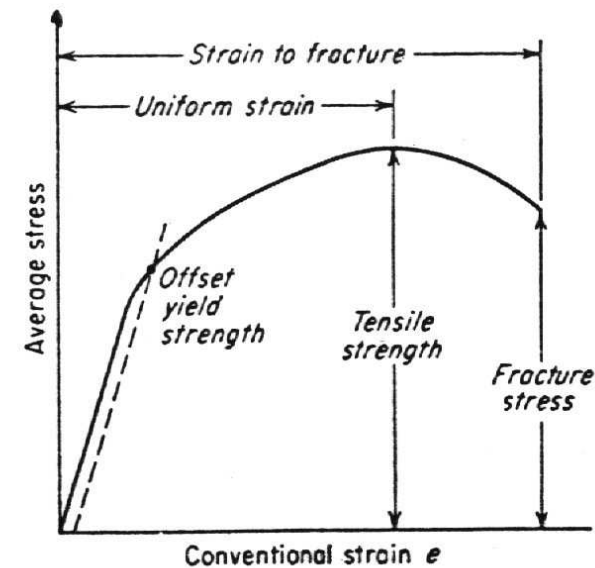
$$\varepsilon_t = -\nu \varepsilon_a$$

Tensione o sforzo ($\text{N/mm}^2 = \text{MPa}$):

$$\sigma_a = \frac{F}{A}$$

Legame tra sforzo e deformazione:

$$\sigma_a = E \varepsilon_a$$



Es.: curva sforzo-deformazione

Deformazione (ε)

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

La deformazione sarebbe adimensionale, ma a causa dei valori molto piccoli è più comodo moltiplicarla per 10^6 :

- unità di misura:

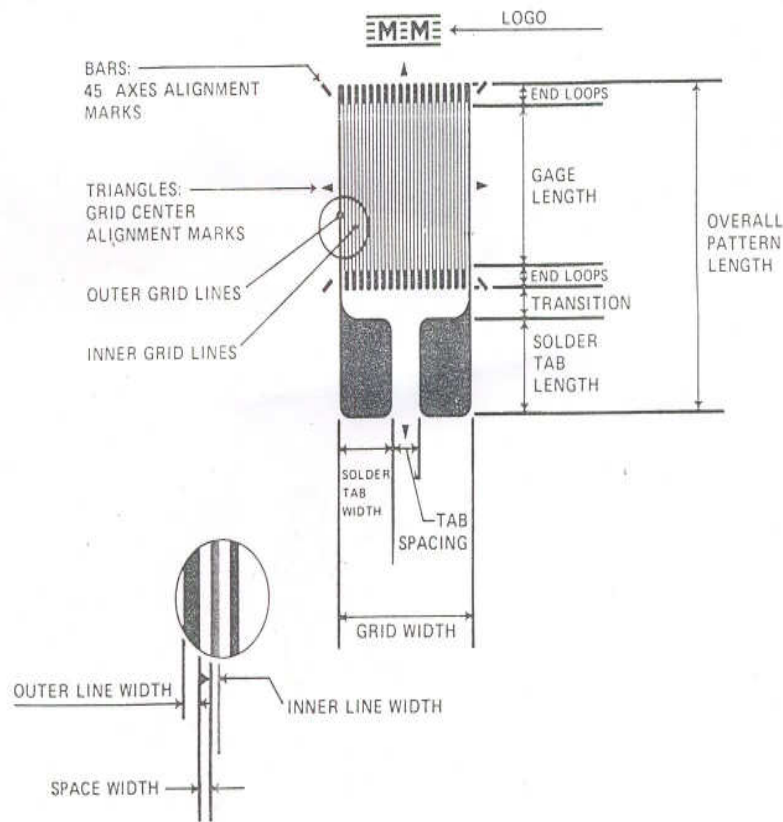
$$1 \mu\varepsilon \text{ (microepsilon)} = 1 \cdot 10^{-6}$$

$$\text{es: } \varepsilon = 10^{-2} = 0,01 = 1\% = 10000 \mu\varepsilon$$

(1 % significa che una barra lunga 1 m si allunga di 1 cm)

- deformazione positiva: allungamento
- deformazione negativa: contrazione

Principio di funzionamento

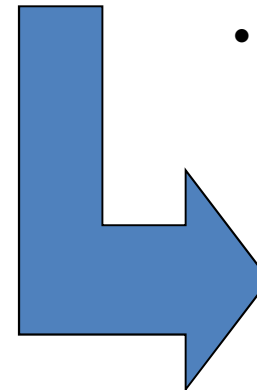


Gauge nomenclature and features of a typical foil strain gauge.

$$R = \frac{\rho l}{S} \quad (2^a \text{ legge di Ohm})$$

con:

- R resistenza elettrica
- l lunghezza del conduttore
- S sezione del conduttore
- ρ resistività



$$\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon$$

Sensibilità dell'estensimetro alla deformazione (nella direzione dell'asse dell'estensimetro)

L'estensimetro è un tipico trasduttore passivo

$$R = \frac{\rho l}{S}$$

(seconda legge di Ohm)

Principio di funzionamento

$$\ln R = \ln\left(\frac{\rho l}{S}\right) = \ln \rho + \ln l - \ln S$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S}$$

$$\frac{dS}{S} = 2 \frac{dr}{r} = -2\nu \frac{dl}{l}$$

$$\frac{dl}{l} = \varepsilon$$



$$\frac{dR}{R} = \varepsilon(1 + 2\nu)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon$$

Principio di funzionamento

Gauge Factor
 $K \cong 2$

(circa costante)

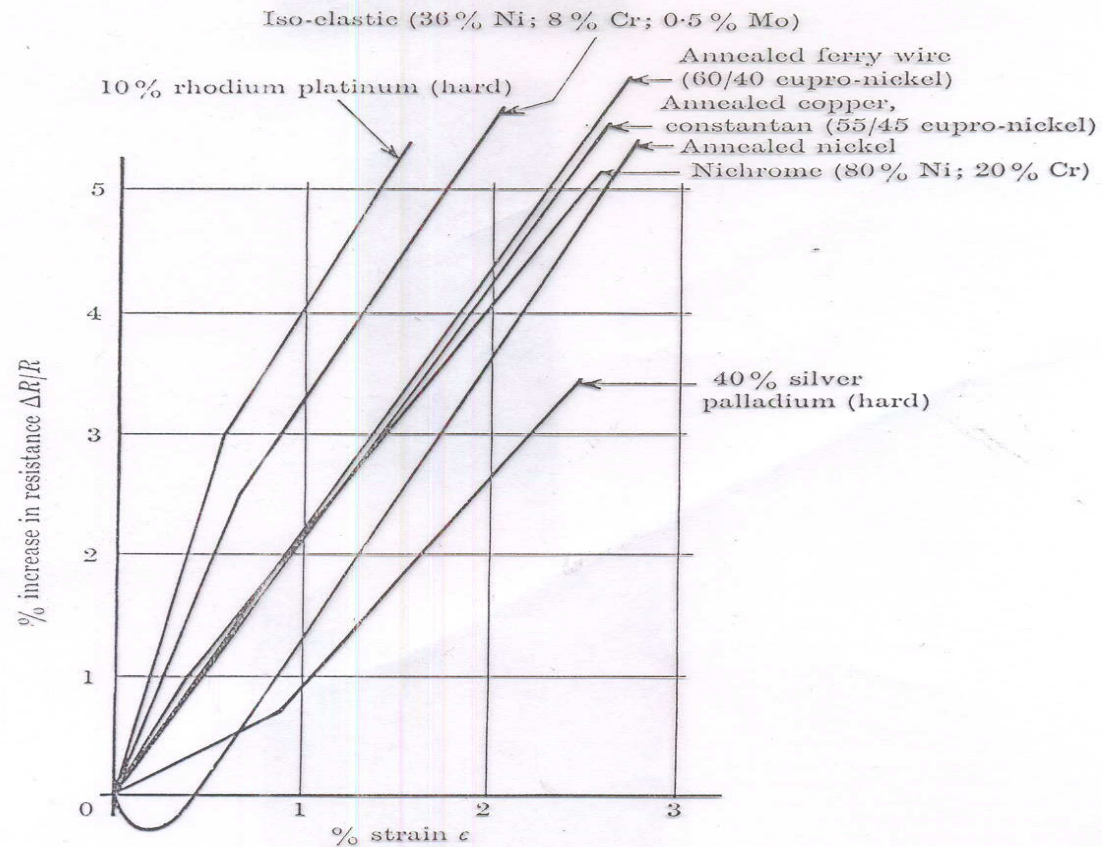
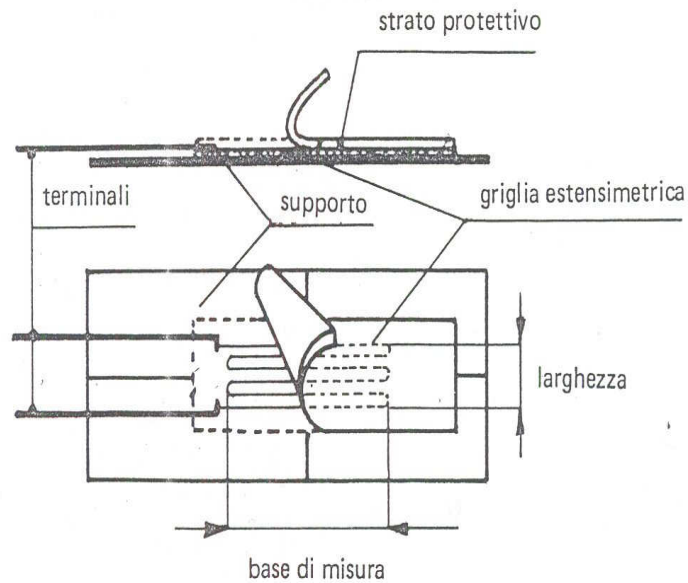


Fig. 2.1. $K = (\Delta R/R)/(\Delta L/L) = \text{slope of graphs.}$
 (Courtesy of Murray & Stein, 1958.)

Caratteristiche

Componenti di un estensimetro Installato:



Estensimetro elettrico a resistenza.

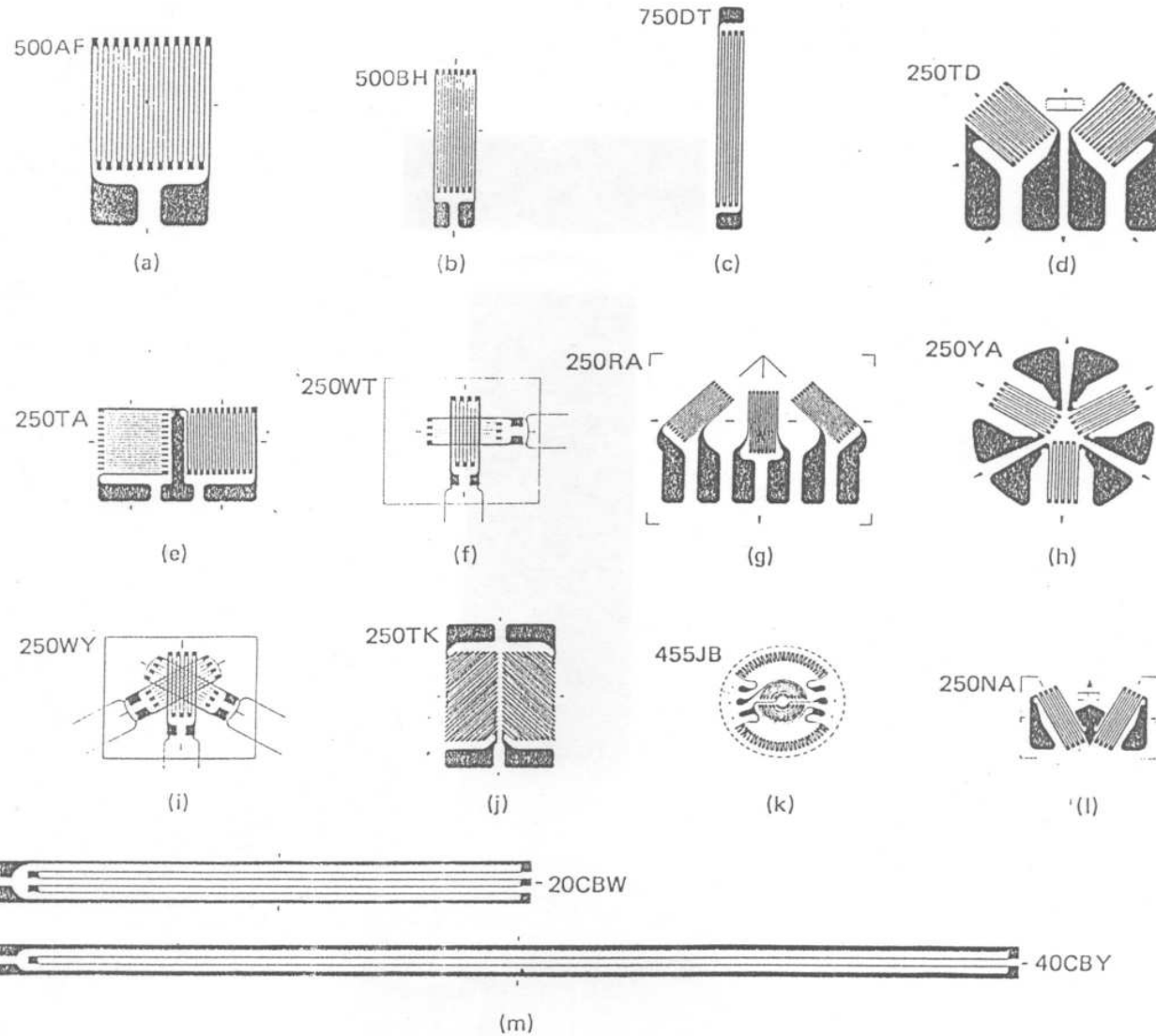
- Griglia
- Supporto
- Terminali
- Adesivo
- Protettivo

Caratteristiche: resistenza elettrica

$$\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon$$

- **120 Ω** uso generale
- 350 Ω trasduttori / misure di precisione
- 600 Ω usi speciali (forniti su richiesta)
- 1000 Ω

Caratteristiche: griglie



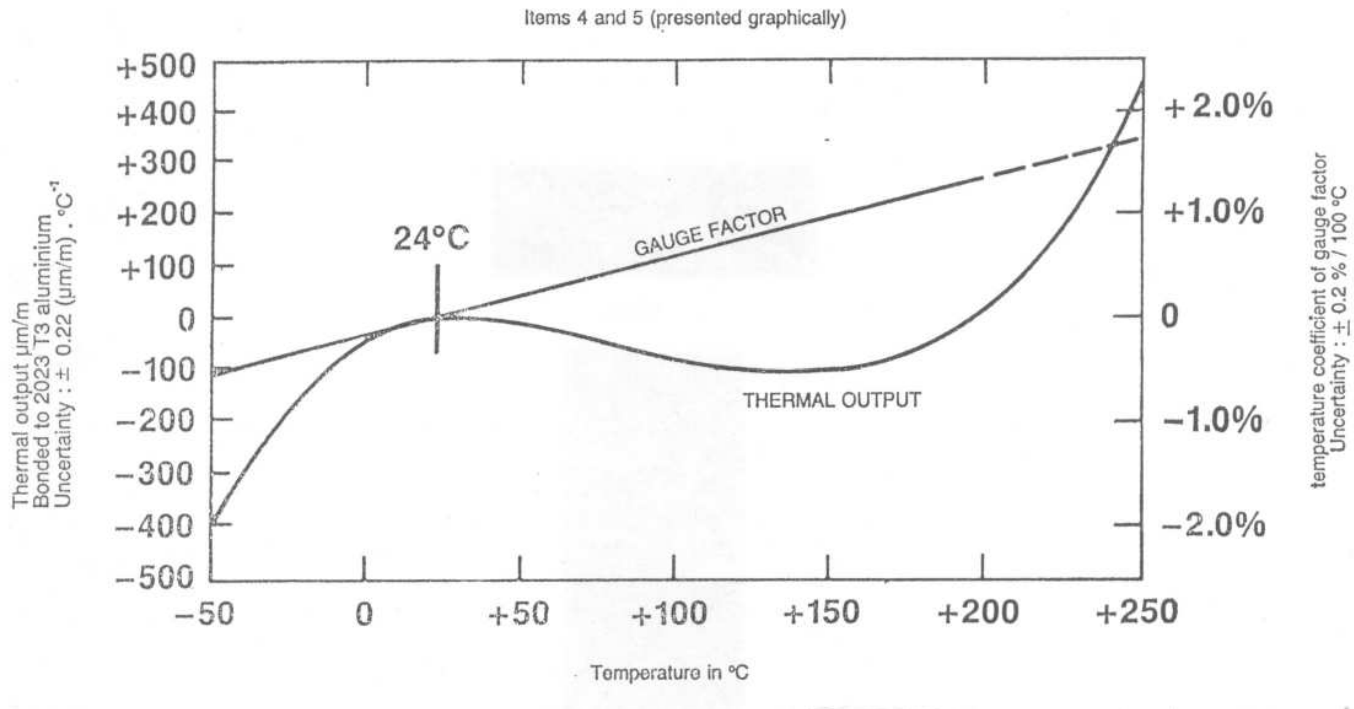
Influenza della temperatura

Gli estensimetri sono sensibili (oltre che alla deformazione) anche alle variazioni di temperatura:

$$\frac{\Delta R}{R} = K_T \Delta T$$

(con $K_t \neq K$)

Influenza della temperatura



- Variazione del Gauge Factor
- Thermal Output (deformazione apparente ε_a)

Influenza della temperatura sul gauge factor

- variazione lineare $K(T) = K_{\text{rif}} (1 + \beta \Delta T)$
- K_{rif} per $T = 24 \text{ }^\circ\text{C}$
(quasi sempre trascurabile)

Influenza della temperatura: thermal output

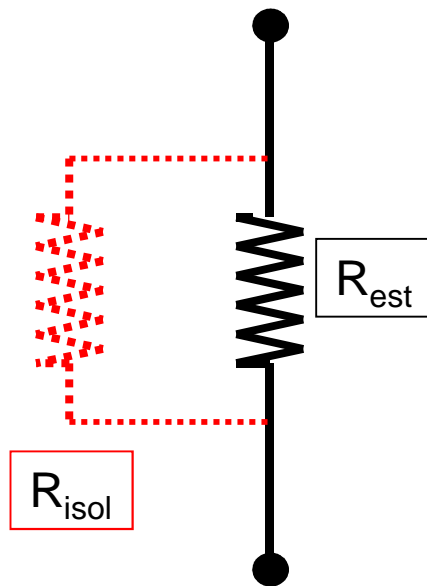
$$\left(\frac{\Delta R}{R} \right)_{\Delta T} = (\beta - \alpha)K \Delta T + \gamma \Delta T = K_T \Delta T$$

Sensibilità dell'estensimetro alla temperatura: effetto parassita

- α = coefficiente di dilatazione termica della griglia dell'estensimetro
- β = coefficiente di dilatazione termica del materiale su cui è montato l'estensimetro
- γ = coefficiente di temperatura della resistenza
- K = gauge factor

$\varepsilon_a = 0$ per $T = 24$ °C, estensimetro autocompensato se scegliamo bene i materiali

Influenza dell'ambiente: isolamento



- Ambiente & Umidità & Isolamento **variabili** e non predeterminabili
- Isolamento perfetto $R_{isol} = \infty$
Isolamento assente $R_{isol} = 0$
- Resistenza isolamento:
in laboratorio (al chiuso) $> 2.000 \text{ M}\Omega$
in campo (all'aperto) $> 500 \text{ M}\Omega$







Esempio: se $R_{isol} = 1 \text{ M}\Omega$
e $R_{est} = 120 \text{ }\Omega$:

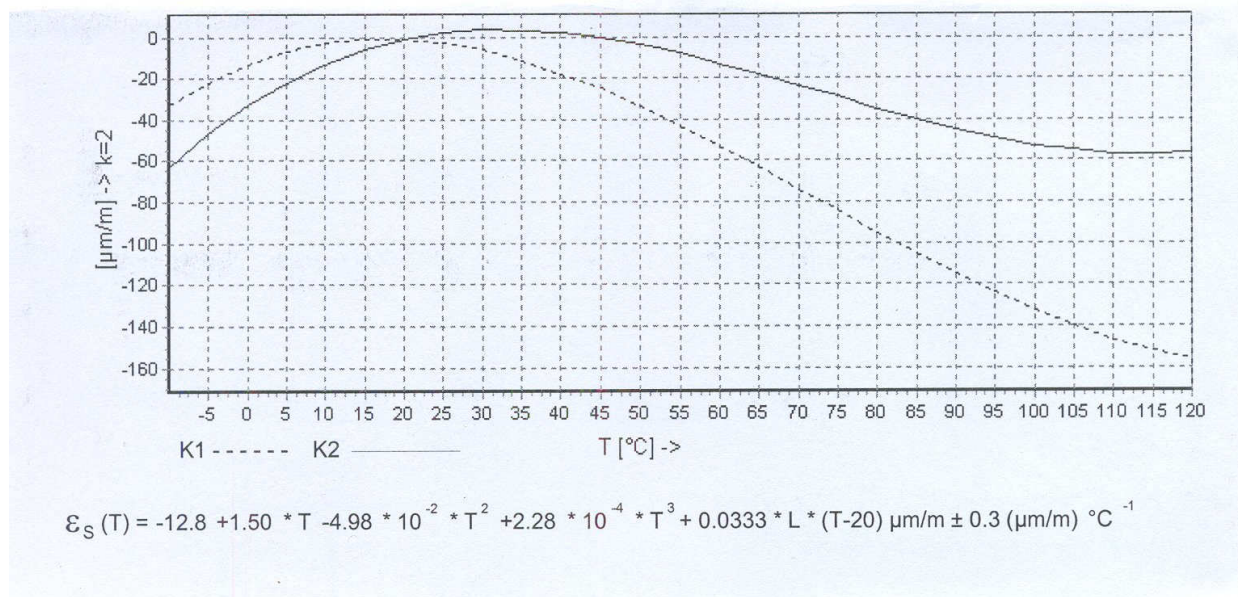
$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_{est}} + \frac{1}{R_{isol}} \Rightarrow R_{tot} = 119,986 \text{ }\Omega$$

Riepilogo caratteristiche

- gage factor (es.) $K = 2 \pm 1\%$
- resistenza $R = 120; 350; 1000 \Omega \pm 0,25\%$
- linearità
0,1% fino a 5.000 $\mu\varepsilon$
1% fino a 10.000 $\mu\varepsilon$
- rottura es. 50.000 $\mu\varepsilon$
- temperatura $-70 \div +100 / 200 \text{ }^\circ\text{C}$
- Thermal Output $\varepsilon_a(T)$ - est. autocompensati
- risoluzione
0,1 $\mu\varepsilon$ (sensore)
2 - 5 $\mu\varepsilon$ (catena di misura)

Riepilogo caratteristiche

	Dehnungsmeßstreifen Strain Gauges Jauges d'extensométrie		Bestellnummer Order No. No. de référence	1-LY11-3/120 
	Widerstand Resistance Résistance	120 Ω ± 0.35 %	Typ Type Type	3/120LY11 
	k-Faktor Gauge factor Facteur k	2.02 ± 1 % 	Stückzahl Contents Quantité	10 
Temperaturkoeffizient des k-Faktors Temperature coefficient of gauge factor Coefficient de température du facteur k		Folienlos Lot Lot de la feuille	93 ± 10 [10 ⁻⁶ / °C] (-10...+45°C)	
Querempfindlichkeit Transverse Sensitivity Sensibilité transverse	0.2 %	Herstellungslos Batch Lot de fabrication	A401/06 812038840 	
Temperaturkompensation: Angepaßt für Temperature Compensation: Compensated for Compensation de température: Compensation pour	Ferritischen Stahl mit Steel with Acier avec	α = 10.8 [10 ⁻⁶ / °C]		



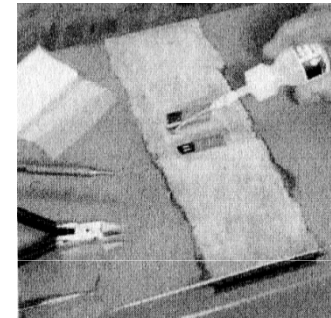
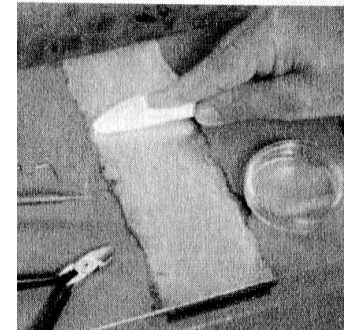
Riepilogo caratteristiche

- converte grandezze meccaniche in elettriche
- consente letture remote, multiple - continue, discontinue
- carichi di trazione, compressione - statici, variabili
- risoluzione e precisione idonee agli impieghi strutturali
- non risente eccessivamente dell'ambiente
- non invasivo, di semplice uso

Procedura di montaggio

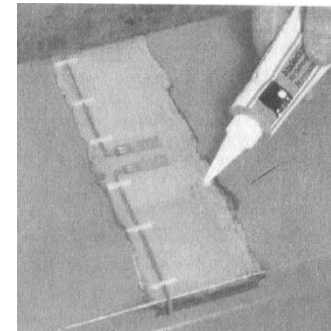
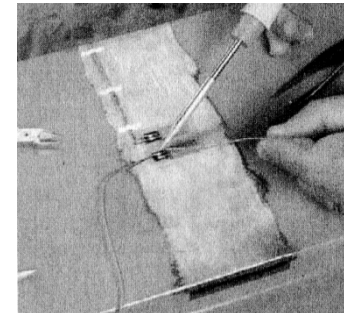
- Preparazione iniziale
 - eliminare irregolarità, sgrassaggio, pulitura, etc.
- Irruvidimento (carta abrasiva)
- Tracciatura
- Pulizia e decontaminazione (eventualmente usando una soluzione acida e successiva neutralizzazione)
- Posizionamento estensimetro e basetta sulla struttura
- Applicazione dell'adesivo e incollaggio
- Ispezione visiva
- Fissaggio dei terminali
- Fissaggio dei cavi alla basetta
- Verifica dell'installazione:
 - ispezione visiva
 - verifica continuità
 - verifica isolamento
 - verifica dell'adesione
- Protezione dell'installazione

Preparazione della superficie



Incollaggio

Collegamenti elettrici



Protezione

Circuiti di misura

Le variazioni di R sono però molto piccole:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \varepsilon$$

$$R = 120 \, \Omega$$

$$K \cong 2$$

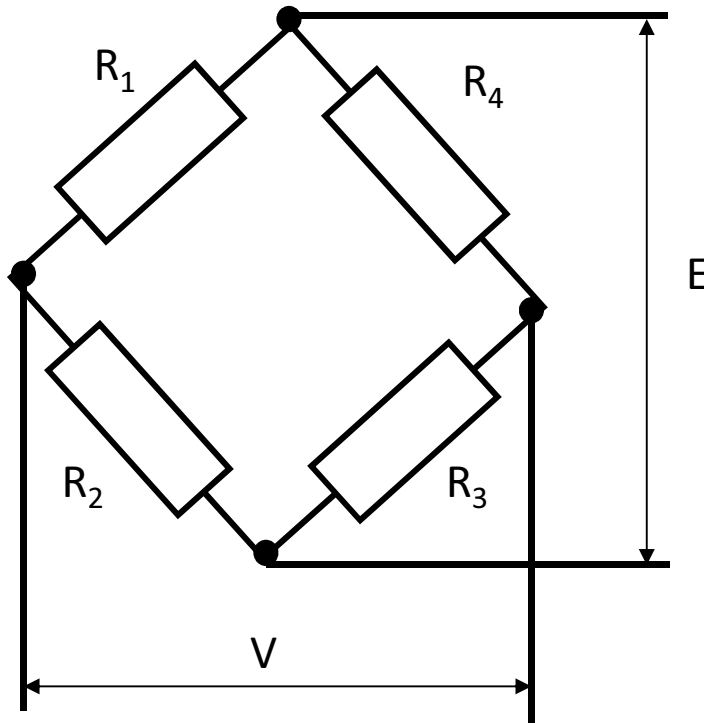
$$\varepsilon = 1 \, \mu\varepsilon$$

$$\Delta R = 0,24 \, \text{m} \, \Omega$$

$$\varepsilon = 10.000 \, \mu\varepsilon$$

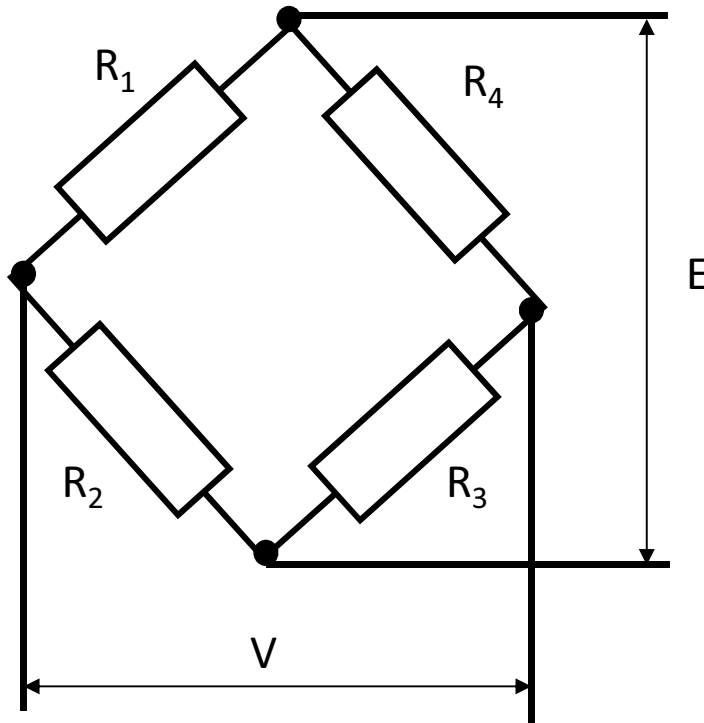
$$\Delta R = 2,4 \, \Omega$$

Se vogliamo misurare piccole deformazione (es. qualche $\mu\varepsilon$), è necessario uno specifico circuito:

Circuiti di misura: ponte di **Wheatstone**

- E tensione di alimentazione
- V tensione di uscita
- Ponte equilibrato ($V = 0$)
se $R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$
- $R_i \rightarrow R_i + \Delta R_i$

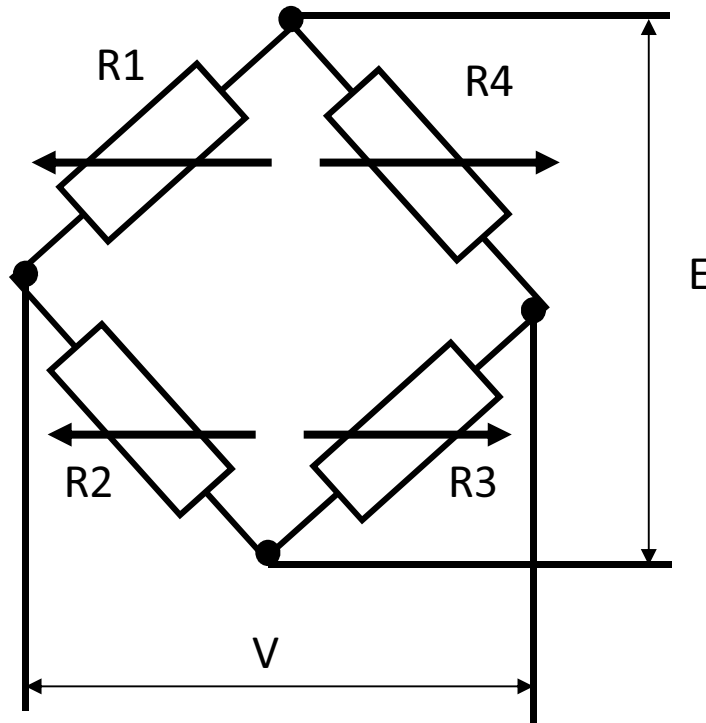
$$V = \frac{E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

Circuiti di misura: ponte di **Wheatstone**

Le variazioni di resistenza su lati
adiacenti si sottraggono.

Le variazioni di resistenza su lati
opposti si sommano.

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

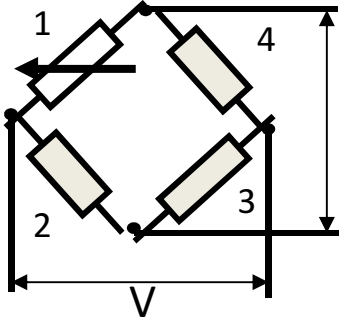
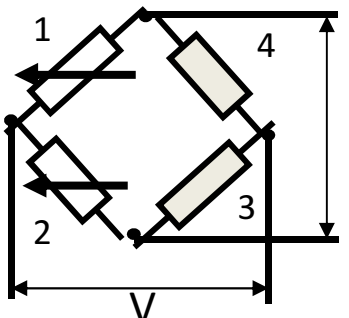
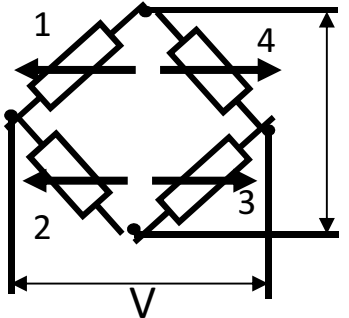
Circuiti di misura: ponte di **Wheatstone**

Se i rami del ponte sono costituiti da estensimetri:

$$\Delta R / R = K \varepsilon$$

$$V = \frac{EK}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

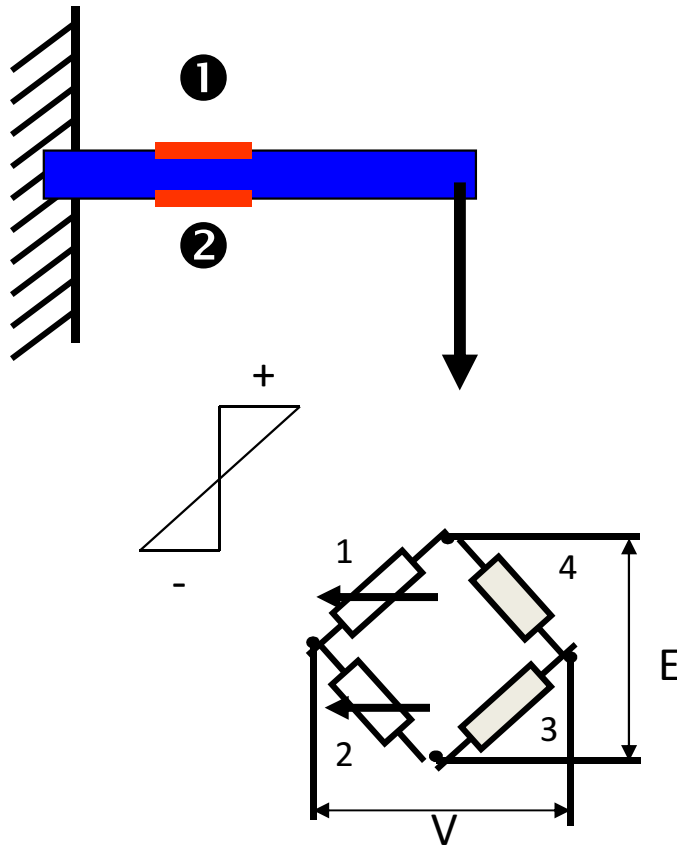
Circuiti di misura: ponte di **Wheatstone**

	<p>¼ di ponte</p>	$V = \frac{EK}{4} \varepsilon_1$
	<p>½ ponte</p>	$V = \frac{EK}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$
	<p>ponte intero</p>	$V = \frac{EK}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$

Circuiti di misura: ponte di **Wheatstone**

Flessione:

$$V = \frac{EK}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$



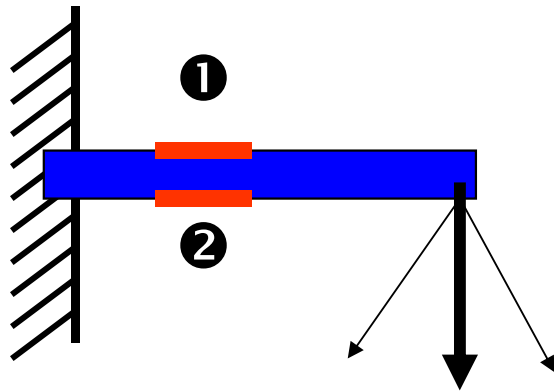
- **1** ε_f **2** $-\varepsilon_f$

- $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = 2 \varepsilon_f$

Circuiti di misura: ponte di **Wheatstone**

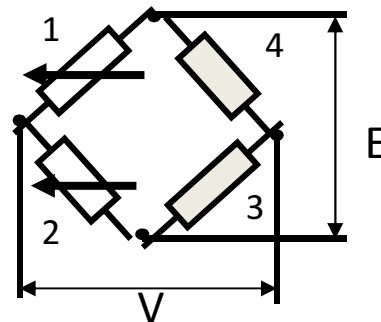
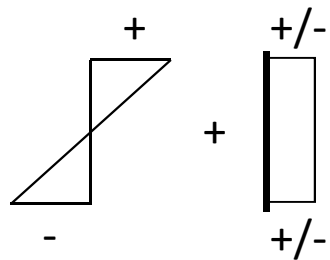
Flessione:

$$V = \frac{EK}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

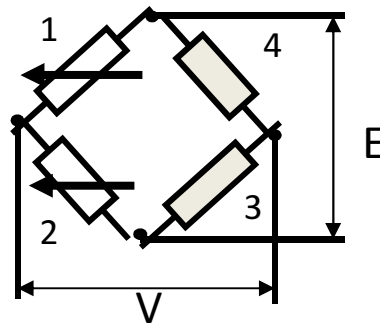
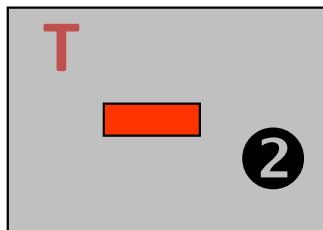
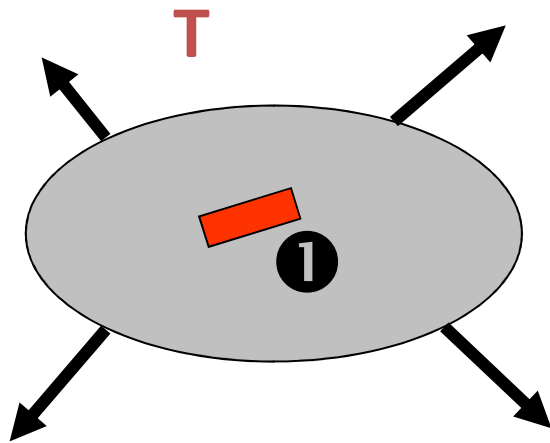


- **1** $+\varepsilon_f + \varepsilon_n$
- **2** $-\varepsilon_f + \varepsilon_n$

- $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = 2 \varepsilon_f$



Circuiti di misura: compensazione della temperatura



$$V = \frac{EK}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

- **1** $\varepsilon_F + \varepsilon_T$
- **2** ε_T
- $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \varepsilon_F$
- estensimetro
compensatore

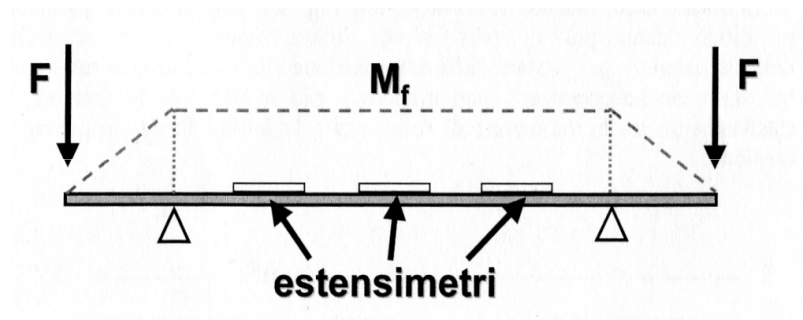
Ponte di Wheatstone

Riepilogando, il ponte di Wheatstone può svolgere, **opportunamente configurato**, 4 funzioni principali:

- Trasforma la variazione di resistenza elettrica in variazione di tensione elettrica;
- Aumenta la sensibilità della misura;
- Permette la compensazione automatica dell'influenza della temperatura;
- Permette l'eliminazione dell'effetto di componenti di sforzo non desiderate.

Taratura dell'estensimetro

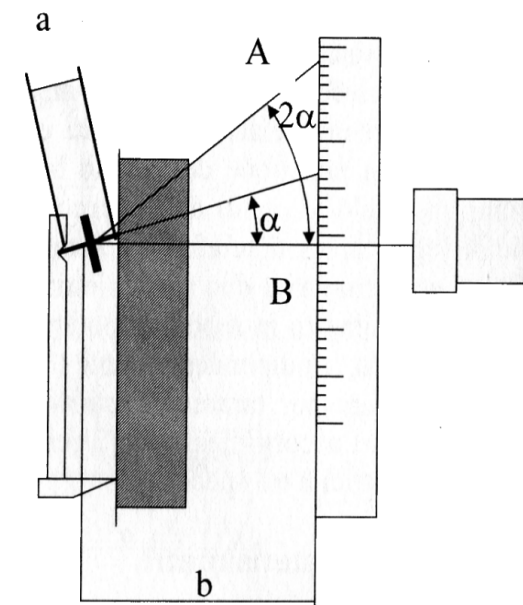
Siccome un estensimetro dopo l'uso diventa inutilizzabile (a causa dell'incollaggio), la taratura deve essere fatta a campione (es. 2% di un lotto di produzione, da cui si ricavano media e scarto tipo).



Si usano travi a flessione (a 4 punti, per avere momento flettente costante).

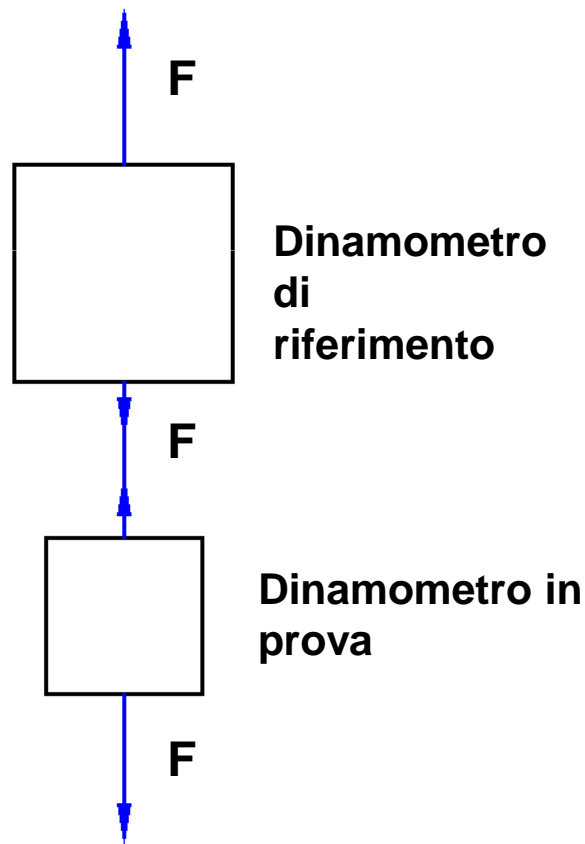
Il campione di taratura è rappresentato da un estensimetro con precisione superiore (es. estensimetro ottico).

Perché?



Esempio: propagazione degli errori

Verifica di un dinamometro usando un altro dinamometro



La differenza fra i valori letti e quelli “veri” è dovuta a due termini:

- errore del dinamometro in prova (es. classe di precisione $\pm 1\%$);
- errore del dinamometro di riferimento (es. classe di precisione $\pm 0,1\%$).

Esempio: propagazione degli errori

Verifica di un dinamometro usando un altro dinamometro

Ipotesi: consideriamo errori casuali distribuiti secondo la gaussiana; consideriamo inoltre un intervallo di confidenza al 99,7% (ovvero $\pm 3\sigma$)

$\pm 1\%$ significa che nel 99,7 % dei casi l'errore è inferiore a 1% :

$$\pm 3\sigma_1 = \pm 1 \% \rightarrow \sigma_1 = 0,33 \%$$

$\pm 0,1\%$ significa che nel 99,7 % dei casi l'errore è inferiore a 0,1% :

$$\pm 3\sigma_2 = \pm 0,1 \% \rightarrow \sigma_2 = 0,033 \%$$

Scarto combinato:
$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = 0,332\%$$

Quindi usando uno strumento 10 volte più preciso dell'altro, l'errore è coperto da quello meno preciso.

Estensimetria

Applicazioni

- Misure di deformazione
- Costruzione di trasduttori

Estensimetria

Misure di deformazione



Estensimetria

Trasduttori

- Celle di carico (misura di forze, coppie, etc.)
- Accelerometri
- Sensori di deformazione/spostamento
- Sensori di pressione
- Sensori di temperatura

Estensimetria

Celle di carico

- a trazione/compressione
- a flessione
- a taglio
- torsionometri

Estensimetria

Celle di carico a trazione/compressione

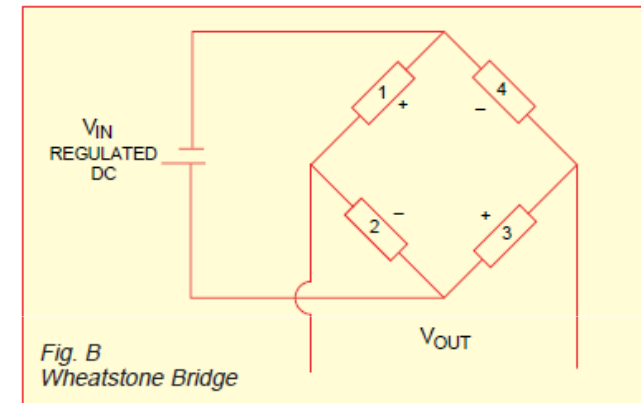
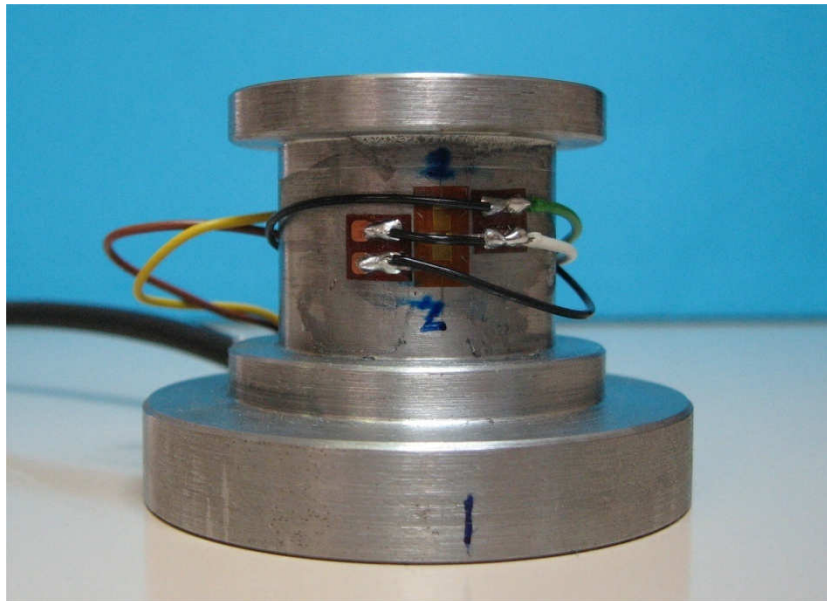
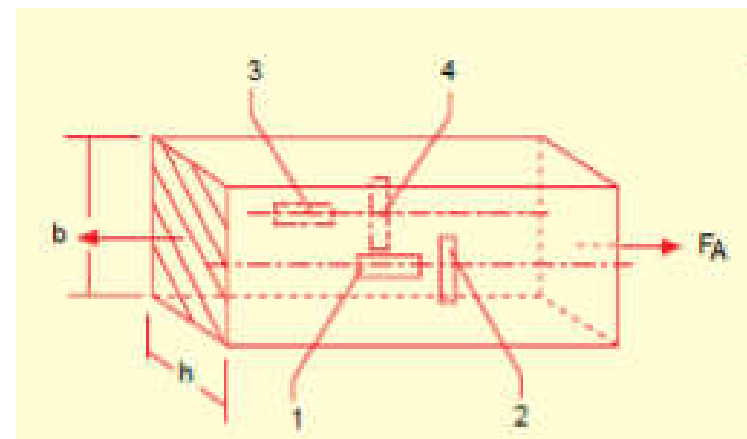
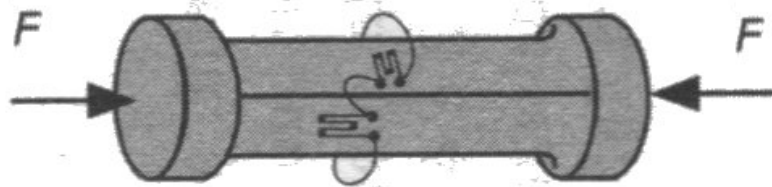
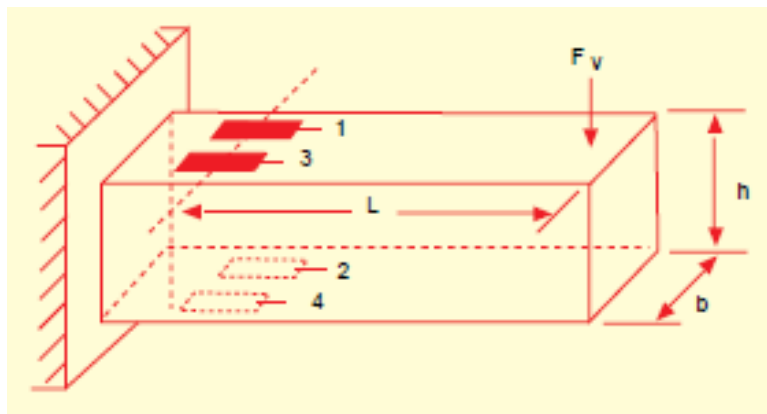
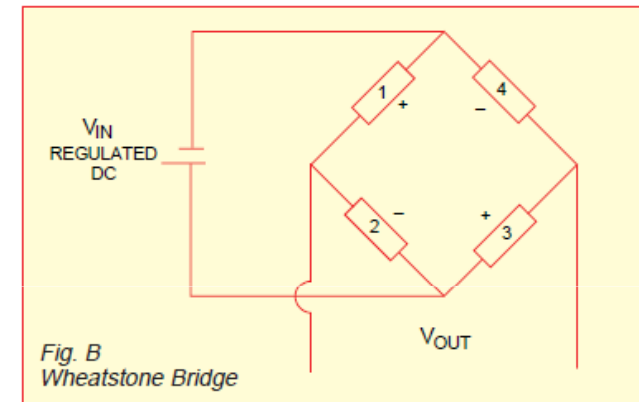


Fig. B
Wheatstone Bridge



Estensimetria

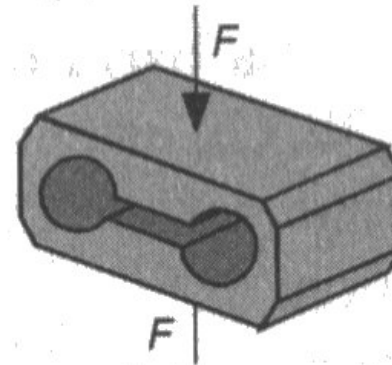
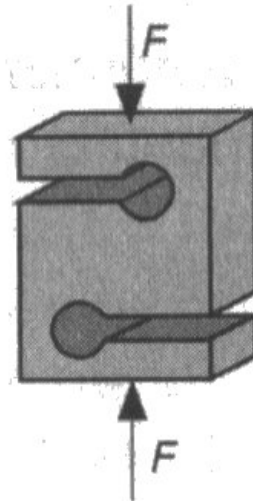
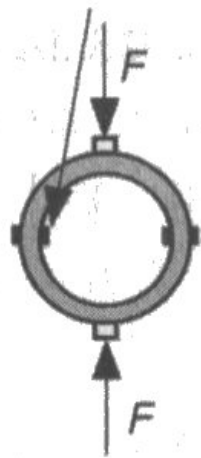
Celle di carico a flessione



Estensimetria

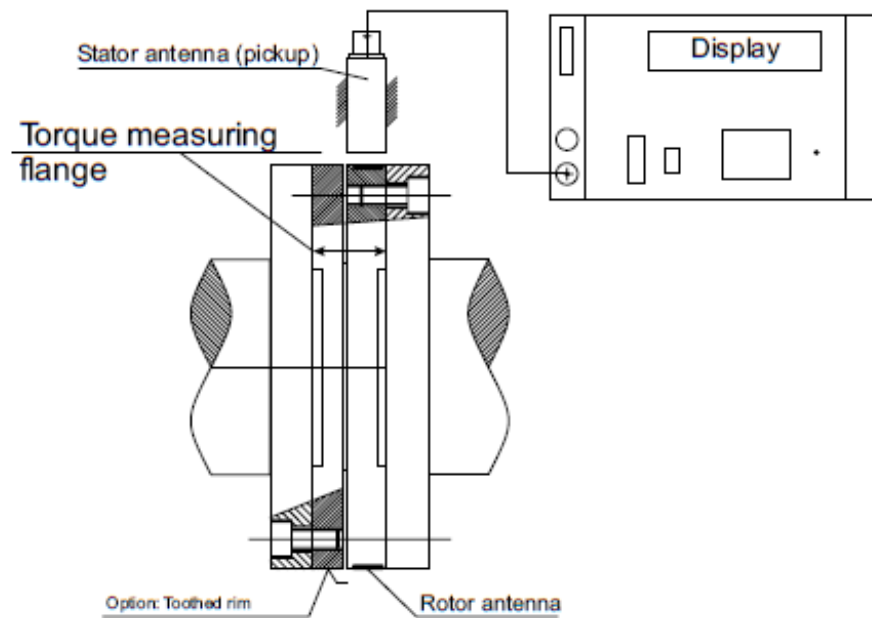
Celle di carico a flessione

estensimetro



Estensimetria

Torsiometri



Estensimetria

Accelerometri

Strain Gage Accelerometer



Applications

- Aircraft Flight Test
- Missile/Rocket Test
- Suspension Test
- Deceleration/Brake Test

Features

- Operates from ± 5 g to ± 500 g
- Wide temperature range
- Low cross axis sensitivity

Estensimetria

Sensori di deformazione/spostamento



Clip-on Axial Extensometer

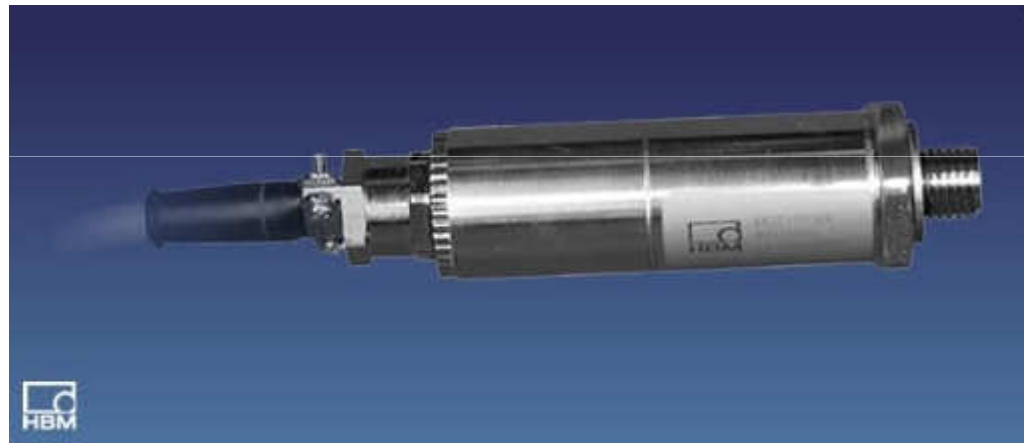


Clip-on Transverse Extensometer



Estensimetria

Trasduttori di pressione



Catena di misura

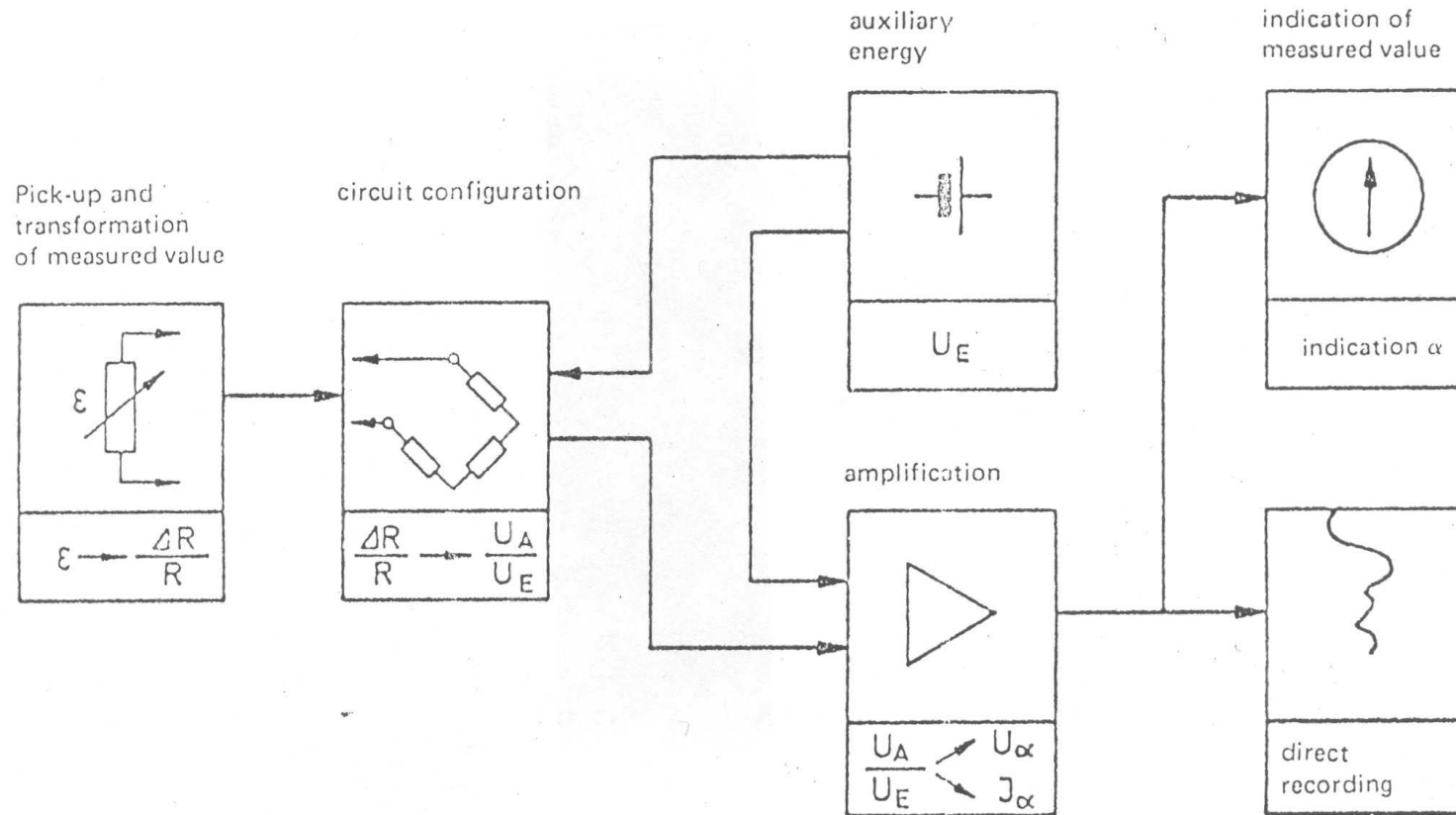


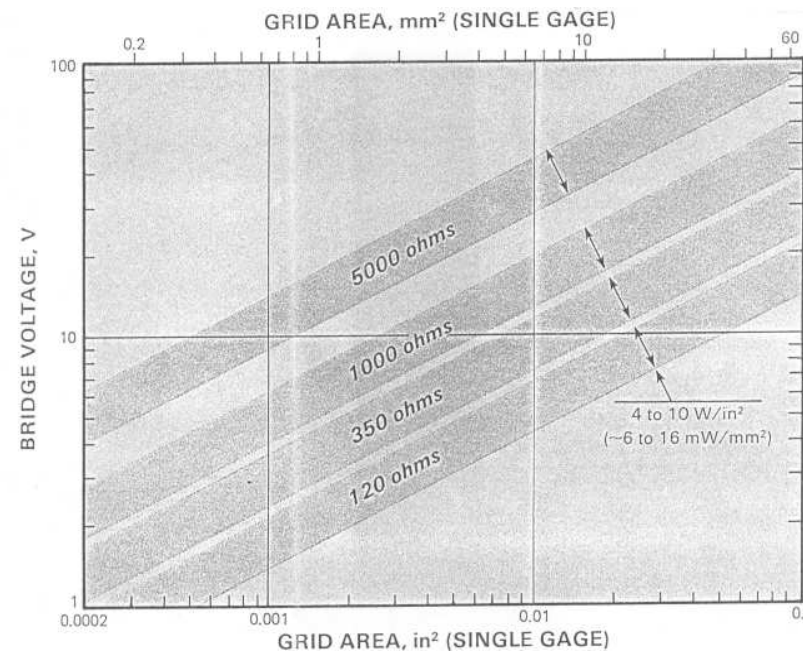
fig. 6: schematic structure of a measurement chain

Alimentazione c.c.

$$V = \frac{EK}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

Potenza

$$W = I^2 R$$



- Tensione di alimentazione $E = 0,5 - 15 \text{ V}$
- Può essere continua o alternata - deve essere stabile

Amplificazione

$$V = \frac{EK}{4} \varepsilon_1$$

- $E = 2 \text{ V} ; K = 2$
- $\varepsilon = 1 \text{ } \mu\varepsilon$ $V = 0,001 \text{ mV}$
- $\varepsilon = 10.000 \text{ } \mu\varepsilon$ $V = 0,01 \text{ V}$
- Se usiamo un amplificatore con guadagno 1000 \Rightarrow
uscita 0,001 - 10 V. In generale:

$$V = \frac{EGK}{4} \varepsilon_1$$

con G "gain"
(amplificazione)

Centralina estensimetrica

Una generica centralina assolve quindi alle seguenti funzioni:

- alimentazione
- amplificazione
- completamento del ponte
- azzeramento (offset) del ponte (es. mediante resistenze variabili)