



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE

Misure di spostamento e dimensionali

Corso: MISURE MECCANICHE, TERMICHE E COLLAUDI [113MI]

Prof. Lucia Parussini

Prof. Rodolfo Taccani

Prof. Ronelly De Souza

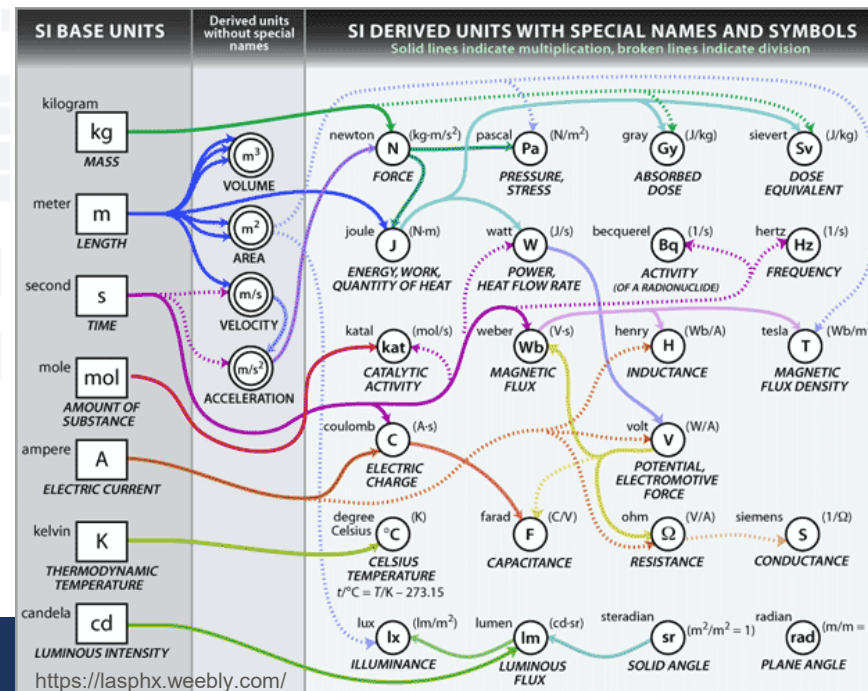
Obiettivi della lezione:

- Comprendere il principio di funzionamento di alcuni dei principali **strumenti di misura meccanici ed elettromeccanici**.
- Conoscere le caratteristiche dei principali trasduttori di **spostamento senza contatto**.
- Descrivere i principali tipi e l'impiego degli **encoder** per misure di posizione e velocità.
- Spiegare il funzionamento e le applicazioni tipiche degli **estensimetri**.
- Interpretare il ruolo dei **freni come strumenti di misura** di coppia e potenza meccanica.

Introduzione

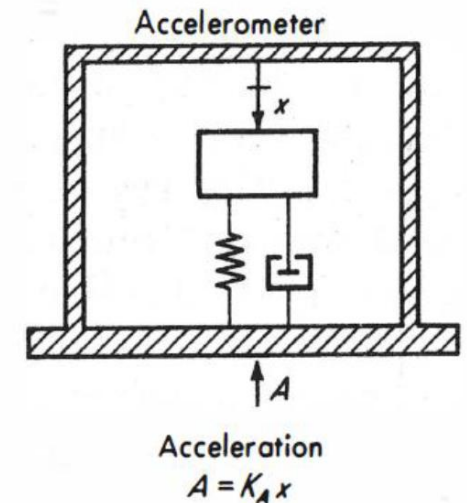
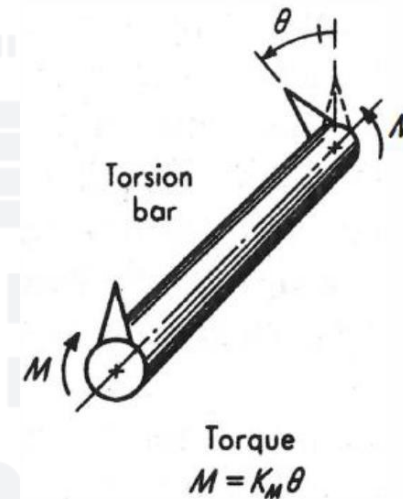
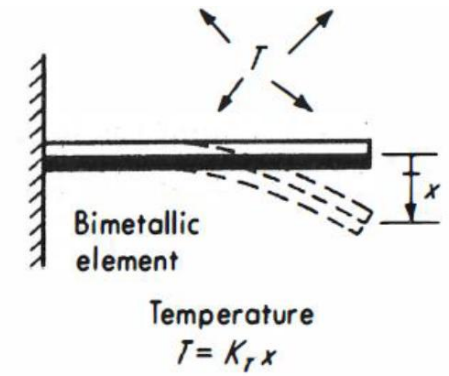
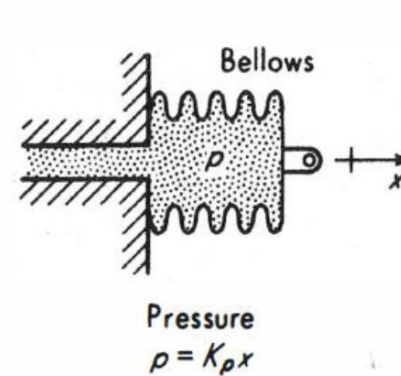
Richiami sui principi di misura e sulle grandezze meccaniche coinvolte

- Le misure meccaniche si basano sulla determinazione di grandezze fisiche fondamentali: **lunghezza, massa, tempo e temperatura** (sistema internazionale).
- Le grandezze derivate (**spostamento, velocità, forza, pressione, coppia**) si ottengono da queste grandezze fondamentali.



Richiami sui principi di misura e sulle grandezze meccaniche coinvolte

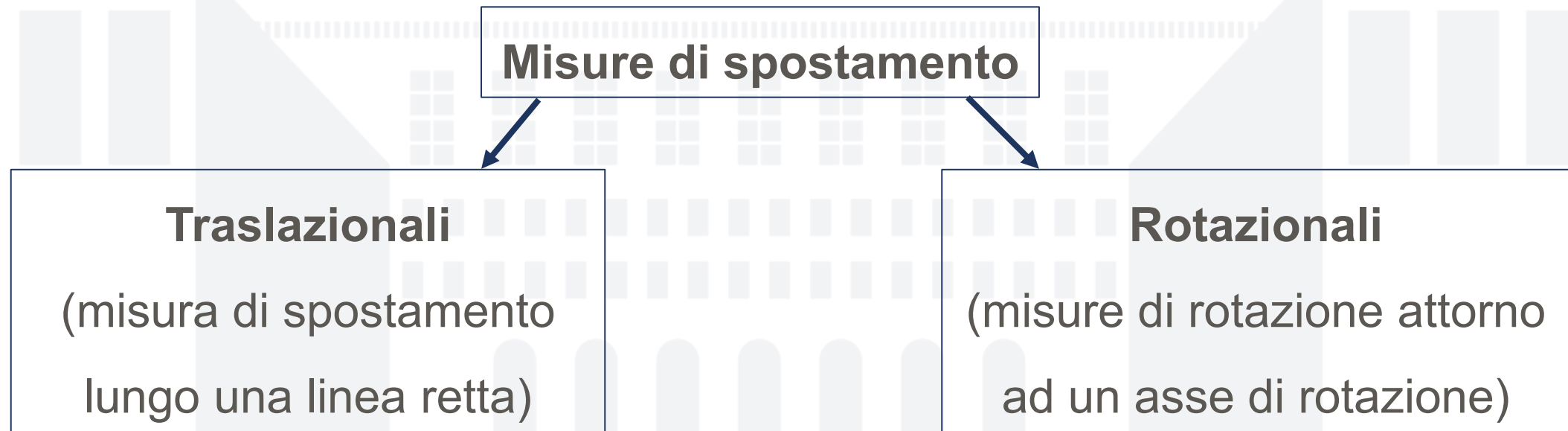
Le misure di spostamento sono alla base di altri tipi di misura, poiché sono alla base di misure di altre grandezze come ad esempio forza, pressione, temperatura.



Richiami sui principi di misura e sulle grandezze meccaniche coinvolte

I trasduttori dedicati alla misura di spostamento si possono classificare in accordo:

- alla natura di elaborazione elettronica del segnale (**analogica o digitale**)
- alla natura del **principio fisico di misura**
- al fatto che la misura venga effettuata **con o senza contatto con l'oggetto** di misura



Strumenti meccanici e elettromeccanici

Calibri e strumenti meccanici di misura diretta

I **calibri** e i **micrometri** appartengono alla categoria delle **misure dirette** (il valore della grandezza si ottiene per **confronto immediato** con un **campione** o una **scala graduata**).



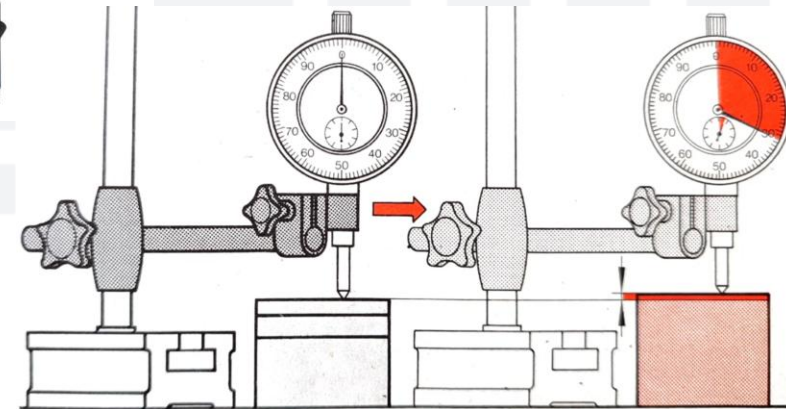
Micrometro



Calibro a corsoio

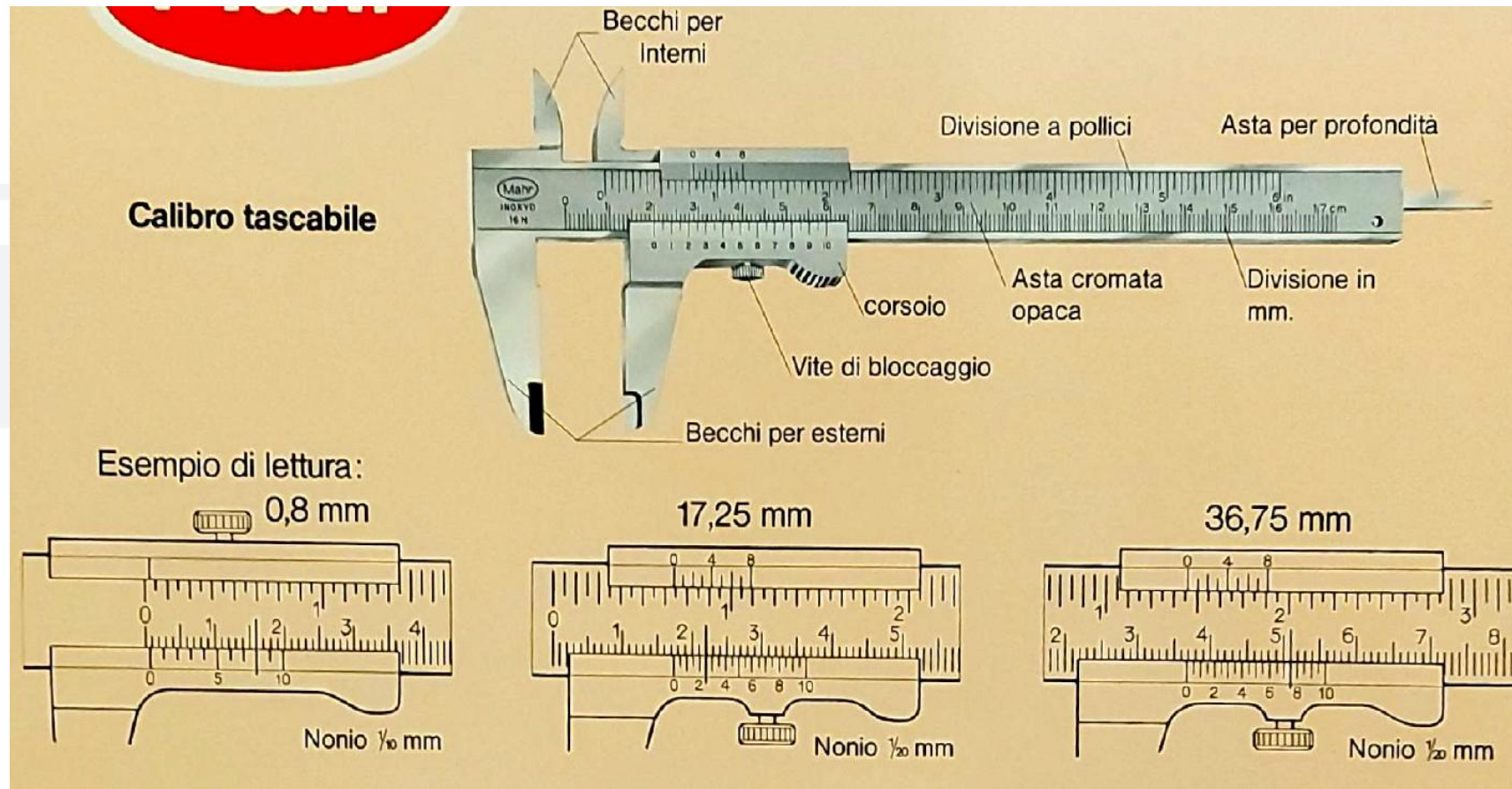


Comparatori
centesimali



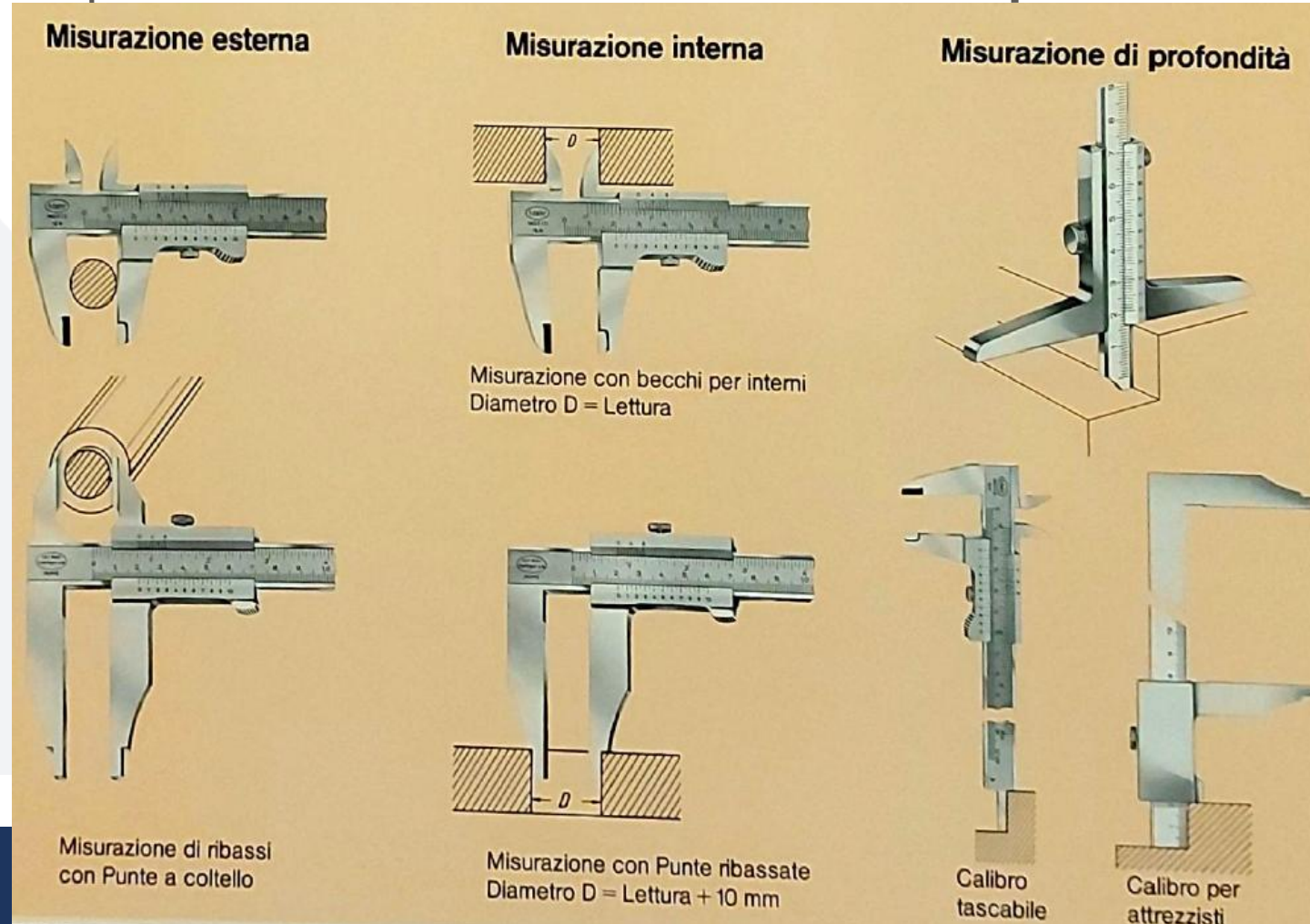
Calibri e strumenti meccanici di misura diretta

I **calibri** e i **micrometri** appartengono alla categoria delle **misure dirette** (il valore della grandezza si ottiene per **confronto immediato** con un **campione** o una **scala graduata**).



Calibri e strumenti meccanici di misura diretta

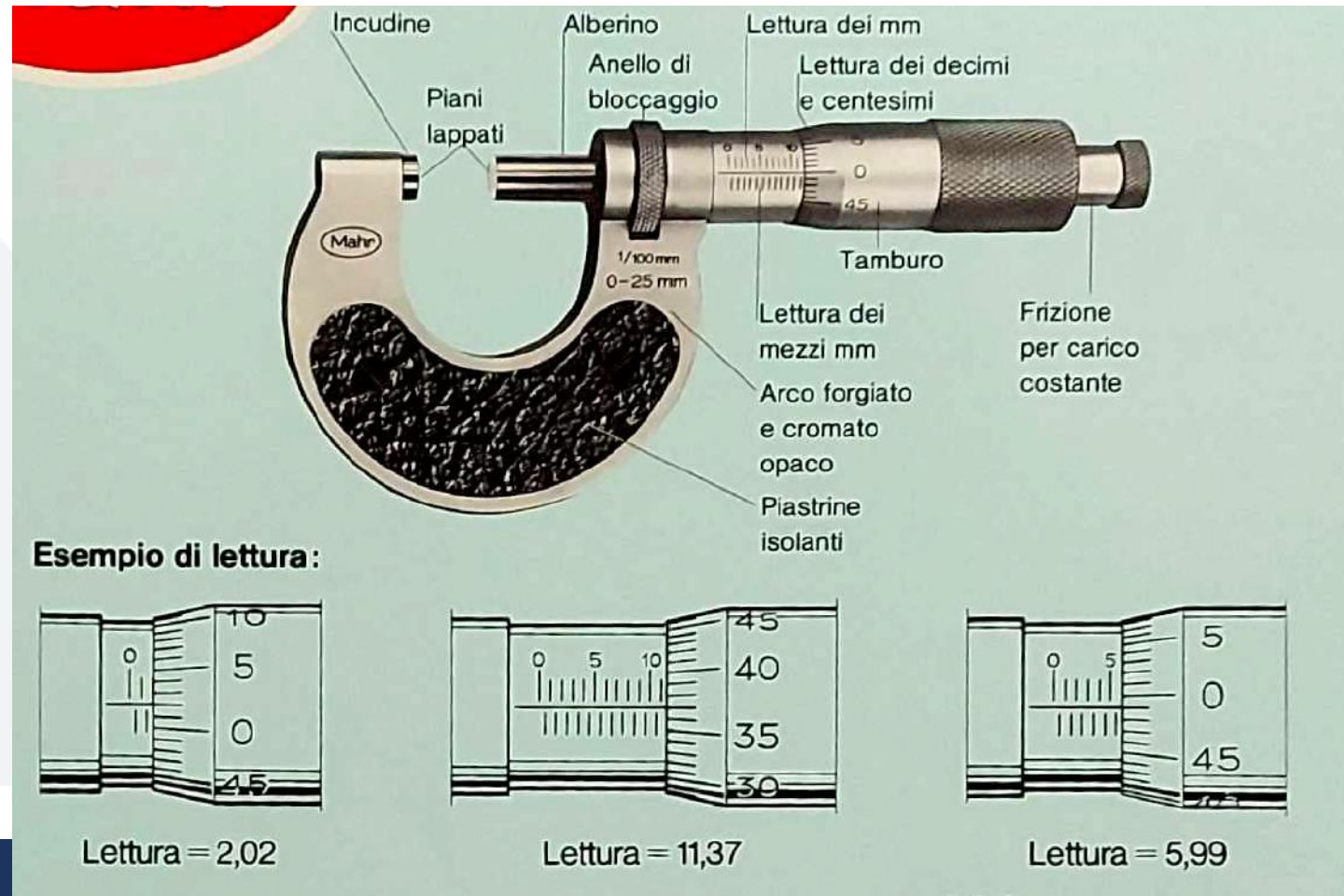
I **calibri** e i **micrometri** appartengono alla categoria delle **misure dirette** (il valore della grandezza si ottiene per **confronto immediato** con un **campione** o una **scala graduata**).



Calibri e strumenti meccanici di misura diretta

I **calibri** e i **micrometri** appartengono alla categoria delle **misure dirette** (il valore della grandezza si ottiene per **confronto immediato** con un **campione** o una **scala graduata**).

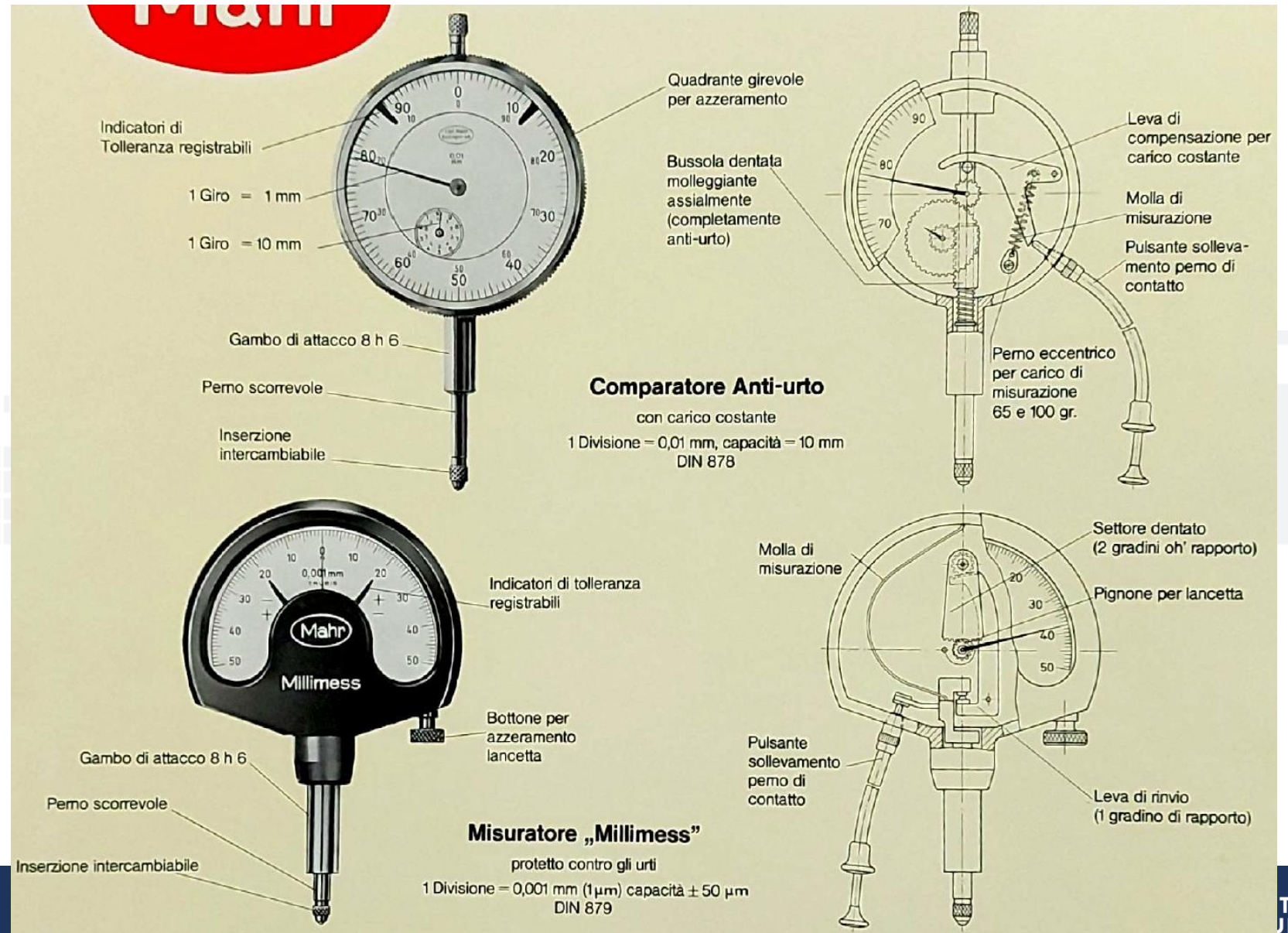
Micrometro



Calibri e strumenti meccanici di misura diretta

I **Comparatori** vengono impiegati con supporti, tavole di misurazione e su macchine. Servono principalmente per **misure di paragone**.

Es.: misurazione dello **scostamento** del pezzo dalla **misura nominale**.



Calibri e strumenti meccanici di misura diretta

I **Comparatori** vengono impiegati con supporti, tavole di misurazione e su macchine. Servono principalmente per **misure di paragone**.

Es.: misurazione dello **scostamento** del pezzo dalla **misura nominale**.



Fonti di errore e corretto utilizzo

- Errore umano: lettura errata del nonio o del tamburo.
- Errore di allineamento (angolo tra strumento e pezzo).
- Errore di forza di misura (pressione eccessiva o insufficiente).
- Errore termico (dilatazione del pezzo o dello strumento).
- Usura dei becchi o vite micrometrica.



Buone pratiche:

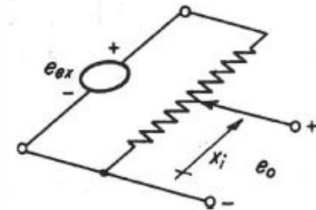
Pulizia accurata delle superfici di contatto.

Temperatura di riferimento 20 °C.

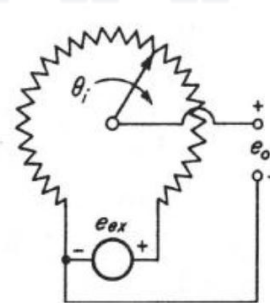
Controllo periodico con campioni certificati (blocchetti Johansson).

Trasduttori potenziometrici di spostamento

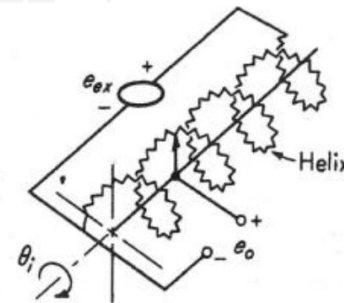
- I trasduttori potenziometrici di spostamento sono **sensori lineari, angolari o una loro combinazione** che convertono uno **spostamento meccanico** in una **variazione di tensione elettrica**.
- Sono tra i **trasduttori più semplici e diffusi** per il controllo di posizione in sistemi meccanici, robotici e industriali.



Translational

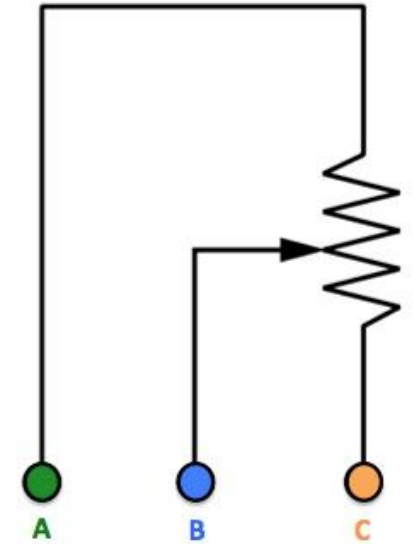


Single - turn



Multiturn

Rotational



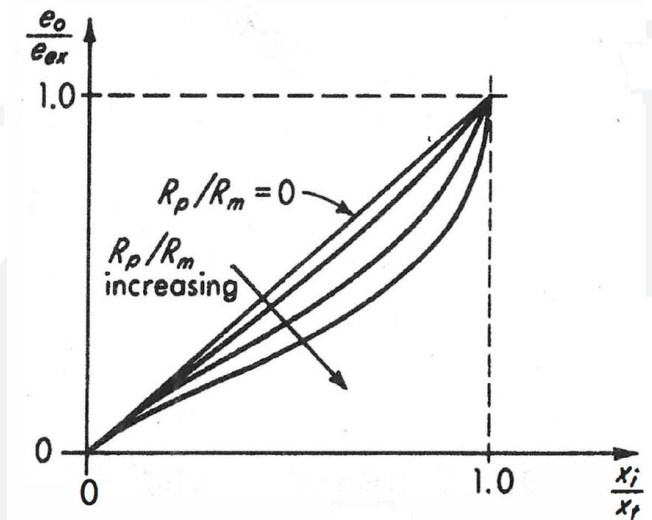
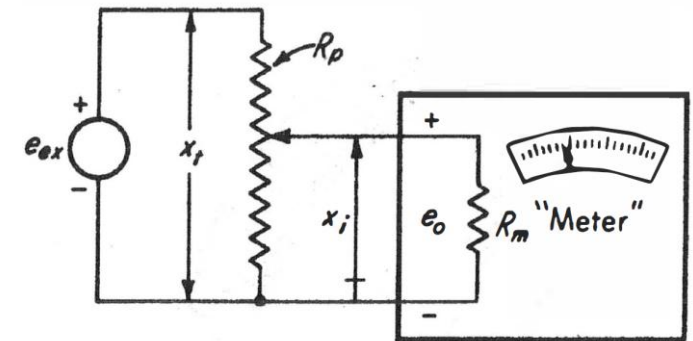
Trasduttori potenziometrici di spostamento

$$\frac{V_i}{V} = \frac{1}{\frac{x_t}{x_i} + \frac{R_p}{R_m} \left(1 - \frac{x_i}{x_t}\right)}$$

Idealmente: $R_m \rightarrow \infty$ e $\frac{V_i}{V} \rightarrow \frac{x_i}{x_t}$

In realtà bisogna considerare **l'effetto di carico dello strumento**:

per valori di R_m non sufficientemente elevati, si può difatti introdurre un **errore che riduce la linearità** del processo di misura.



Trasduttori potenziometrici di spostamento

Principali limiti:

- **Usura meccanica** del cursore → degrado nel tempo.
- Sensibilità a **vibrazioni, polvere e umidità**.
- Risposta **dinamica limitata** (non adatti per alte frequenze).
- Campo di temperatura ristretto (≈ -20 a $+80^{\circ}\text{C}$).

Vantaggi principali:

- Economici e semplici.
- Segnale analogico proporzionale.
- Facilmente calibrabili.



Trasduttori potenziometrici di spostamento

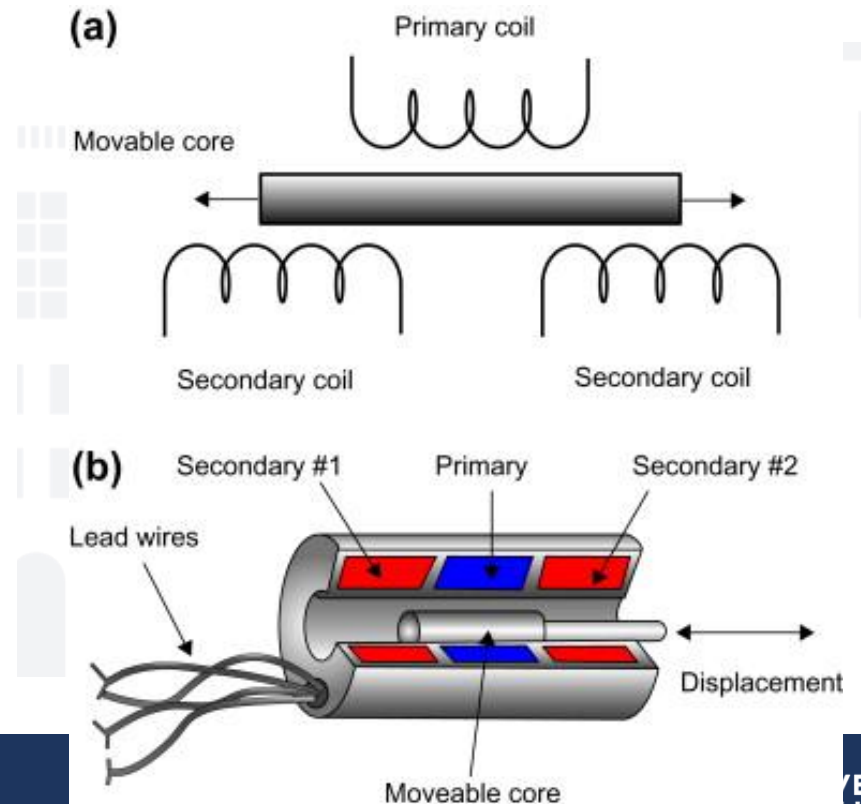
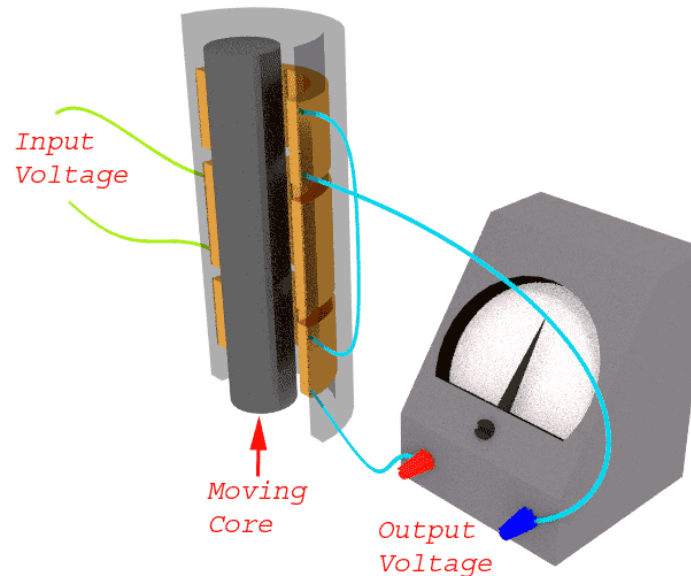
Esempi di applicazioni:

- **Robotica e automazione:** rilevamento posizione assi e giunti.
- **Automotive:** sensori pedale acceleratore o posizione valvola EGR.
- **Macchine industriali:** controllo fine di cilindri pneumatici o idraulici.
- **Sistemi di test meccanici:** misura di deformazioni o spostamenti piccoli.



Trasduttori induttivi: LVDT

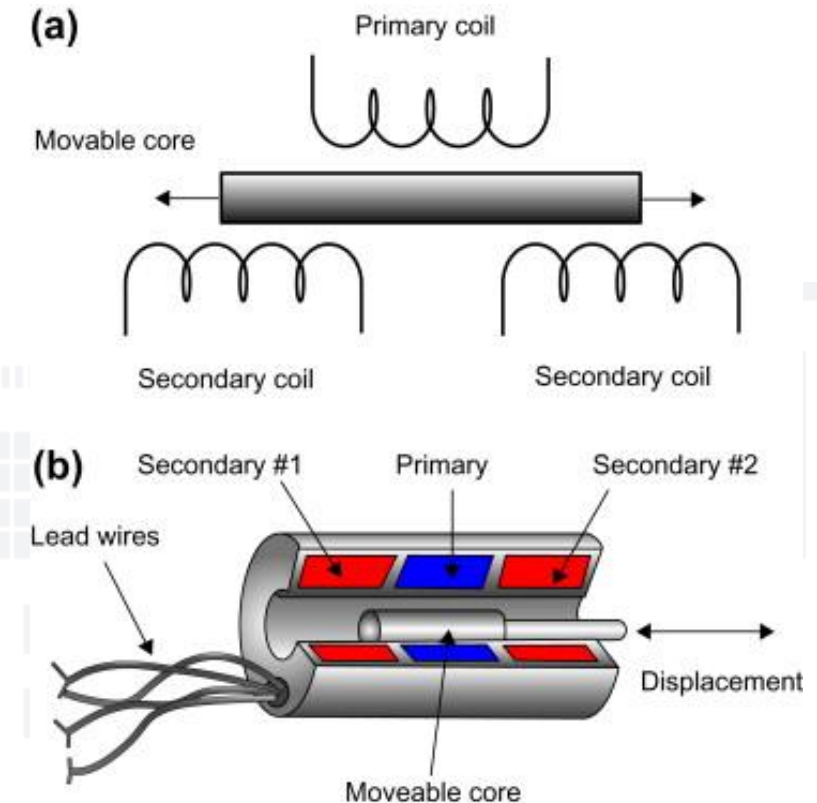
- Il LVDT (Linear Variable Differential Transformer) è un **trasduttore induttivo** che converte **spostamenti lineari in un segnale elettrico** proporzionale.
- È ampiamente utilizzato quando si richiede **alta precisione, assenza di contatto meccanico diretto e buona stabilità nel tempo.**



Trasduttori induttivi: LVDT

Composto da:

- Bobina primaria (eccitata con segnale AC sinusoidale).
- Due bobine secondarie simmetriche (S1, S2).
- Nucleo ferromagnetico mobile collegato all'oggetto da misurare.
- Quando il nucleo si muove, varia l'accoppiamento magnetico → cambia la tensione indotta nei secondari.

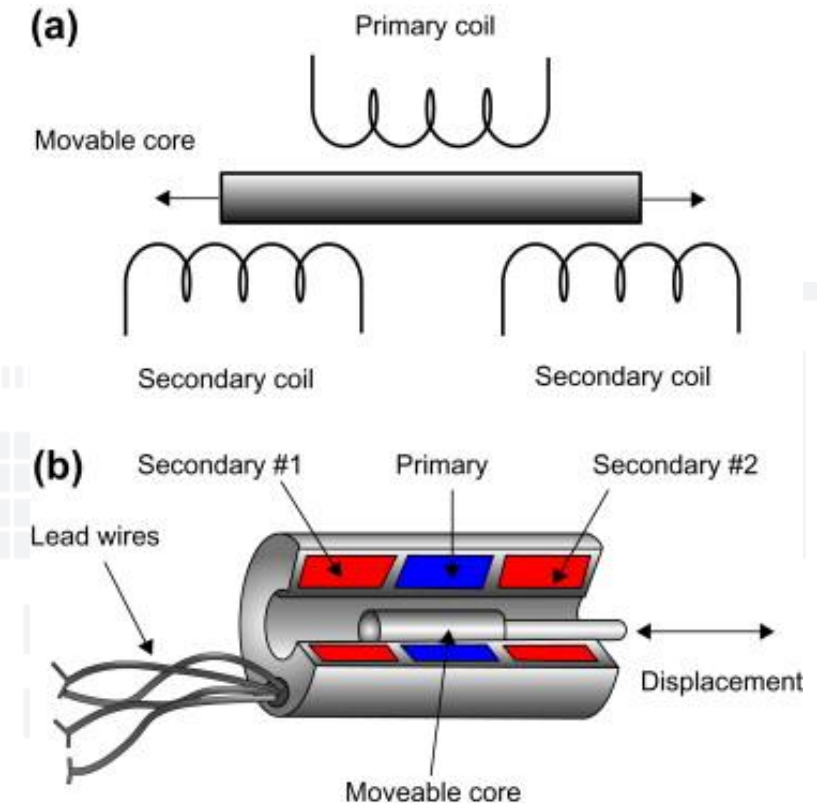


Trasduttori induttivi: LVDT

Principio di funzionamento:

- Il primario genera un campo magnetico alternato.
- Il nucleo modula il flusso magnetico che attraversa S1 e S2.
- Il segnale d'uscita è la differenza fra le tensioni indotte:

$$V_{out} = V_{S1} - V_{S2}$$



Trasduttori induttivi: LVDT

Principali campi d'impiego:

- Controllo di **posizione e spostamento lineare** (attuatore, pistone, valvola).
- **Banchi prova** e macchine di misura (microscopici spostamenti).
- **Aerospaziale e automotive**: sensori di corsa sospensioni, flap, comandi idraulici.
- **Monitoraggio strutturale**: misura di dilatazioni, vibrazioni o deformazioni.



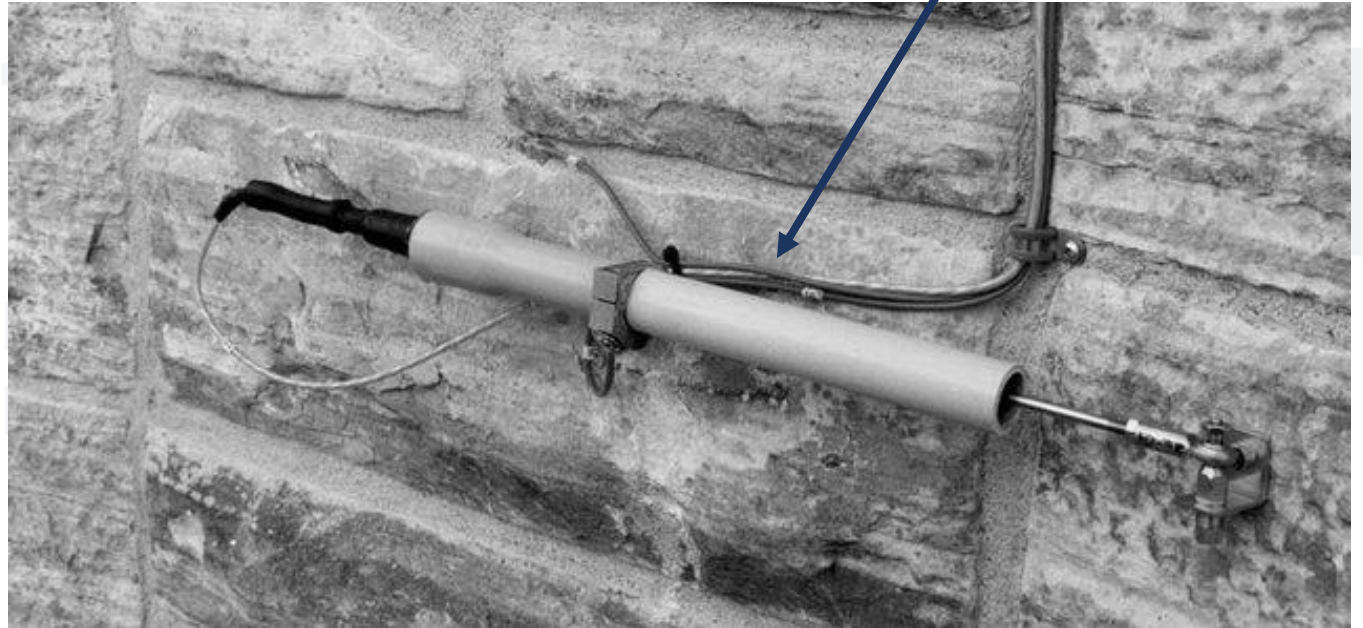
Trasduttori induttivi: LVDT (applicazione)

Monitoring the long-term performance of the Peace Tower in Ottawa

- L'obiettivo principale era valutare le prestazioni a lungo termine della torre e, in particolare, l'impatto dei lavori di conservazione sul comportamento delle pareti esterne in muratura composita di calcestruzzo in condizioni ambientali variabili.



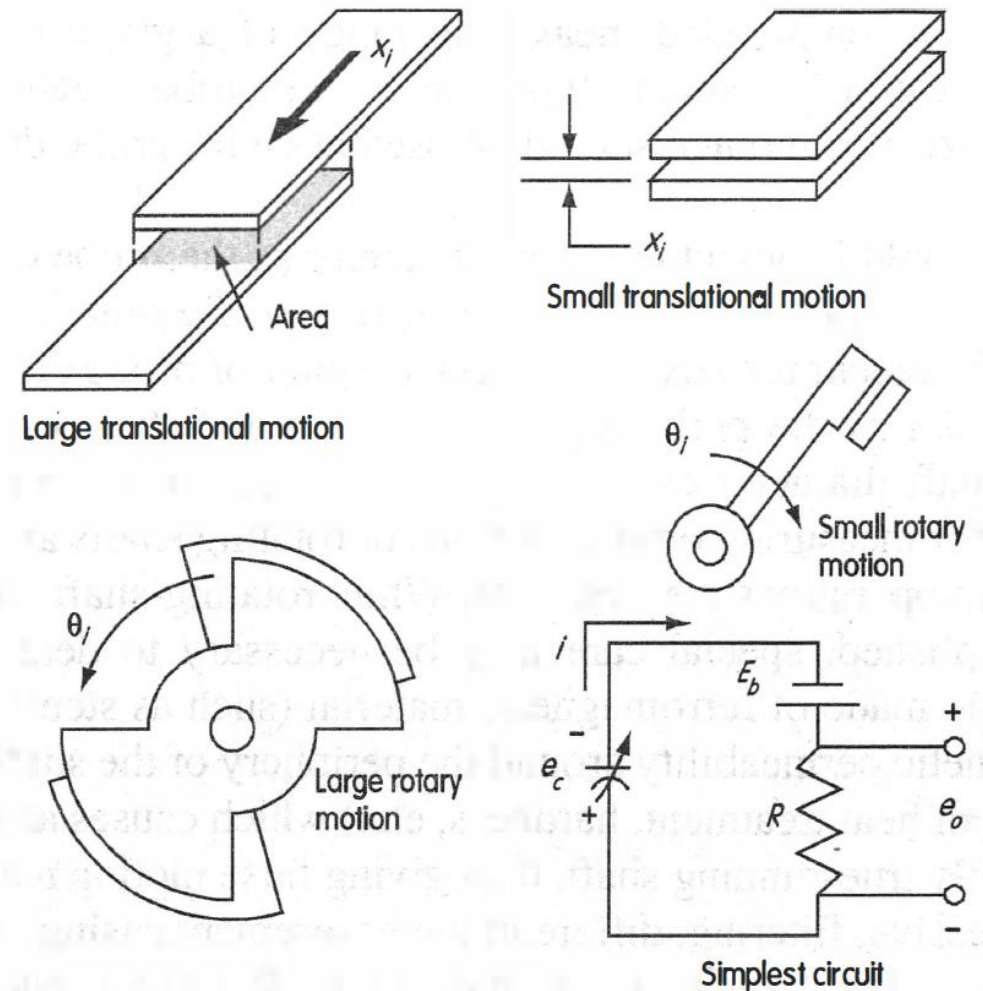
LVDT



Trasduttori senza contatto

Trasduttori capacitivi

- Un movimento di **traslazione o rotazione** può essere utilizzato in molti modi per **modificare la capacità** di un **condensatore variabile**.
- I sensori capacitivi sono impiegati per la **misura di spostamenti molto piccoli, spessori, livelli e posizioni con elevata risoluzione**.
- Basano il loro funzionamento sulla **variazione della capacità elettrica di un condensatore dovuta a cambiamenti nella distanza, superficie o costante dielettrica del mezzo**.



Trasduttori capacitivi

- Si può modellare lo spostamento in termini di variazione di capacità

$$C = \varepsilon \frac{A}{x}$$

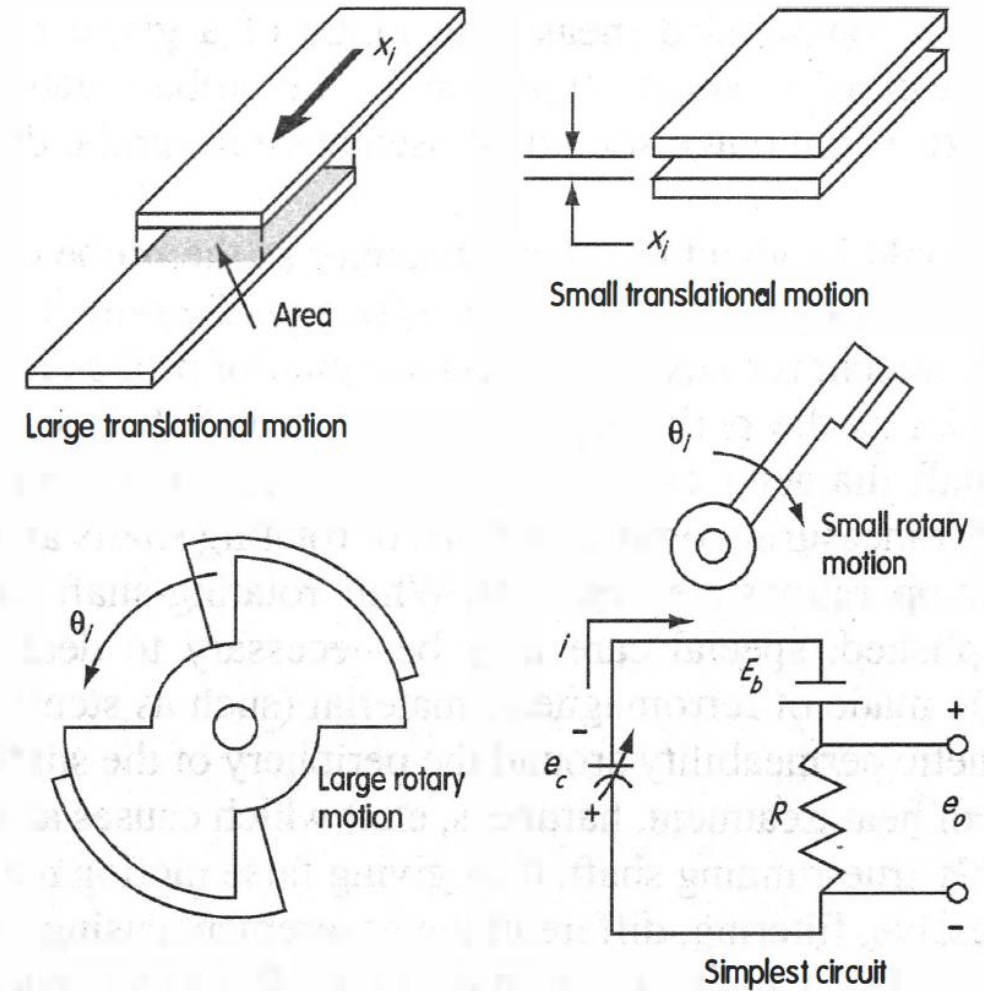
Dove

ε = costante dielettrica del mezzo.

C = capacità [F]

A = area delle piastre

x = spostamento



Trasduttori capacitivi

- La variazione di capacità viene solitamente trasdotta in una variazione di corrente o tensione:

$$I = j2\pi fVC \qquad V = \frac{I}{j\omega C}$$

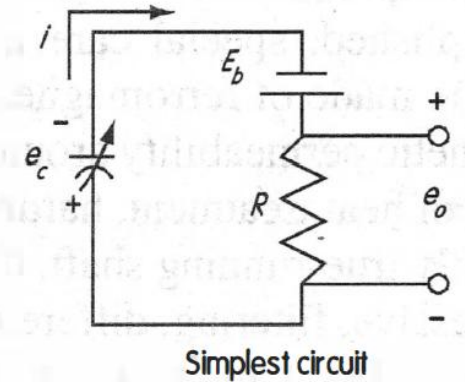
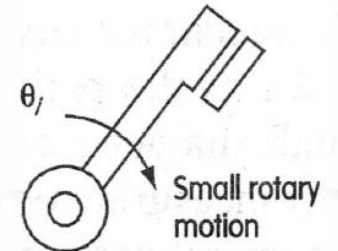
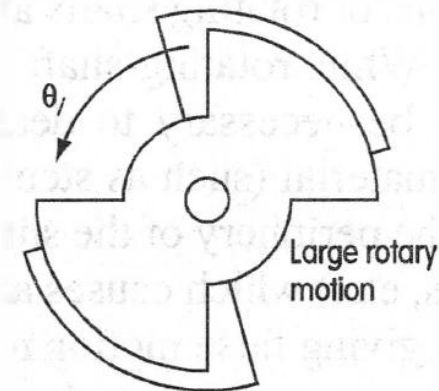
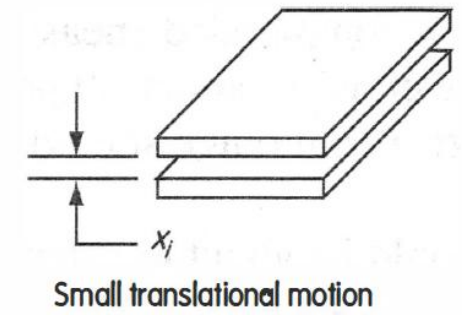
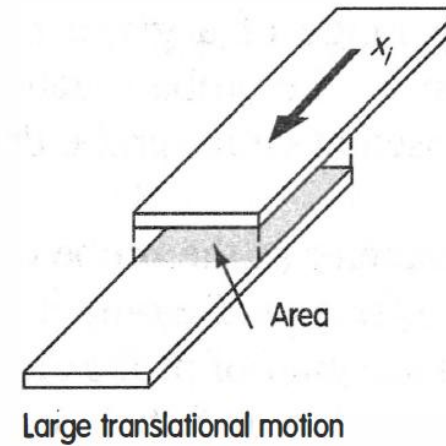
Dove

I = è la corrente che attraversa il condensatore.

$2\pi f$ = è la frequenza angolare ω della sorgente CA.

V = è la tensione attraverso il condensatore.

C = è la capacità del condensatore.



Trasduttori capacitivi

- Vantaggi e limiti:

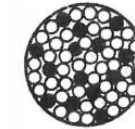
Aspetto	Vantaggi	Limiti
Precisione	Alta (μm o nm)	Sensibilità elevata → richiede stabilità
Sensibilità	Ottima per piccole variazioni	Fortemente influenzata da umidità e temperatura
Contatto	Nessun contatto meccanico	Campo di misura ridotto
Risposta dinamica	Molto rapida	Necessita di schermatura elettrica
Costo e manutenzione	Medio	Taratura complessa in ambiente industriale

Trasduttori elettro-ottici

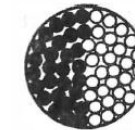
I sensori ottici a fibra sono impiegati per misurare **spostamenti compresi tra pochi micrometri e alcuni millimetri**, mediante un sistema ottico-elettronico semplice ma ad alta sensibilità.

La sonda, di diametro compreso tra 0,5 e 7 mm e lunga circa 75 mm, è costituita da un **fascio di diverse centinaia di fibre ottiche**, ciascuna con diametro dell'ordine di pochi centesimi di millimetro.

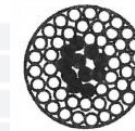
○ Transmitting fiber
● Receiving fiber



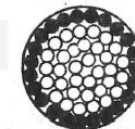
Random



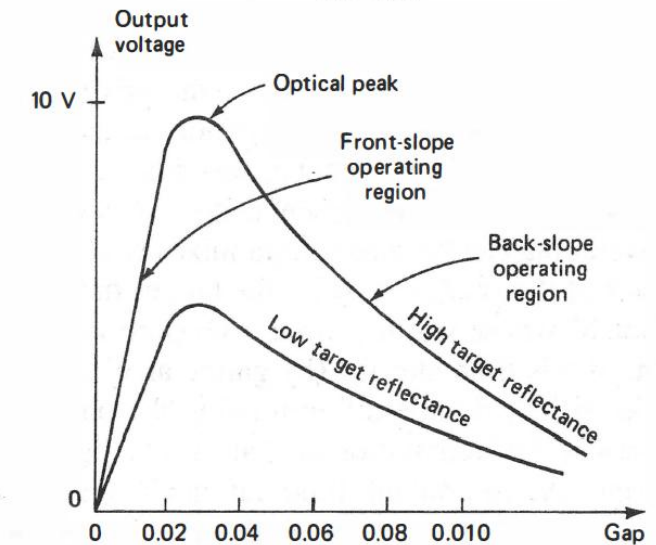
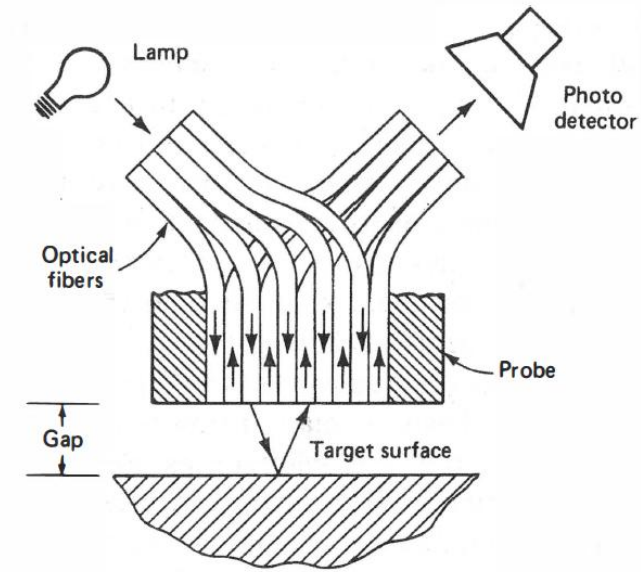
Hemispherical



Concentric transmit outside



Concentric transmit inside

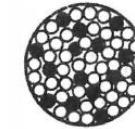


Trasduttori elettro-ottici

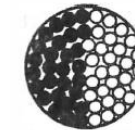
Il fascio si estende fino all'unità elettronica (a circa 0,3–1 m di distanza), dove viene diviso in due gruppi uguali di fibre:

- **Fibre trasmittenti:** illuminate da una sorgente luminosa, portano la luce fino alla punta della sonda.
- **Fibre riceventi:** raccolgono la luce riflessa dal bersaglio e la inviano verso un fotorilevatore, che genera un **segnale proporzionale alla distanza** tra la sonda e la superficie del target.

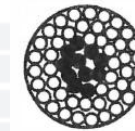
○ Transmitting fiber
● Receiving fiber



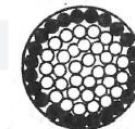
Random



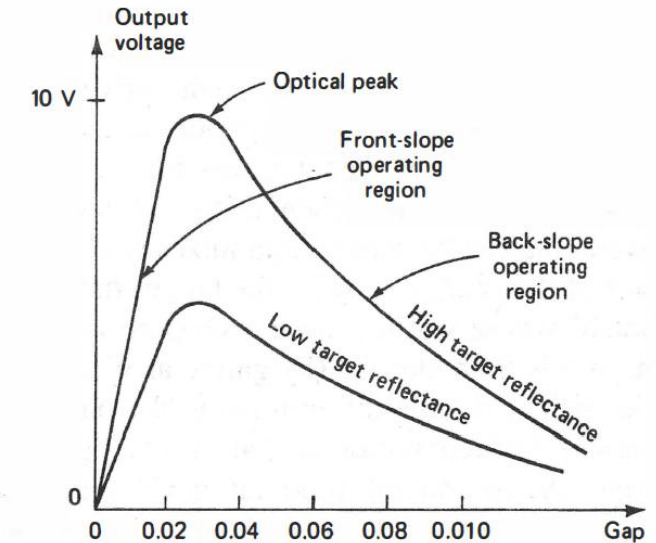
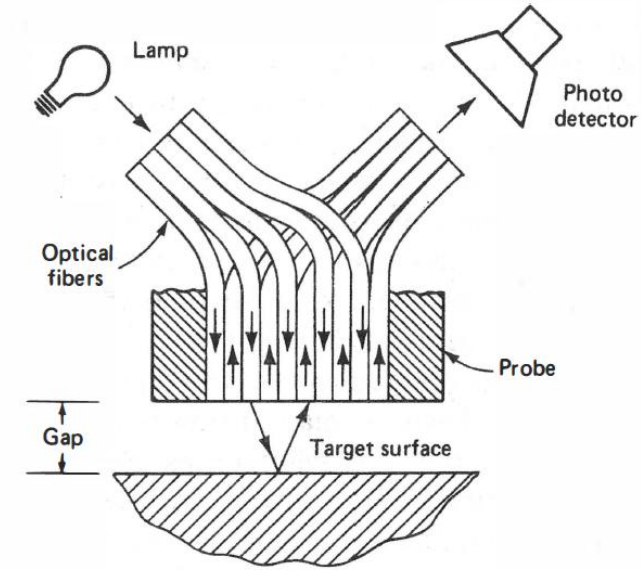
Hemispherical



Concentric transmit outside



Concentric transmit inside



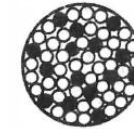
Trasduttori elettro-ottici

La luce emessa è **riflessa anche da superfici opache o poco riflettenti**, rendendo il sistema adatto a una vasta gamma di materiali.

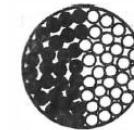
La **sensibilità della misura** dipende però dalle proprietà ottiche del materiale sul quale incide la radiazione, nonché dalla **disposizione delle fibre all'interno della sezione**.

Ad oggi la **distribuzione casuale** è quella che meglio permette di ricalcare il profilo ideale (nel quale una fibra ricevente è circondata da quattro trasmettenti).

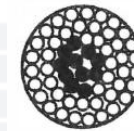
○ Transmitting fiber
● Receiving fiber



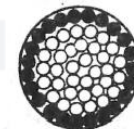
Random



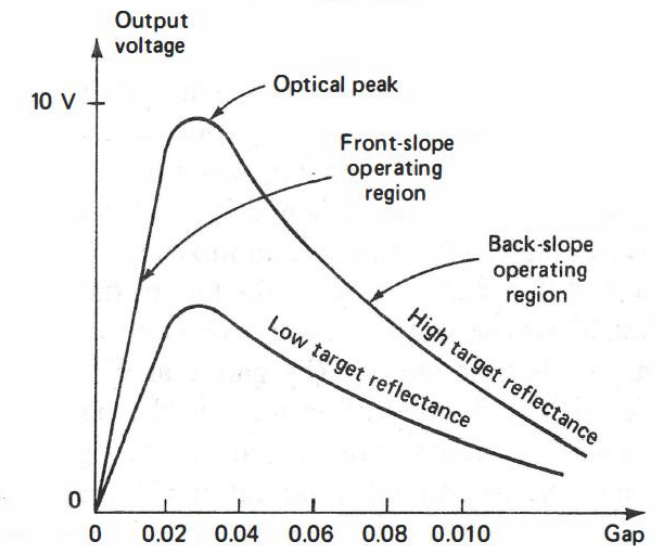
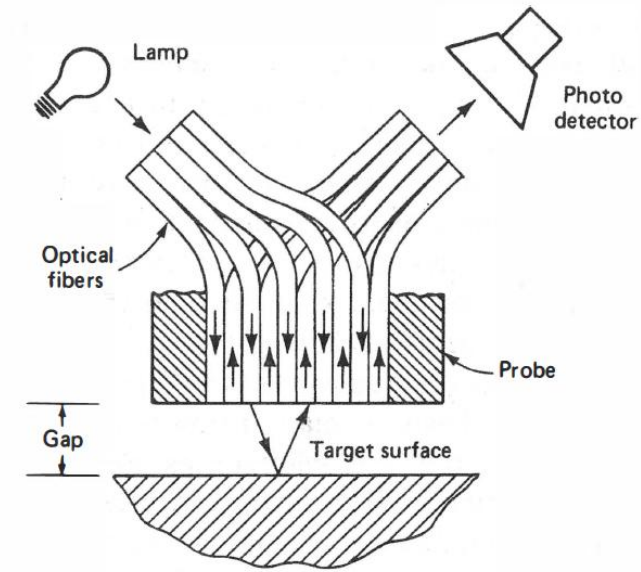
Hemispherical



Concentric transmit outside



Concentric transmit inside

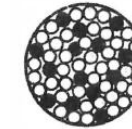


Trasduttori elettro-ottici

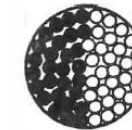
Front slope (pendenza anteriore):

- A zero distanza, la **luce non riesce a uscire** dalle fibre → segnale nullo.
- Quando il gap aumenta, **più superficie del bersaglio è illuminata** → la luce riflessa cresce in **modo quasi lineare**.
- Questa è la zona più sensibile e lineare del sensore.

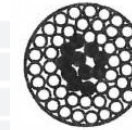
○ Transmitting fiber
● Receiving fiber



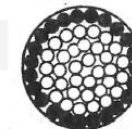
Random



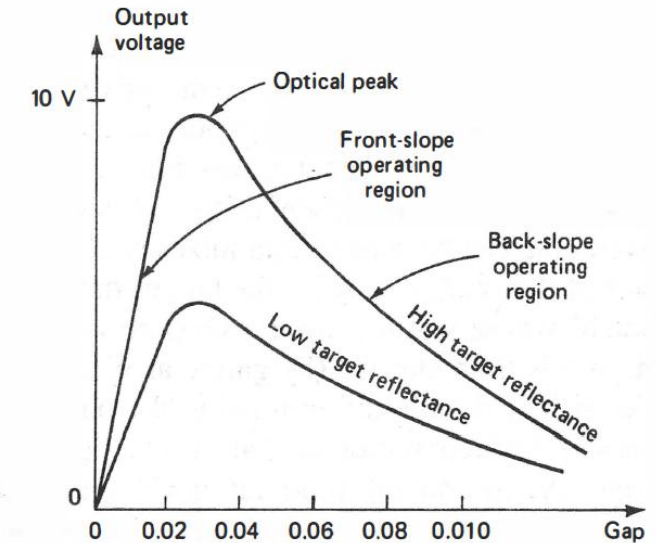
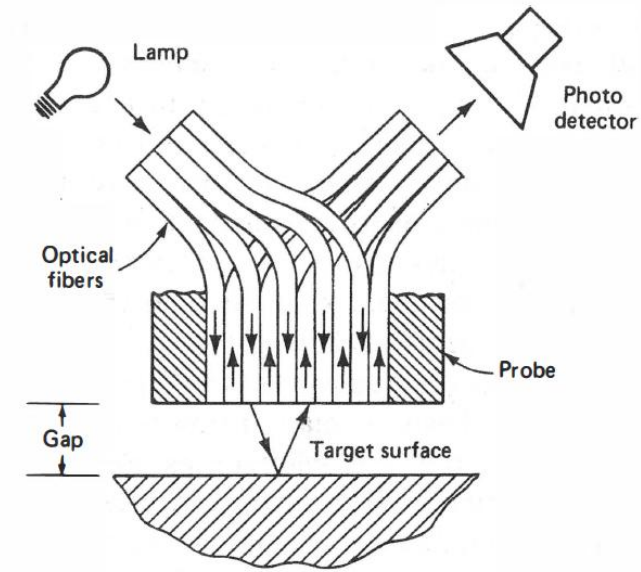
Hemispherical



Concentric transmit outside



Concentric transmit inside

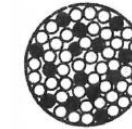


Trasduttori elettro-ottici

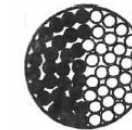
Back slope (pendenza posteriore):

- Superato un **punto di massima intensità riflessa**, la **risposta decresce**: il fascio si allarga e una frazione minore della luce ritorna verso le fibre riceventi.
- L'intensità diminuisce approssimativamente **secondo una legge inversa quadratica** rispetto alla distanza.
- Zona meno lineare ma ancora utilizzabile per misure di posizione relative.

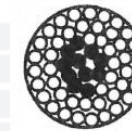
○ Transmitting fiber
● Receiving fiber



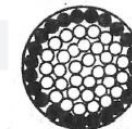
Random



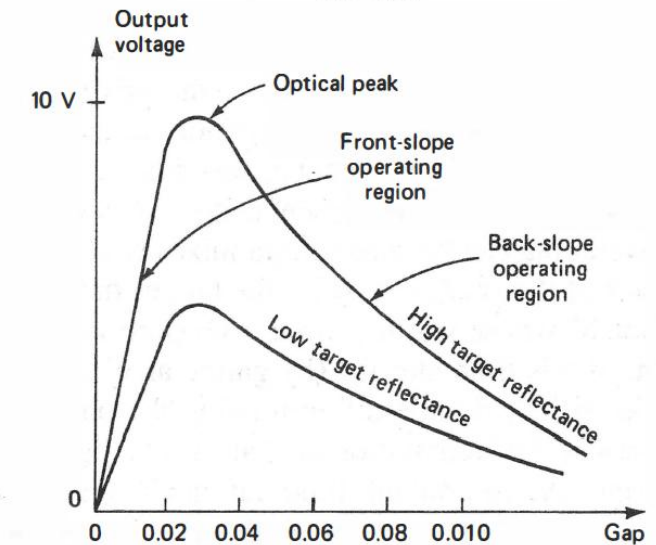
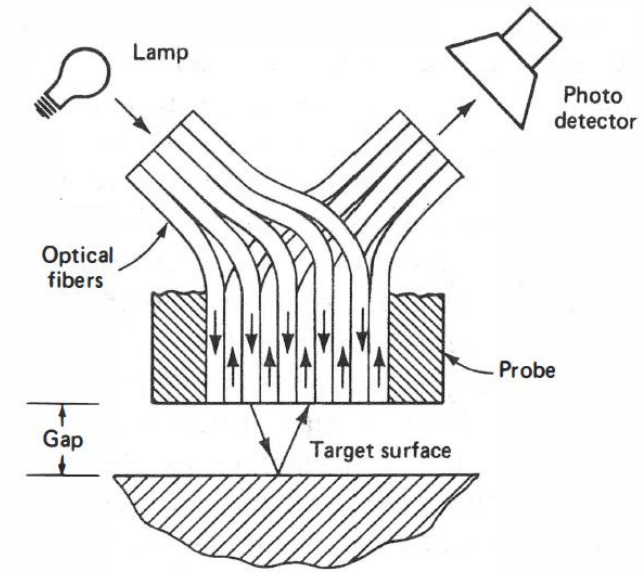
Hemispherical



Concentric transmit outside



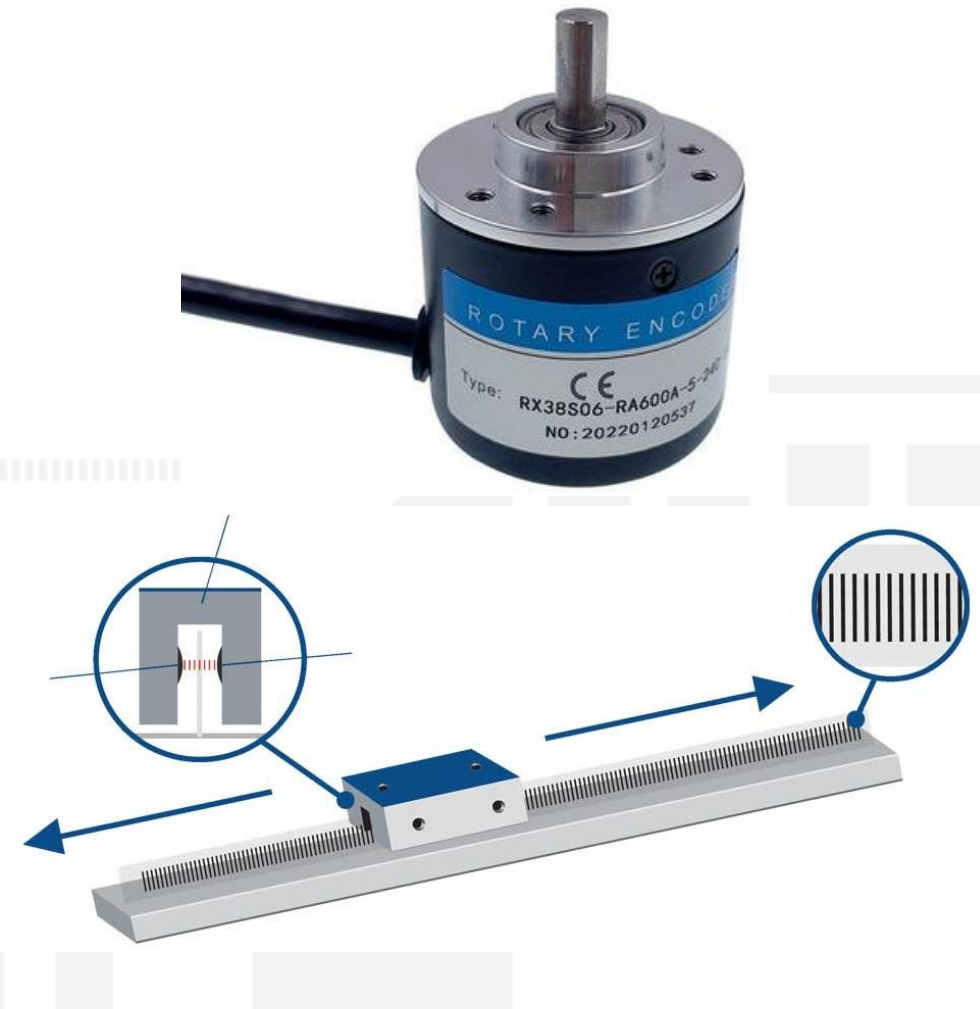
Concentric transmit inside



Encoders incrementali e assoluti

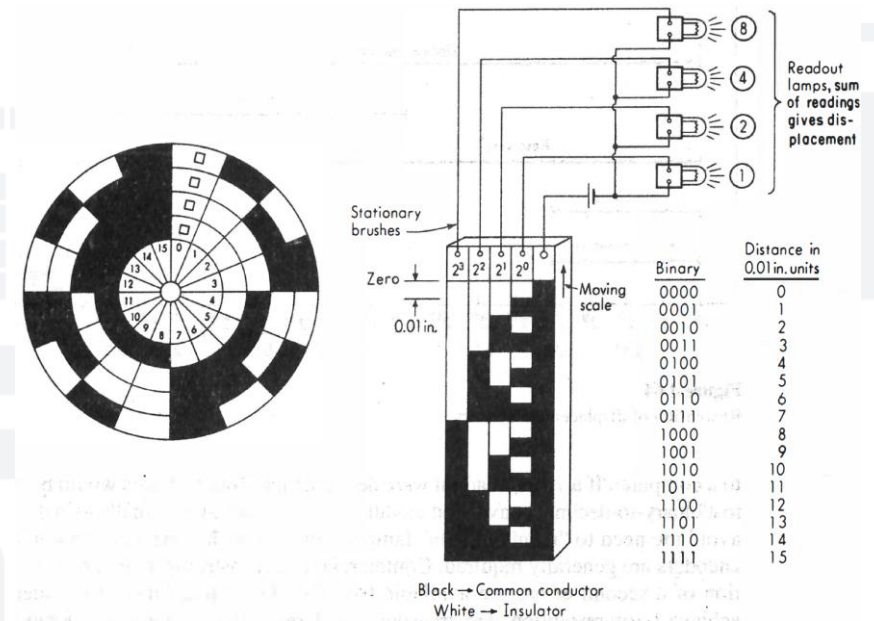
Encoder: trasduttori digitali di posizione e velocità

- Poiché molti sistemi di misura devono comunicare con computer o controllori digitali, **sarebbe conveniente** disporre di **trasduttori con uscita digitale**.
- In realtà, la maggior parte dei trasduttori **fornisce un segnale analogico**, che deve poi essere convertito in digitale tramite un convertitore A/D (analogico-digitale).



Encoder: trasduttori digitali di posizione e velocità

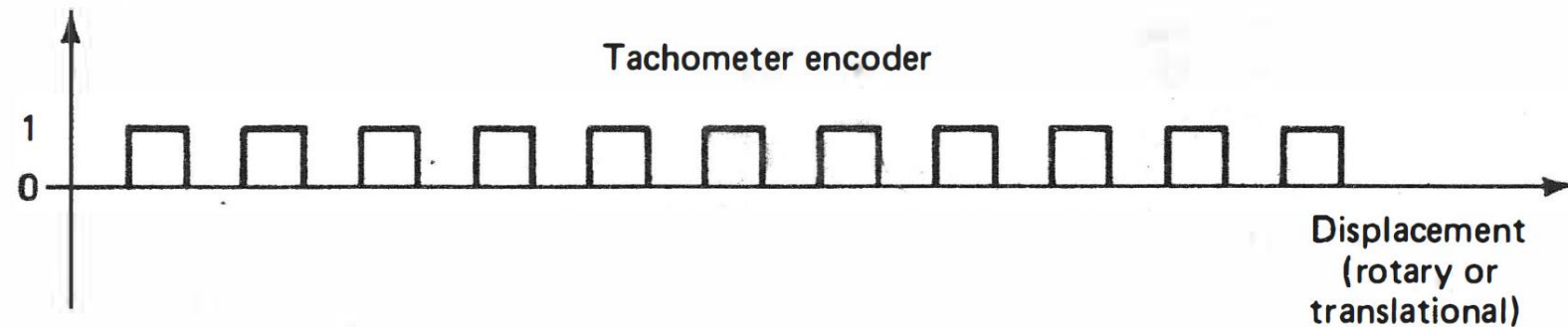
- Gli encoder rappresentano una classe di **trasduttori digitali** in grado di misurare **spostamenti lineari o rotativi**.
- Essi generano **direttamente un segnale digitale** proporzionale alla posizione o alla velocità angolare dell'albero meccanico cui sono collegati.
- Esistono **tre principali tipologie** di encoder, distinte per principio di misura e uscita del segnale:
 - **Tachometrici**
 - **Incrementali** («conta passi»)
 - **Assoluti** («conosce sempre la posizione»)



Encoder: trasduttori digitali di posizione e velocità

Encoder tachometrico

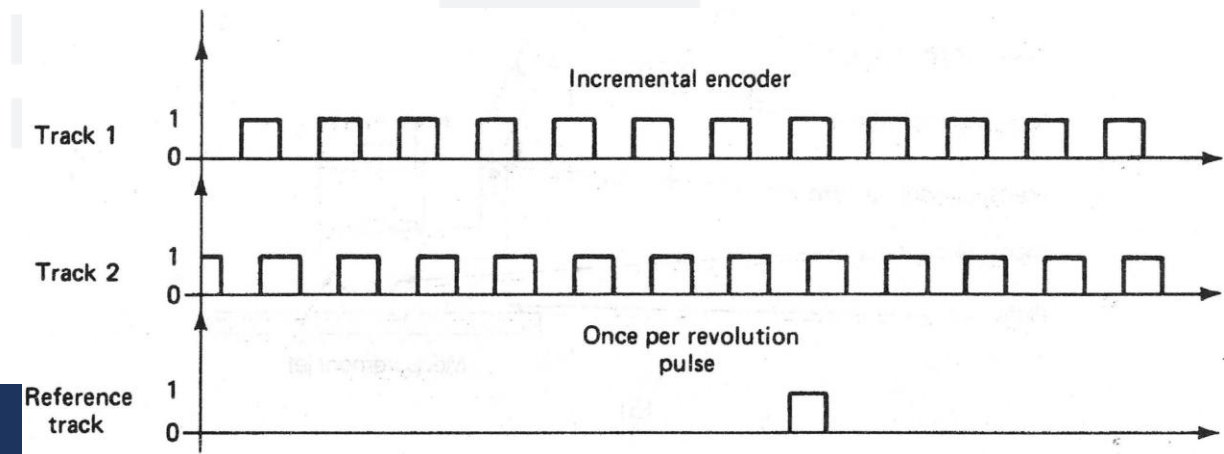
- Produce un solo segnale impulsivo: un impulso per ogni incremento di spostamento.
- Se il **moto avviene sempre nella stessa direzione**, il conteggio degli impulsi consente di determinare lo **spostamento relativo**.
- Tuttavia, un **moto inverso genera impulsi identici**, rendendo impossibile distinguere la direzione → rischio di errore cumulativo.
- Per questo motivo, è usato principalmente per **misure di velocità in rotazioni a verso costante**.



Encoder: trasduttori digitali di posizione e velocità

Encoder incrementale

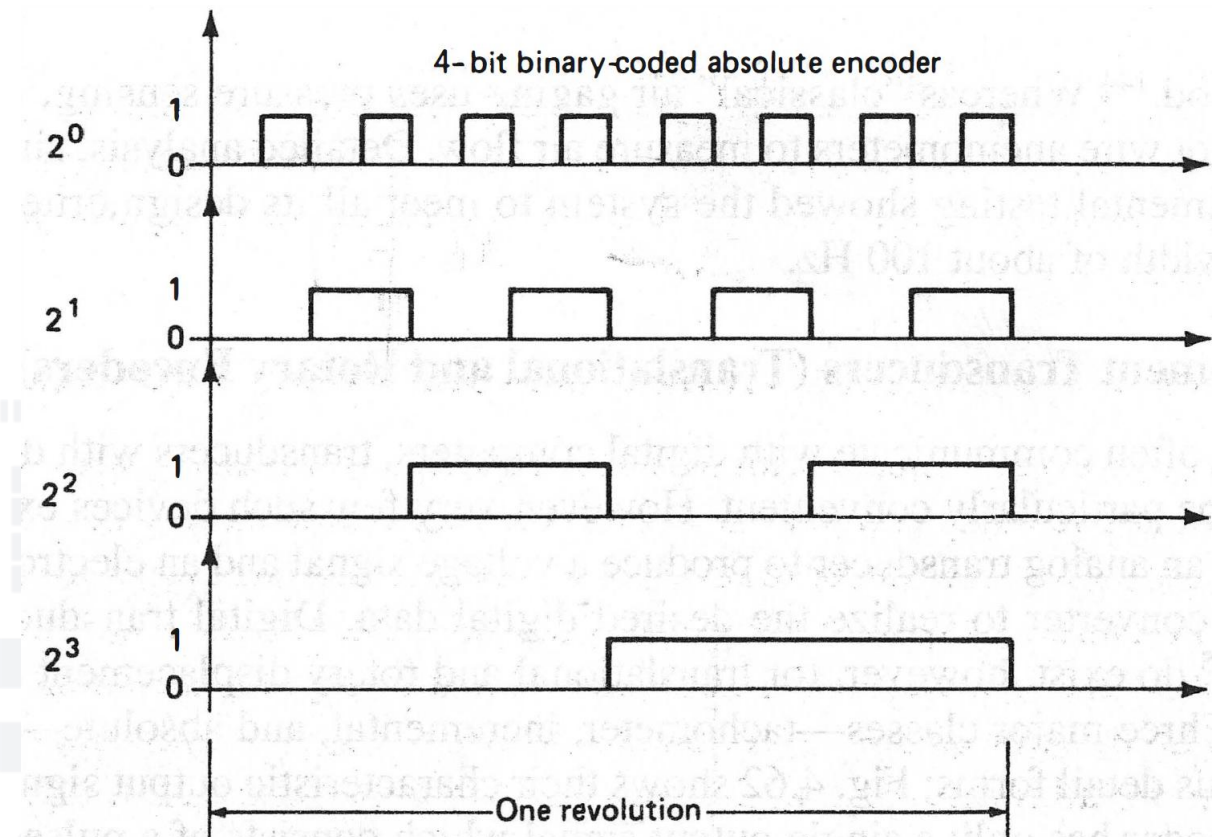
- Impiega due (o tre) segnali elettrici generati da piste **sfalsate di $\frac{1}{4}$ di ciclo**.
- Questo sfasamento **consente di rilevare la direzione del moto**: il sistema riconosce quale segnale “sale per primo”.
- Un **contatore bidirezionale** può così **sommare o sottrarre** impulsi a seconda del verso di rotazione.
- Spesso è presente un **terzo impulso** per ogni **giro completo** (zero di riferimento).
- **Vantaggio**: può ruotare indefinitamente.
- **Svantaggi**: suscettibile a disturbi elettrici (che generano impulsi falsi) e perdita completa di posizione in caso di mancanza di alimentazione.



Encoder: trasduttori digitali di posizione e velocità

Encoder assoluto

- Dispone di **più piste codificate**, ciascuna letta in parallelo per fornire un **codice binario della posizione angolare**.
- Esiste quindi una **corrispondenza univoca** tra posizione e uscita digitale.
- **Se l'alimentazione viene interrotta**, i dati di posizione vengono recuperati al riavvio.
- I disturbi elettrici producono solo **errori transitori**, non cumulativi.



Encoder: trasduttori digitali di posizione e velocità

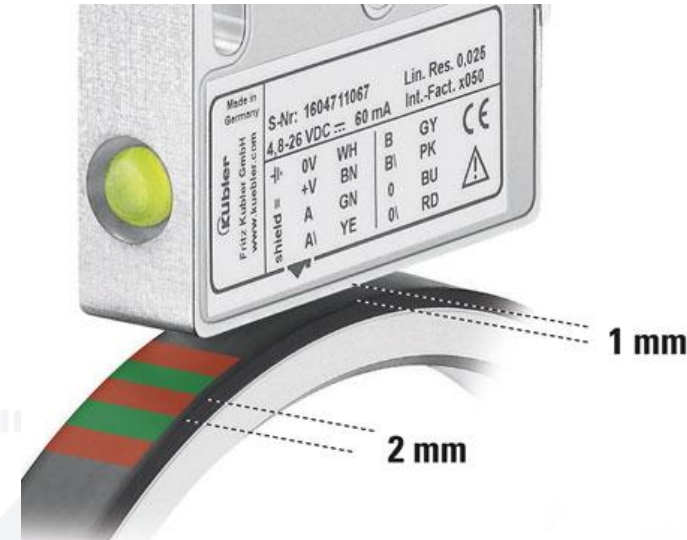
Gli encoder possono essere realizzati secondo due principi costruttivi:

Encoder a contatto:

- Utilizzano **spazzole fisse** che sfregano su un **disco codificato** rotante.
- **Soluzione economica** ma soggetta a **usura meccanica** e rumore elettrico.
- Adatti a **basse velocità** o applicazioni non critiche.

Encoder senza contatto:

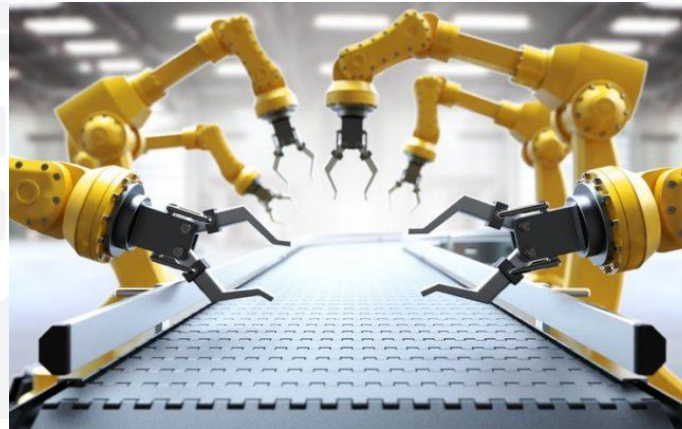
- Basati su principi ottici o magnetici.
- **Encoder ottici:** impiegano un disco trasparente o riflettente con tacche alternate, illuminato da una sorgente LED; la luce modulata è rilevata da fotodiodi.
- **Encoder magnetici:** usano sensori di tipo Hall o magnetoresistivo per rilevare variazioni del campo magnetico di un disco o anello magnetizzato.



Encoder: trasduttori digitali di posizione e velocità

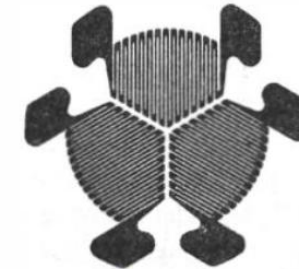
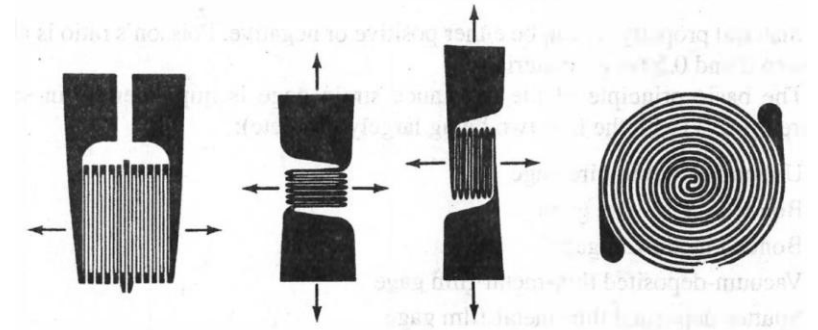
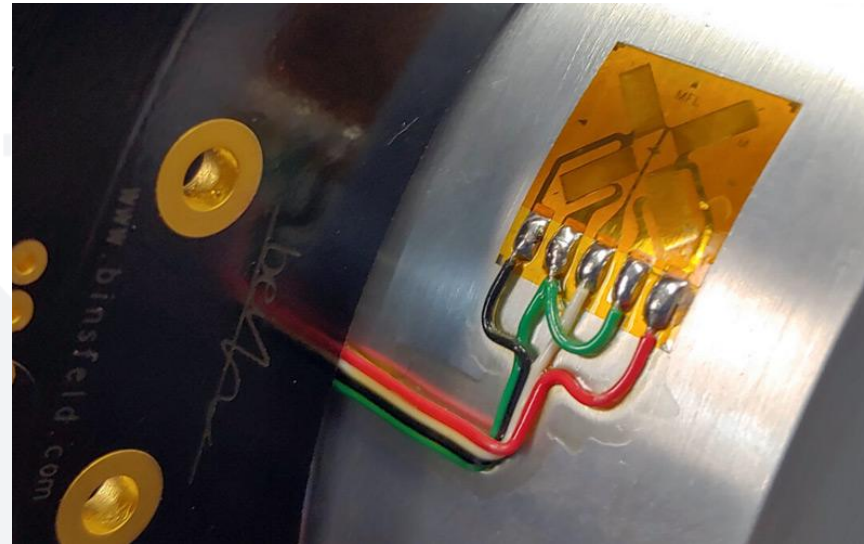
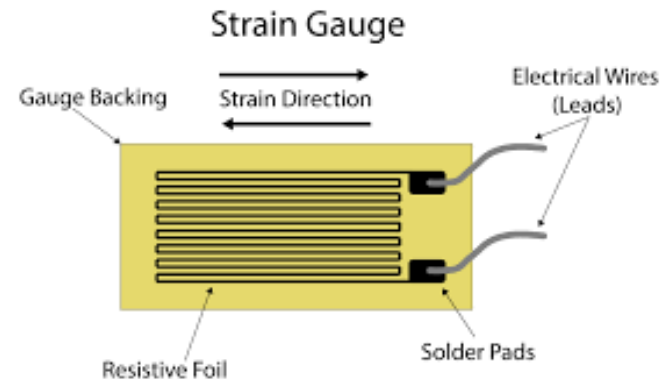
Applicazioni tipiche

- Controllo di posizione e velocità in **motori elettrici** e **azionamenti industriali**.
- **Robotica**: misura precisa dell'orientamento degli assi.
- **Macchine CNC**: feedback di posizione per sistemi servoassistiti.
- **Automazione e trasporti**: controllo di nastri trasportatori, ruote o sistemi lineari.
- **Strumentazione scientifica**: misura di spostamenti rotativi ad alta risoluzione.

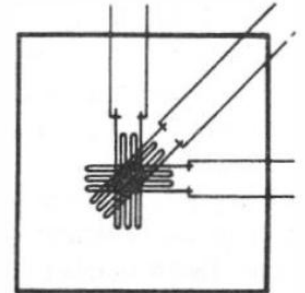


Estensimetri

Gli **estensimetri** (strain gauges) sono sensori che misurano la **deformazione meccanica** di un corpo sollecitato.



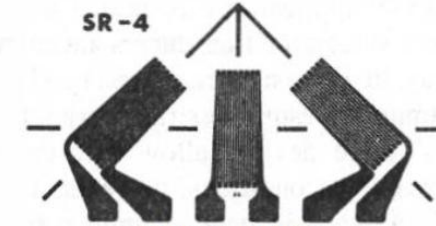
FABR-50D-12SX
3-Element Rosette
60° Planar
(foil)



AR-1
3-Element Rosette
45° Stacked
(wire)



FABX-50-12SX
2-Element Rosette
90° Stacked
(foil)



SR-4
FAER-25RB-12SX
3-Element Rosette
45° Planar
(foil)

Funzionamento

Basano il loro funzionamento sulla seconda legge di Ohm:

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

$R \rightarrow$ resistenza elettrica [Ω]

$\rho \rightarrow$ resistività del materiale [$\Omega \cdot m$]

$L \rightarrow$ lunghezza del conduttore [m]

$A \rightarrow$ area della sezione [m^2]

La variazione relativa di resistenza è proporzionale alla deformazione unitaria:

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L}$$

$K \rightarrow$ fattore di taratura (Gauge Factor)

$\frac{\Delta L}{L} = \varepsilon \rightarrow$ è la deformazione

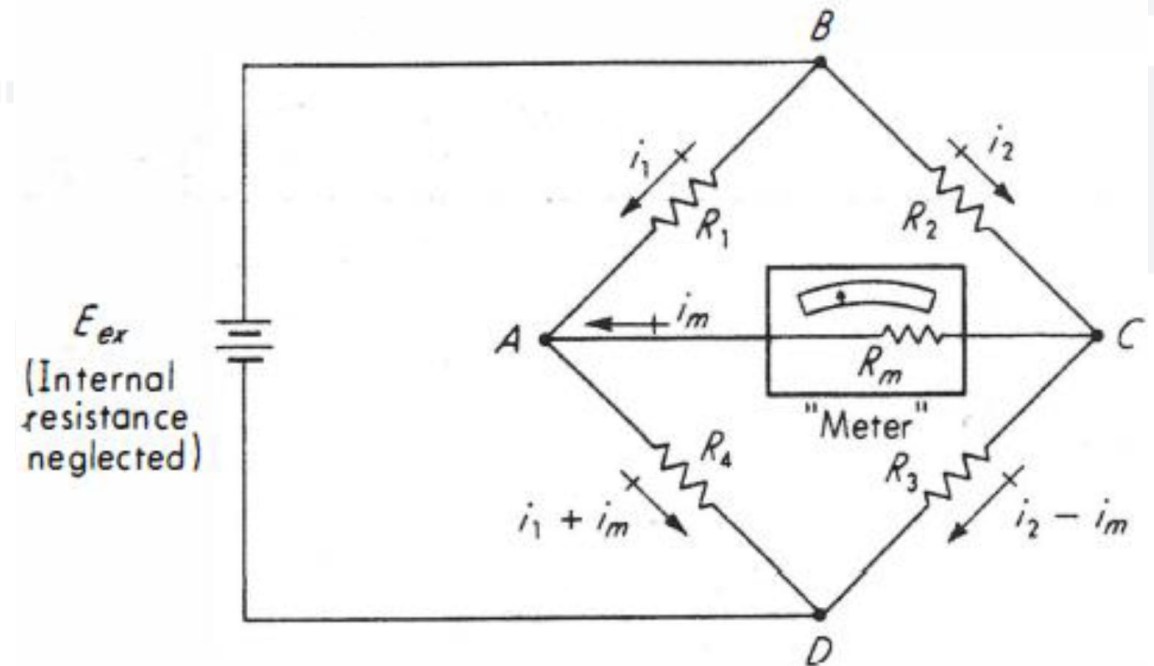
Esempio:

Per un materiale con $K = 10$, per ogni 1% in deformazione, la resistenza elettrica aumenterebbe in 10%.

$$10 = \frac{10\%}{1\%}$$

Ponte di Wheatstone per la misura della deformazione

- Per **rilevare la variazione di resistenza**, gli estensimetri sono solitamente inseriti all'interno del **ponte di Wheatstone**.
- In condizioni di **equilibrio** ($R_1/R_4 = R_2/R_3$) si ha che $V_{AC} = 0$. Al variare di uno dei valori delle resistenze in gioco **le correnti che attraversano i rami BAD e BCD** del ponte non sono più tra loro uguali e la tensione V_{AC} non è più nulla.

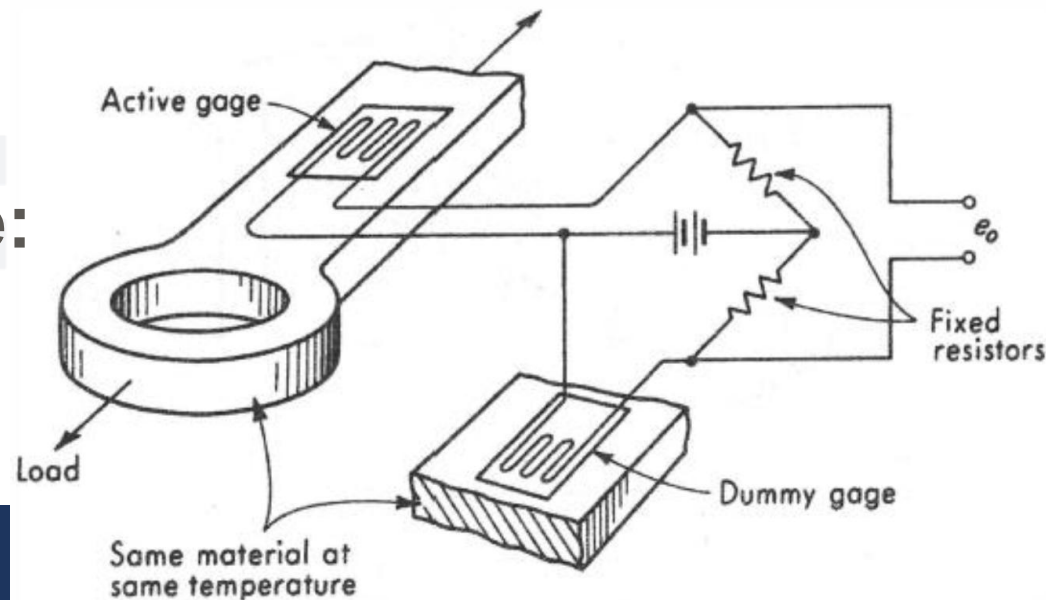


Ponte di Wheatstone per la misura della deformazione

Il ponte può essere configurato in vari modi:

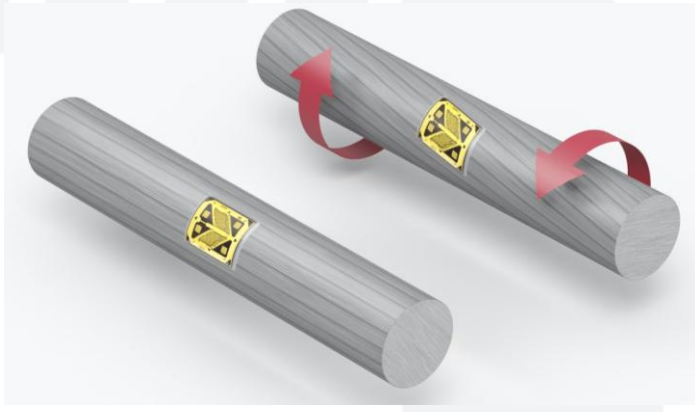
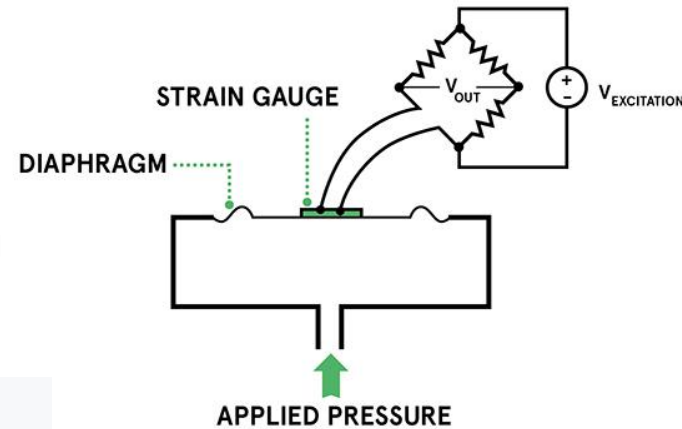
- **$\frac{1}{4}$ di ponte:** un solo estensimetro attivo (le altre resistenze sono fisse) → Soluzione semplice, ma più sensibile a variazioni termiche.
- **$\frac{1}{2}$ ponte:** due estensimetri, di cui uno in trazione e uno in compressione → Migliore compensazione termica e maggiore sensibilità.
- **Ponte intero (full bridge):** quattro estensimetri attivi → Massima sensibilità e perfetta compensazione termica.

$\frac{1}{2}$ ponte:

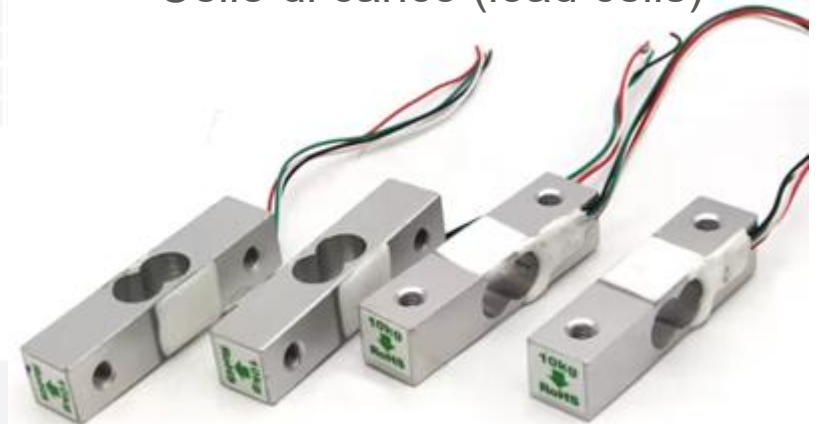


Applicazioni

Gli estensimetri sono alla base di molti trasduttori meccanici, in cui la grandezza misurata (forza, peso, pressione) viene convertita in deformazione elastica di un elemento metallico.



Celle di carico (load cells)



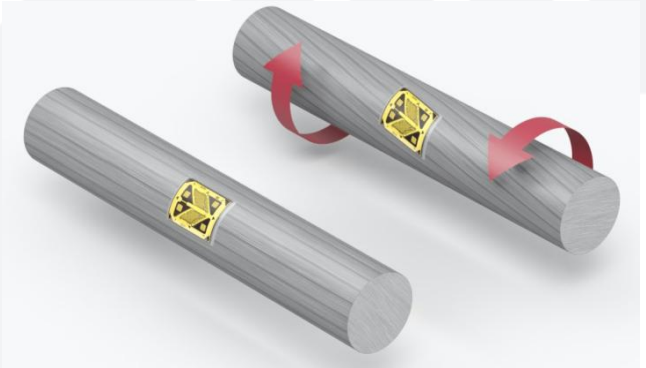
Torsiometri estensimetrici

I torsiometri sono strumenti destinati alla **misura della coppia torcente** trasmessa da un albero rotante. La misura della coppia è fondamentale per determinare la **potenza meccanica sviluppata** da motori, turbine e macchine rotanti.

$$P = T \cdot \omega$$

Nei torsiometri estensimetrici, la coppia T è ricavata dalla deformazione angolare dell'albero, proporzionale alle tensioni di taglio τ indotte dalla torsione.

$$\tau = \frac{T \cdot r}{J}$$



Torsiometri estensimetrici

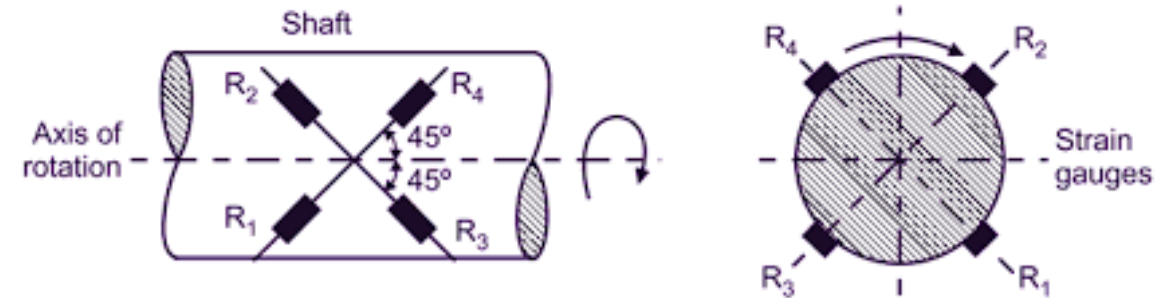
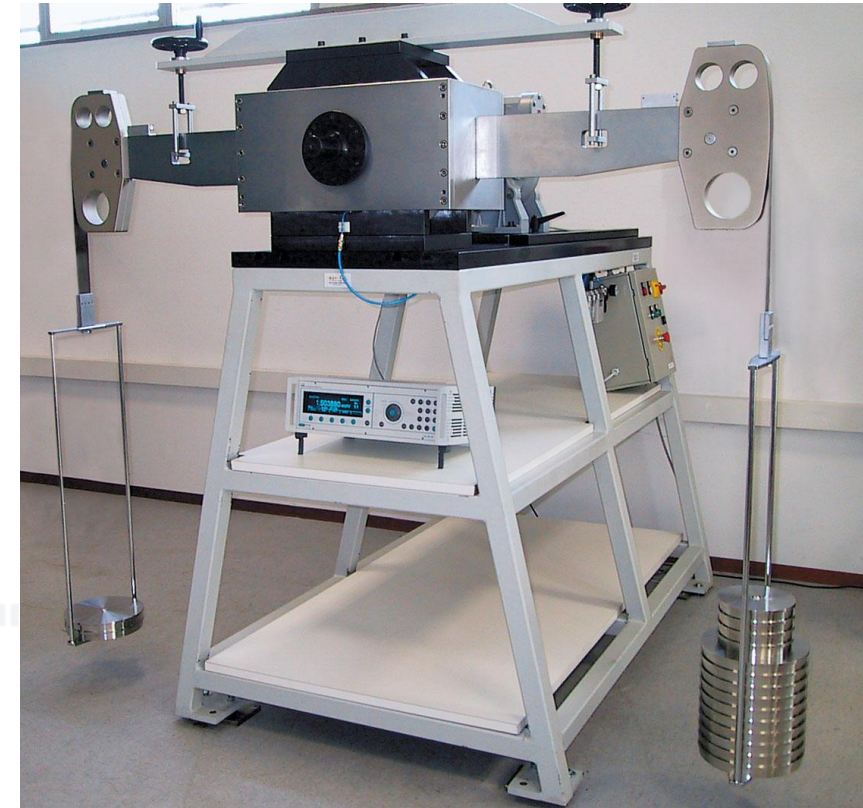
L'estensimetro misura la deformazione tangenziale:

$$\varepsilon = \frac{\tau}{G}$$

$G \rightarrow$ modulo di rigidezza del materiale

La coppia misurata può quindi essere determinata indirettamente:

$$T = \frac{J \cdot G \cdot \varepsilon}{r}$$



Celle di carico

Sono trasduttori che convertono una forza o un peso applicato in un segnale elettrico misurabile.

Largamente utilizzate in:

- bilance elettroniche industriali e da laboratorio,
- sistemi di controllo di processo,
- prove meccaniche e strutturali.



Celle di carico

Principio di base:

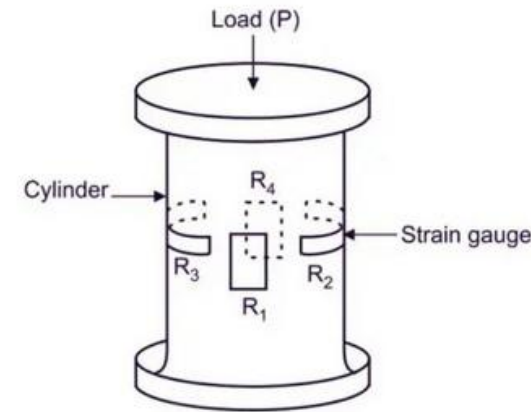
Una forza F causa una **deformazione elastica** in un corpo di misura.

Questa deformazione viene rilevata da un sensore (estensimetrico o piezoelettrico), che la trasforma in variazione di tensione o carica elettrica proporzionale.

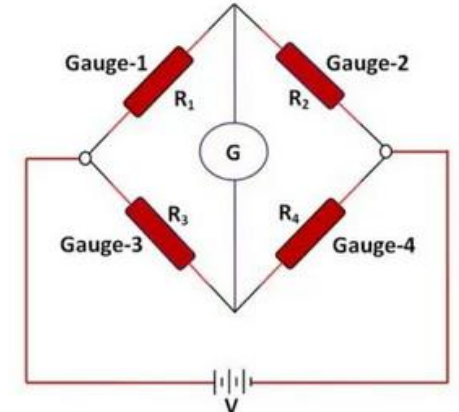
$$F = k \cdot \Delta x$$

Classificazione:

- Celle estensimetriche → variazione di resistenza elettrica.
- Celle piezoelettriche → generazione di carica elettrica.



Arrangement of strain gauge load cell



Strain gauge Load cell circuit diagram

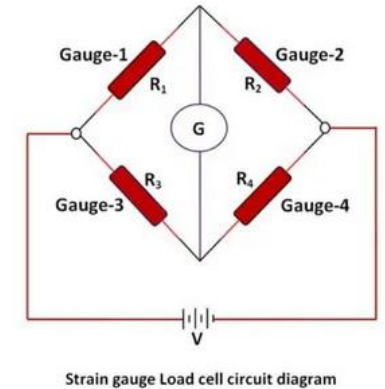
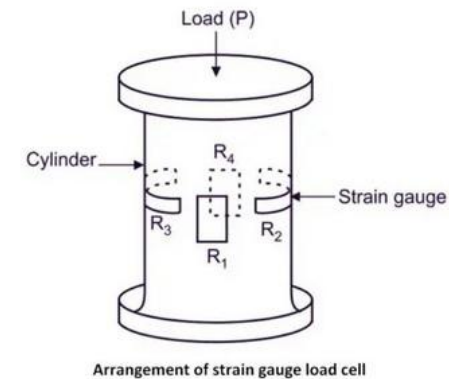
Celle estensimetriche

Utilizzano **estensimetri a resistenza** incollati su una struttura elastica.

Quando il corpo si **deforma sotto carico**, la lunghezza e la sezione del conduttore cambiano, provocando una **variazione di resistenza elettrica**:

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L}$$

L'uscita elettrica viene misurata con un **ponte di Wheatstone**, che amplifica la piccola variazione di tensione dovuta alla deformazione.



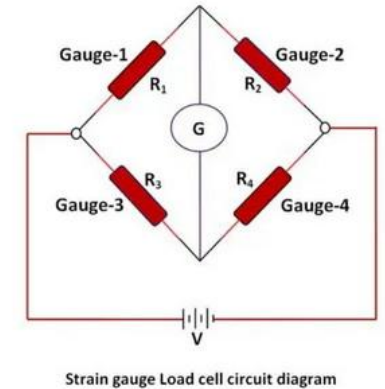
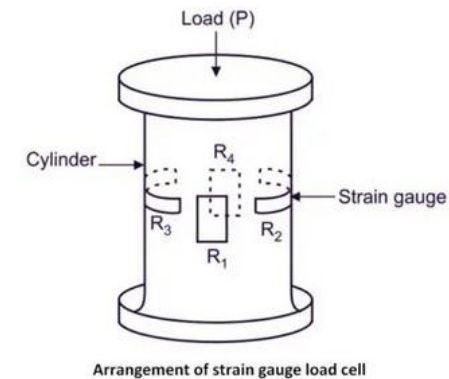
Celle estensimetriche

Vantaggi:

- Elevata precisione e stabilità a lungo termine.
- Ampio campo di misura (da pochi N a centinaia di kN).

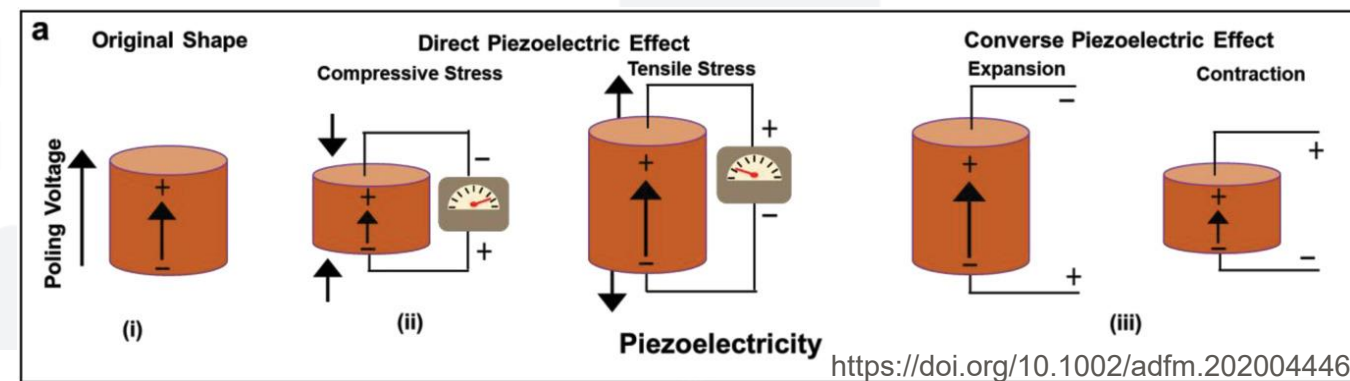
Limiti:

- Sensibili alla temperatura → necessaria compensazione termica.
- Non adatte a variazioni rapide o vibrazioni intense.



Celle piezoelettriche

- La **piezoelettricità** è una proprietà di **alcuni materiali cristallini** di **polarizzarsi** e generare ai loro capi una **differenza di potenziale** se sottoposti a deformazione meccanica (**piezoelettricità diretta**) e al tempo stesso di venire deformati se ai loro capi si applica una differenza di potenziale (**piezoelettricità inversa**).
- Diverse classi di materiali manifestano piezoelettricità, tra loro **materiali cristallini** (es. quarzo, topazio, ...), **materiali ceramici** e **semiconduttori**. In aggiunta ai materiali cristallini anche alcuni **materiali sintetici** ceramici o polimerici sono dotati (o possono venir dotati di tale proprietà).



Celle piezoelettriche

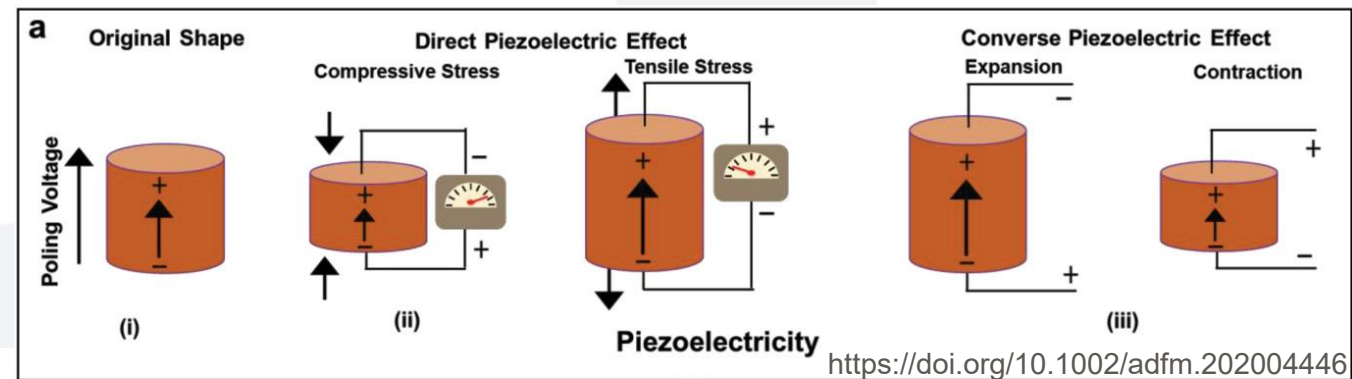
- La carica elettrica generata quando soggetti ad una sollecitazione meccanica è proporzionale alla forza applicata:

$$q = K_q \cdot x_i$$

Dove,

$K_q \rightarrow$ costante specifica del sensore [C/m]

$x_i \rightarrow$ deflessione [m]



Celle piezoelettriche

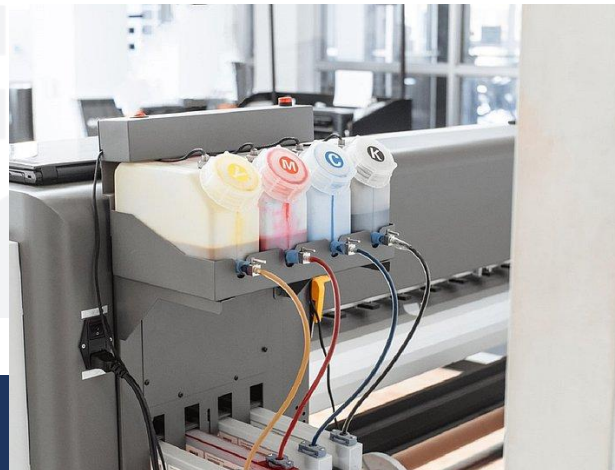
Il **principio meccanico-elettrico** è impiegato in diversi dispositivi che **trasformano un segnale elettrico in movimento o vibrazione** (o vice-versa). Ad esempio:

- **vibro trasduttori e agitatori** per prove dinamiche,
- **sistemi sonar** per misure acustiche e direzione,
- **apparecchiature ultrasoniche** per test non distruttivi,
- **pompe a getto d'inchiostro**, flussometri ultrasonici,
- **attuatori di micromovimento** di precisione.

Knock sensor (ICE)



Pompa a getto d'inchiostro



Celle estensimetriche vs piezoelettriche

Caratteristica	Estensimetrica	Piezoelettrica
Tipo di misura	Statica / quasi statica	Dinamica / transiente
Principio fisico	Variazione di resistenza	Generazione di carica
Sensibilità	Media–alta	Molto alta
Misura di lungo periodo	Ottima	Non adatta
Necessità di amplificazione	Media	Elevata (alta impedenza)
Costo	Medio	Medio–alto

Freni come strumenti di misura meccanica

Dinamometro

- Trasforma l'energia meccanica in calore, consentendo di **misurare coppia e potenza**.
- Utilizzati nei **banchi prova motore**.
- Misurano la coppia resistente generata dal freno in **condizioni controllate**.

$$P = 2\pi nT$$

Dove,

$P \rightarrow$ potenza [W]

$n \rightarrow$ velocità di rotazione [rps]

$T \rightarrow$ coppia resistente [Nm]

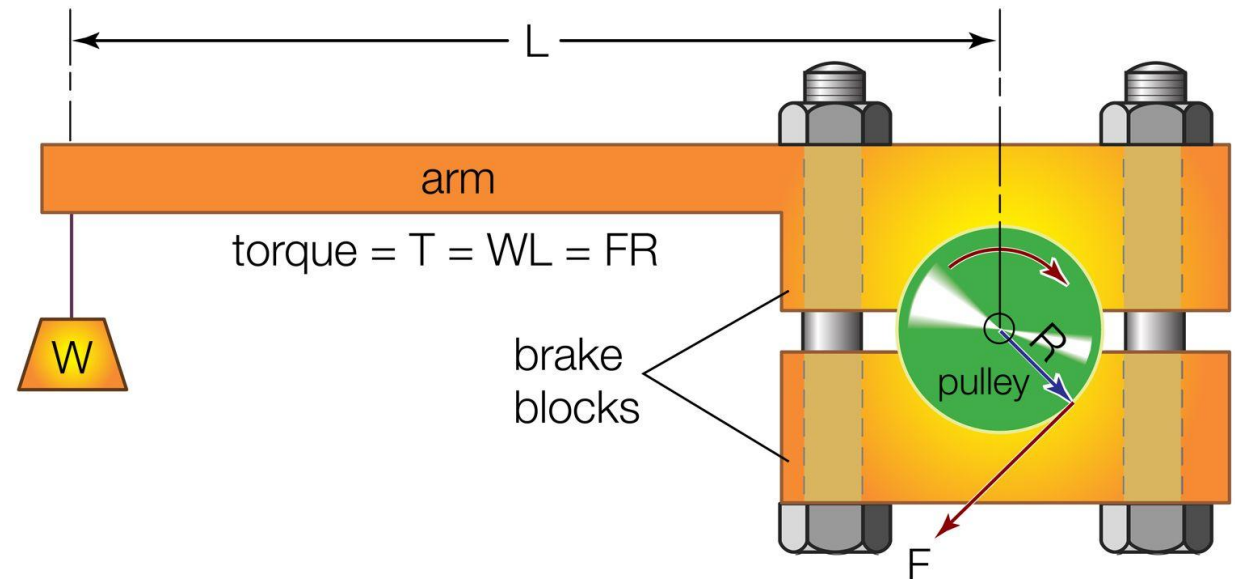


www.dynamometer-world.com

Freni meccanici

- Basati **sull'attrito tra superfici** in contatto (tamburo, disco, ...).
- La coppia resistente dipende da:

$$P = \frac{2\pi nWL}{60}$$



<https://www.britannica.com/>

Freni idraulici

- Utilizzano la **resistenza viscosa di un fluido** in movimento tra palette rotanti e statoriche.
- La coppia resistente cresce con la velocità e la densità del fluido.



<https://www.technomech.in/>



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE**



Ronelly De Souza

ronellyjose.desouza@dia.units.it

www.units.it