

L7

Introduzione alla strumentazione di processo



Sensori di processo

Un dispositivo di misura è costituito da:

- un **elemento sensibile primario**
- un **trasduttore**
- un **amplificatore**

L'insieme di questi elementi prende il nome di **TRASMETTITORE**.

Nel “gergo” comune per **trasmettitore** si intende il **sensore completo**.



Proprietà dei sensori

- **Accuratezza**

$$\varepsilon_f = 100 \frac{x_{misura} - x_{vero}}{x_{fondo\ scala}} \quad \text{Errore fondo scala}$$

$$\varepsilon_a = 100 \frac{x_{misura} - x_{vero}}{x_{vero}} \quad \text{Errore assoluto}$$

Se la scala di misura è molto grande ε_f non ha molto significato e può indurre in errore, ad esempio $\varepsilon_f = 1\%$ con $x_{fondo\ scala} = 100$ si traduce in un errore del 5% su un x_{vero} di 20

- **Precisione (o ripetibilità)**

Tale proprietà è legata alla riproducibilità della misura, ossia esprime la **dispersione relativa** a **successive misure** del valore misurato nelle medesime condizioni.

Si definisce come **scostamento** tra un generico **valore** della **misura** e la **miglior stima** della **misura** ottenuta con lo stesso strumento; poiché deriva da errori casuali può essere aumentata tramite media di letture successive



Proprietà dei sensori

- **Estensione del campo (*rangeability*)**

Una misura di portata con un campo (*i.e.* range) di misura $100 \frac{kg}{s} \div 5 \frac{kg}{s}$ viene indicata con un'estensione pari a 20:1.

- **Sensibilità**

$$S(y) = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad \begin{cases} \Delta y = \text{uscita sensore} \\ \Delta u = \text{variazione misura} \end{cases}$$

Se S non varia con y si parla di caratteristica lineare e S coincide con il guadagno statico del sensore.

- **Soglia di sensibilità o risoluzione (sulla temperatura)**

$$R_{\max} = 100 \frac{\Delta T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}$$

Dove ΔT_{\min} corrisponde alla minima differenza di temperatura che produca una differenza di potenziale apprezzabile.



Tipologie di sensori

In merito alle tecniche di misura e ai sensori impiegati maggiormente negli impianti chimici verranno trattati:

- campi di impiego
- fondamenti chimico-fisici per il funzionamento
- caratteristiche di accuratezza e sensibilità

Per:

- sensori e misure di **temperatura** (*i.e.* termometri)
- sensori e misure di **velocità** e **portata**
- sensori e misure di **pressione** (e di vuoto)
- sensori e misure di **livello**

presenti in tutti gli schemi di strumentazione e controllo di impianti, lasciando al compito didattico di altri insegnamenti la trattazione dell'analisi chimica strumentale



Strumenti di misura di temperatura



Strumenti di misura di temperatura

| Tipo di termometro | T minima [°C] | T massima [°C] |
|----------------------------------------------------|---------------|----------------|
| A dilatazione di gas (da laboratorio) | -253 | |
| A dilatazione di liquidi – Hg nel vuoto | -30 | +280 |
| A dilatazione di liquidi – Hg con azoto | -30 | +625 |
| A dilatazione di liquidi – Pentano | -200 | +20 |
| A dilatazione di liquidi – Alcool etilico | -110 | +20 |
| A dilatazione di liquidi – Toluolo | -70 | +100 |
| A dilatazione differenziale di solidi | -50 | +350 |
| A tensione di vapore | 0 | +250 |
| A pressione di liquido | -30 | +300 |
| Termocoppia di Fe – costantana | -200 | +800 |
| Termocoppia di Ni – NiCr | -200 | +1000 |
| Termocoppia di Pt – PtRe | +500 | +1350 |
| Termocoppia di Pt – PtRh | +600 | +1750 |
| A resistenza elettrica di platino | -200 | +650 |
| A resistenza elettrica di nichel | -70 | +150 |
| A resistenza elettrica di lega oro – argento | -30 | +120 |
| Pirometri ottici a radiazione totale | +20 | Oltre 2000 |
| Pirometri ottici a confronto di luminosità | +800 | Oltre 2000 |
| Pirometri ottici a confronto di luce monocromatica | +1000 | Oltre 2000 |
| Pirometri ottici a confronto di due colori | +1000 | Oltre 2000 |
| Pirometri ottici a cella fotoelettrica | +200 | Oltre 2000 |



Temperature standard per tarature

| Temperature fisse standardizzate (a 760 mm Hg) | T [°C] |
|---------------------------------------------------|----------|
| Punto di ebollizione dell'ossigeno liquido | -182 |
| Punto di solidificazione del solfuro di carbonio | -111.53 |
| Punto di sublimazione dell'anidride carbonica | -78.51 |
| Punto di solidificazione del mercurio | -38.87 |
| Punto di fusione del ghiaccio | 0.00 |
| Punto di solidificazione dell'iposolfito di sodio | +48.10 |
| Punto di ebollizione dell'acqua | +100.00 |
| Punto di ebollizione della naftalina liquida | +218 |
| Punto di fusione dello zinco | +419.45 |
| Punto di ebollizione dello zolfo | +444.60 |
| Punto di solidificazione dell'antimonio | +630.50 |
| Punto di solidificazione dell'argento | +960.50 |
| Punto di solidificazione dell'oro | +1063.00 |
| Punto di solidificazione del palladio | +1555.00 |
| Punto di solidificazione del tungsteno | +3400.00 |

Se la pressione non fosse di 760 mm Hg, la temperatura è data da

$$T^0 = T_{760\text{mmHg}}^0 + 0.0367(P - 760) - 0.000023(P - 760)^2$$



Sensori di temperatura e inerzia del sensore

In prima approssimazione il sensore può essere schematizzato come un **sistema dinamico** del 1° ordine (1 costante di tempo)

$$m \cdot c_P \cdot \frac{dT_S}{dt} = h \cdot A \cdot (T_F - T_S)$$

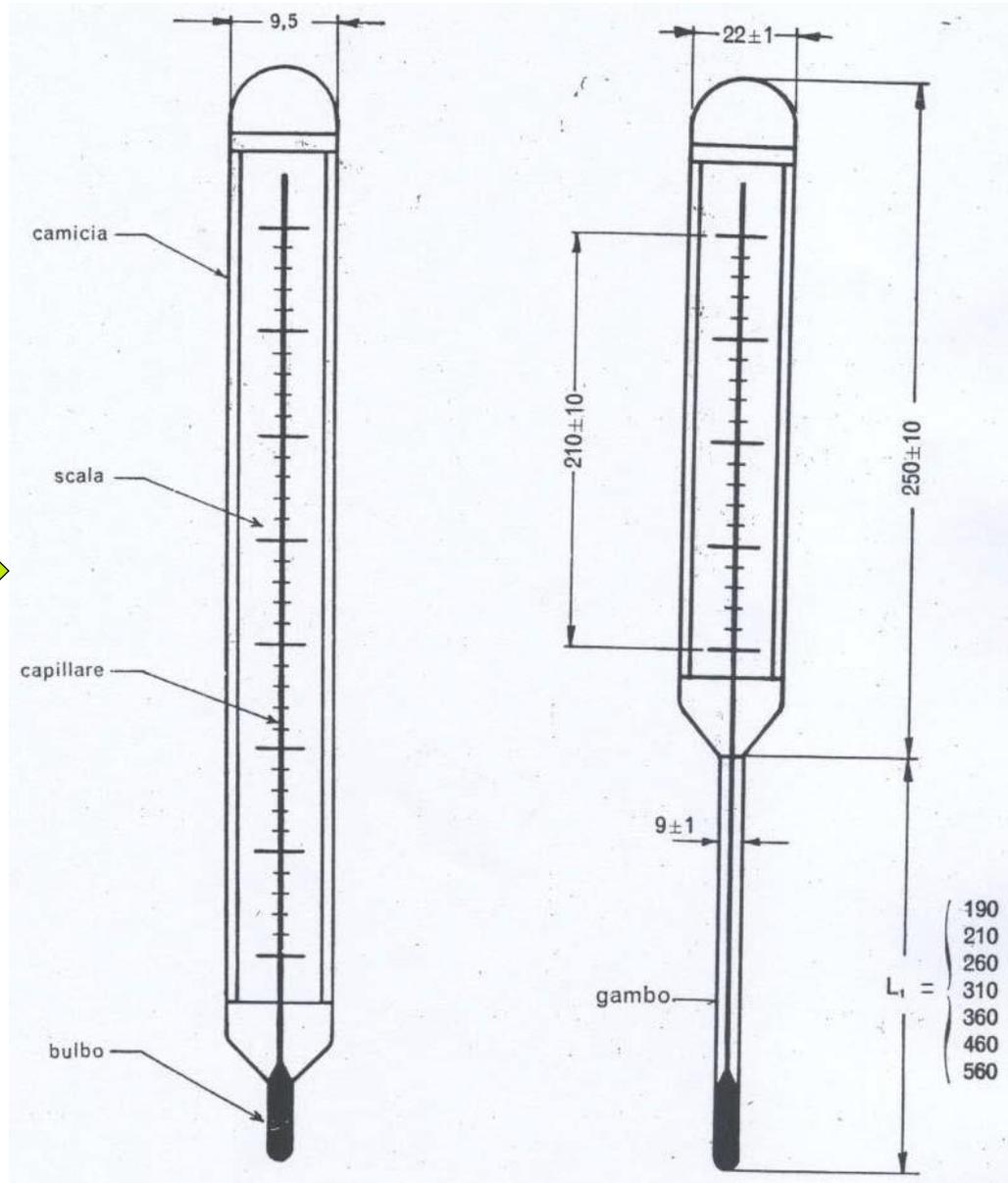
$$\tau_L \frac{dT_S}{dt} + T_S = T_F \quad \text{con } \tau_L = \frac{m \cdot c_P}{h \cdot A}$$

La risposta dinamica è tanto più pronta quanto più piccolo è il sensore e quanto più denso è il fluido. La robustezza del sensore pone richieste di segno opposto.

Valori di riferimento sono di seguito riportati:

| Elemento sensibile | Valori medi di τ_L in minuti con fluido in movimento | | | |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------|----------------|--------|
| | Senza protezione | | Con protezione | |
| | in liquido | in gas | in liquido | in gas |
| Termometri a dilatazione di liquido, di Hg, di gas, di vapore | 0,05 | 1 ÷ 3 | 1,5 ÷ 9 | 2 ÷ 10 |
| Termometri bimetallici | 0,5 | 7 | 2 | 8 ÷ 14 |
| Termometri elettrici a termocoppia | 0,017 | 0,5 | 0,6 | 1 ÷ 2 |
| Termometri elettrici a resistenza | 0,5 | 7 | 0,7 | 8 ÷ 10 |
| Pirometri ottici | — | 0,0083 | — | — |

Termometri a bulbo di Hg

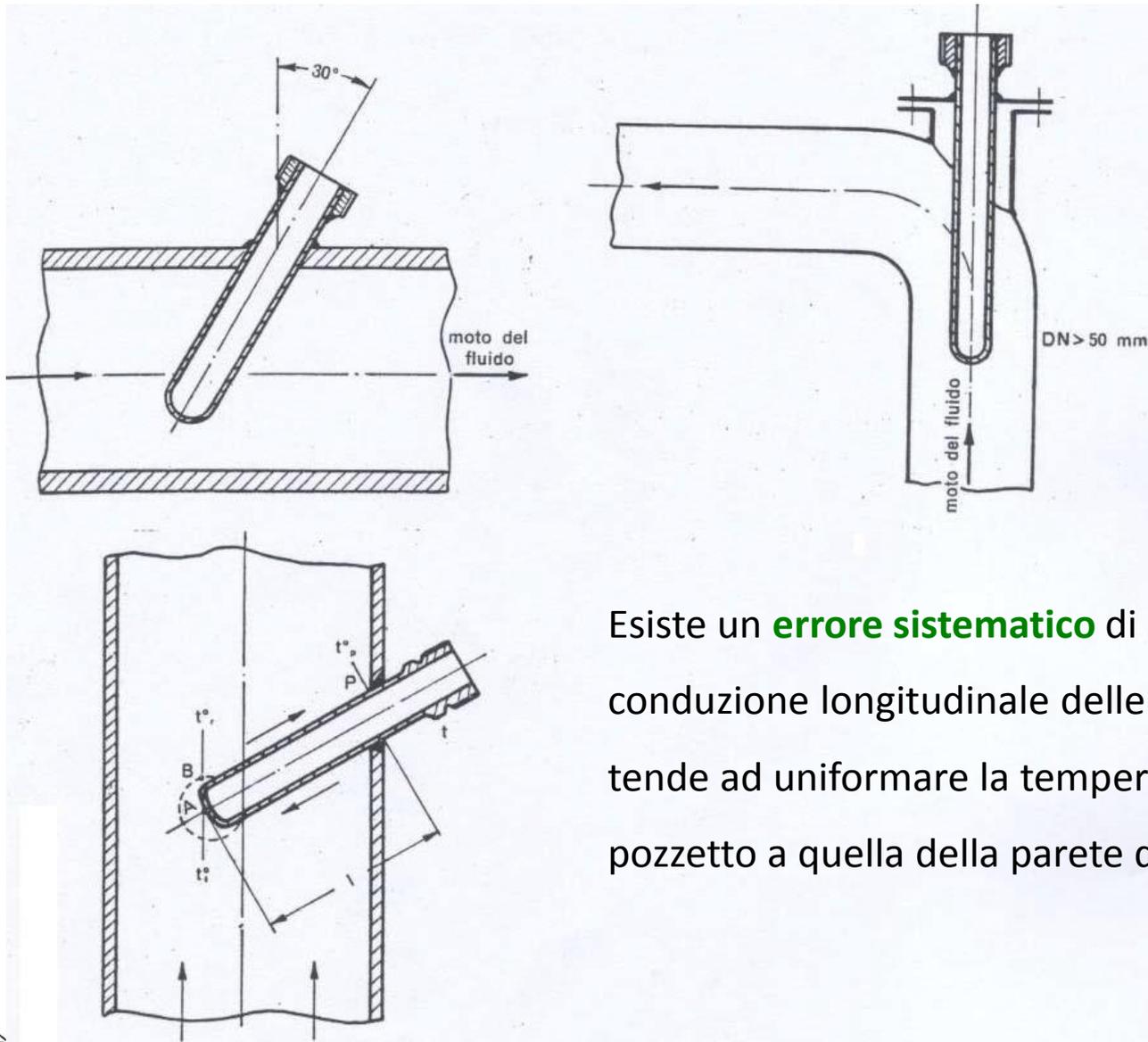


Da laboratorio

Industriali



Pozzetti termometrici



Esiste un **errore sistematico** di misura legato alla conduzione longitudinale delle pareti del pozzetto che tende ad uniformare la temperatura delle pareti del pozzetto a quella della parete della tubazione.

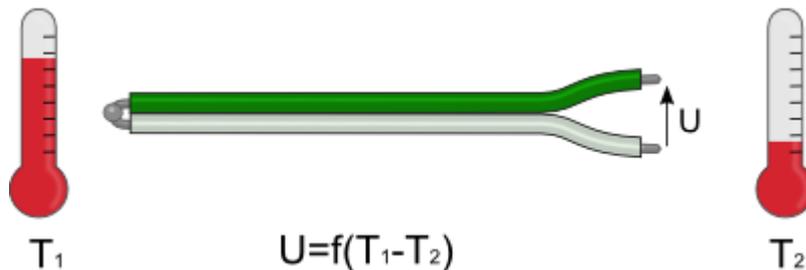
Termocoppie

Si basano sull'effetto termoelettrico detto anche **effetto Seebeck** grazie alla scoperta effettuata dal fisico Thomas Johann Seebeck nel 1821.

La termocoppia è costituita da **due fili metallici di natura distinta collegati agli estremi**.

Un estremo è posto ad una temperatura T_1 (**giunto caldo**) e l'altro estremo è posto ad una temperatura T_2 (**giunto freddo**).

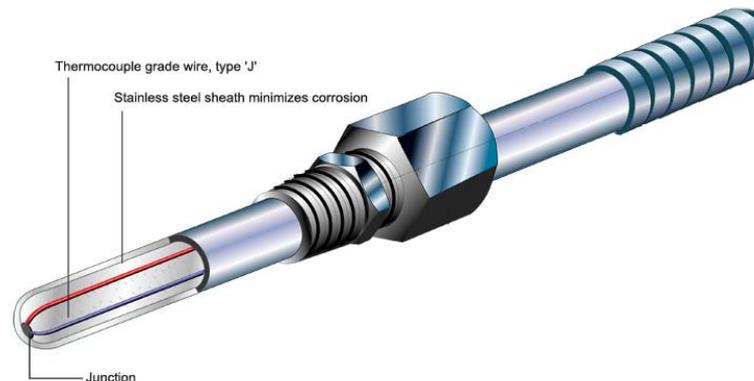
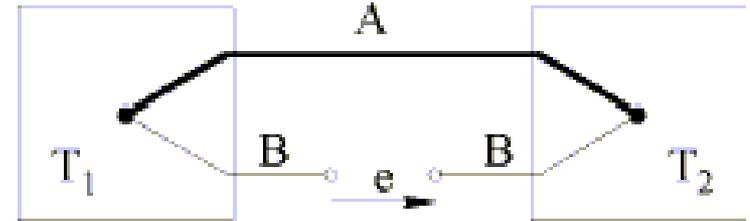
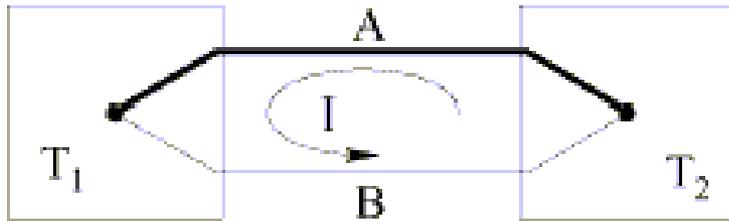
La **differenza di temperatura** esistente agli estremi induce una corrente elettrica caratterizzata da una tensione che dipende dal salto di temperatura stesso.



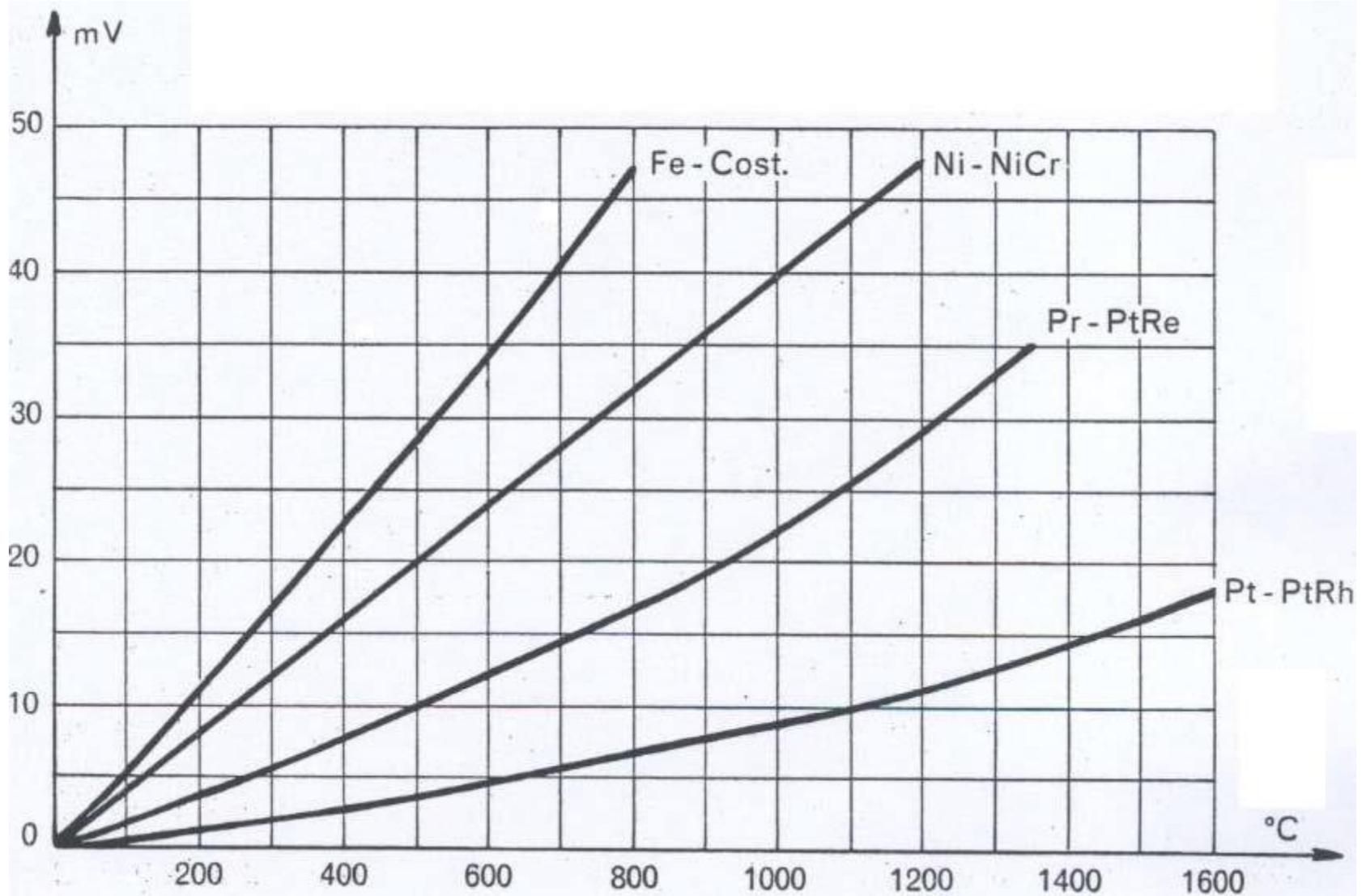
Thomas Johann Seebeck
(1770-1831)

Termocoppie

La **polarizzazione** e l'**intensità** della forza elettromotrice che si instaura nel circuito elettrico dipende dalla **tipologia** dei due metalli e dalla **temperatura** cui sono poste le due giunzioni.



Voltaggio e differenza di temperatura



Tipologie di termocoppie

| Tipologia di termocoppia | Coppie metalli | Range [°C] |
|--------------------------|--------------------|------------|
| J | ferro/costante | -100÷750 |
| K | chromel/alumel | 0÷1000 |
| E | chromel/costante | -150÷500 |
| T | rame/costante | -200÷300 |
| B | Pt80-Rh20/Pt94-Rh6 | 600÷1650 |
| S | Pt90-Rh10/Pt | 550÷1500 |
| R | Pt87-Rh13/Pt | 550÷1500 |
| N | Nichasil-nichel | 0÷1300 |



Esempio di tabella di conversione (mV/°C)

TERMOCOPPIE FERRO - COSTANTANA (NORMALIZZATE)

Gradi Centigradi

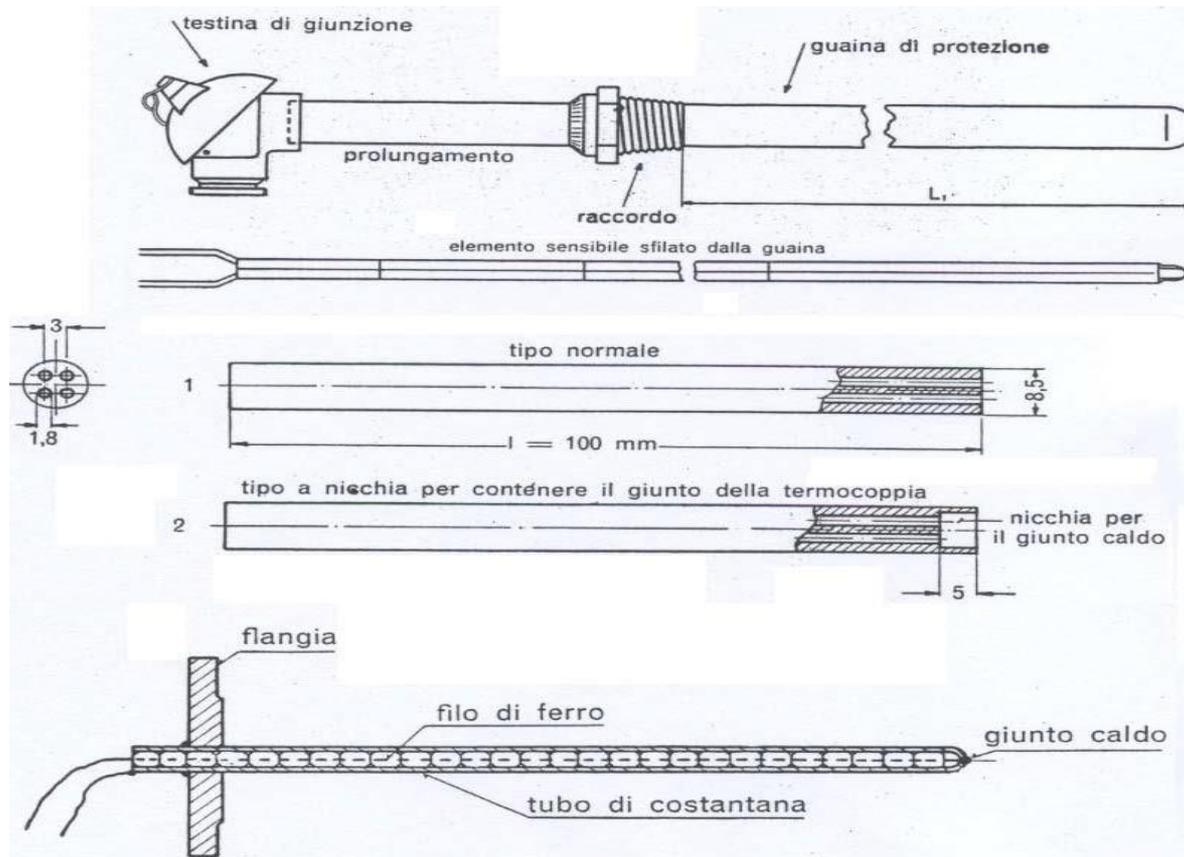
Giunto Freddo 0°C

| Gradi C. | 0° | 100° | 200° | 300° | 400° | 500° | 600° | 700° | 800° | 900° | 1000° | Gradi C. |
|----------|-----------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| | Millivolt | | | | | | | | | | | |
| 0° | .0 | 5.28 | 10.78 | 16.30 | 21.82 | 27.39 | 33.16 | 39.19 | 45.48 | 51.82 | 58.16 | 0° |
| 2° | .10 | 5.39 | 10.89 | 16.41 | 21.93 | 27.50 | 33.28 | 39.32 | 45.61 | 51.95 | 58.29 | 2° |
| 4° | .21 | 5.50 | 11.00 | 16.52 | 22.04 | 27.62 | 33.40 | 39.44 | 45.73 | 52.07 | 58.41 | 4° |
| 6° | .31 | 5.61 | 11.11 | 16.63 | 22.15 | 27.73 | 33.52 | 39.57 | 45.86 | 52.20 | 58.54 | 6° |
| 8° | .42 | 5.72 | 11.22 | 16.74 | 22.26 | 27.84 | 33.64 | 39.69 | 45.99 | 52.33 | 58.67 | 8° |
| 10° | .52 | 5.83 | 11.33 | 16.85 | 22.37 | 27.96 | 33.75 | 39.82 | 40.11 | 52.45 | 58.79 | 10° |
| 12° | .62 | 5.94 | 11.44 | 16.96 | 22.48 | 28.08 | 33.87 | 39.94 | 46.24 | 52.58 | 58.92 | 12° |
| 14° | .73 | 6.05 | 11.55 | 17.07 | 22.59 | 28.19 | 33.99 | 40.07 | 46.37 | 52.71 | 59.05 | 14° |
| 16° | .83 | 6.16 | 11.66 | 17.18 | 22.70 | 28.31 | 34.11 | 40.19 | 46.49 | 52.83 | 59.17 | 16° |
| 18° | .94 | 6.27 | 11.77 | 17.29 | 22.81 | 28.42 | 34.23 | 40.32 | 46.62 | 52.96 | 59.30 | 18° |
| 20° | 1.04 | 6.38 | 11.88 | 17.40 | 22.92 | 28.53 | 34.35 | 40.44 | 46.75 | 53.09 | 59.43 | 20° |
| 22° | 1.14 | 6.49 | 11.99 | 17.51 | 23.03 | 28.65 | 34.47 | 40.57 | 46.87 | 53.21 | 59.55 | 22° |
| 24° | 1.25 | 6.60 | 12.10 | 17.62 | 23.14 | 28.76 | 34.59 | 40.69 | 47.00 | 53.34 | 59.68 | 24° |
| 26° | 1.35 | 6.70 | 12.22 | 17.74 | 23.26 | 28.88 | 34.70 | 40.82 | 47.13 | 53.47 | 59.81 | 26° |
| 28° | 1.46 | 6.81 | 12.33 | 17.85 | 23.37 | 28.99 | 34.82 | 40.94 | 47.26 | 53.60 | 59.94 | 28° |
| 30° | 1.56 | 6.92 | 12.44 | 17.96 | 23.48 | 29.11 | 34.94 | 41.07 | 47.38 | 53.72 | 60.06 | 30° |
| 32° | 1.66 | 7.03 | 12.55 | 18.07 | 23.59 | 29.22 | 35.06 | 41.19 | 47.51 | 53.85 | 60.19 | 32° |
| 34° | 1.77 | 7.14 | 12.66 | 18.18 | 23.70 | 29.33 | 35.18 | 41.32 | 47.64 | 53.98 | 60.32 | 34° |
| 36° | 1.87 | 7.25 | 12.77 | 18.29 | 23.81 | 29.45 | 35.30 | 41.44 | 47.76 | 54.10 | 60.44 | 36° |
| 38° | 1.98 | 7.36 | 12.88 | 18.40 | 23.92 | 29.56 | 35.42 | 41.57 | 47.89 | 54.23 | 60.57 | 38° |
| 40° | 2.08 | 7.47 | 12.99 | 18.51 | 24.03 | 29.68 | 35.54 | 41.69 | 48.02 | 54.36 | 60.70 | 40° |
| 42° | 2.18 | 7.58 | 13.10 | 18.62 | 24.14 | 29.79 | 35.65 | 41.82 | 48.14 | 54.48 | 60.82 | 42° |
| 44° | 2.29 | 7.69 | 13.21 | 18.73 | 24.25 | 29.91 | 35.77 | 41.94 | 48.27 | 54.61 | 60.95 | 44° |
| 46° | 2.39 | 7.80 | 13.32 | 18.84 | 24.36 | 30.02 | 35.89 | 42.07 | 48.40 | 54.74 | 61.08 | 46° |
| 48° | 2.50 | 7.91 | 13.43 | 18.95 | 24.47 | 30.14 | 36.01 | 42.19 | 48.52 | 54.86 | 61.20 | 48° |
| 50° | 2.60 | 8.02 | 13.54 | 19.06 | 24.58 | 30.25 | 36.13 | 42.32 | 48.65 | 54.99 | 61.33 | 50° |

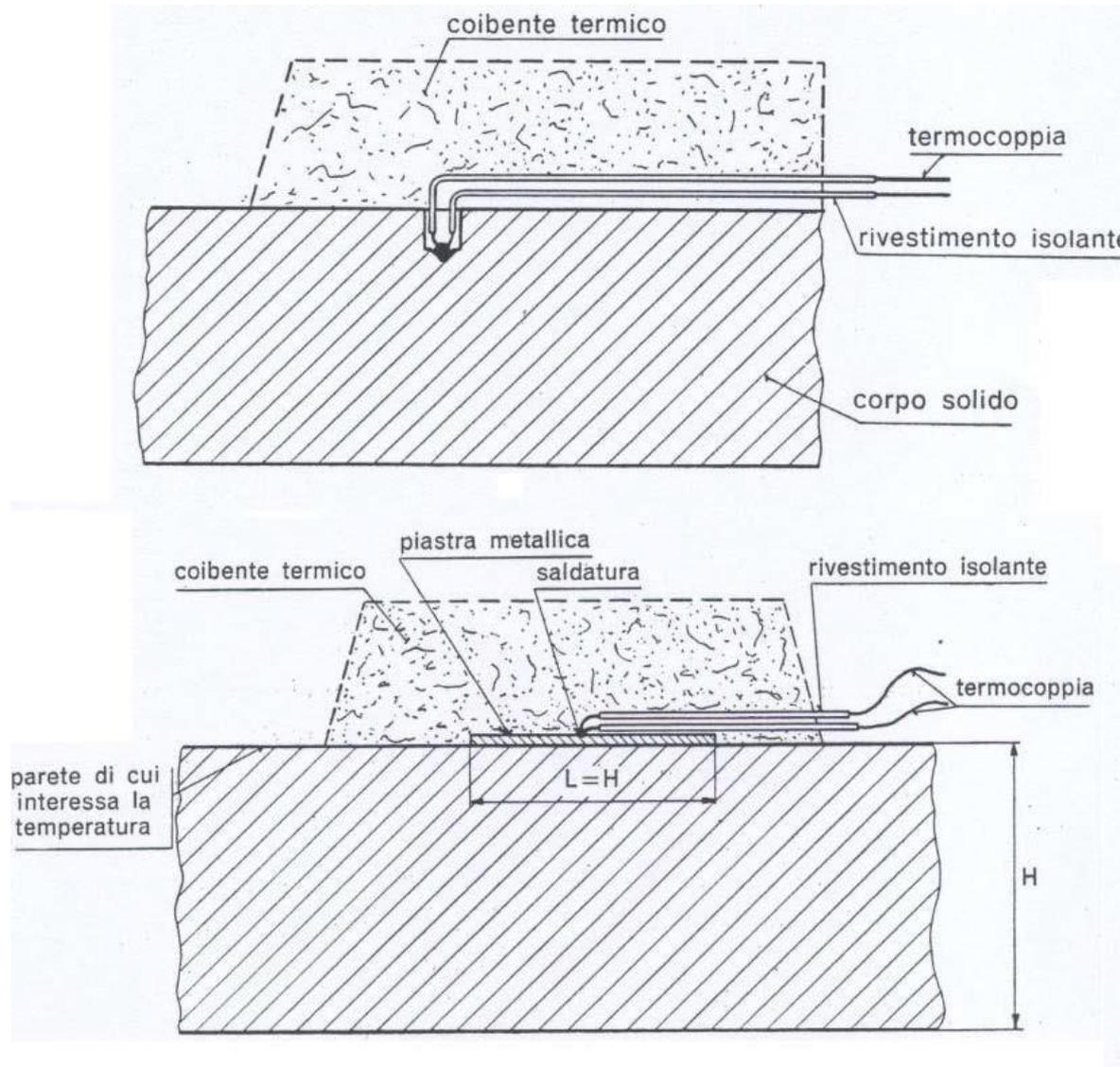


Protezione delle termocoppie

- Guaine metalliche $\rightarrow T < 800^{\circ}\text{C}$
- Guaine di porcellana (caolino) $\rightarrow 800^{\circ}\text{C} < T < 1200^{\circ}\text{C}$
- Guaine di allumina porcellanata $\rightarrow 1200^{\circ}\text{C} < T < 1600^{\circ}\text{C}$



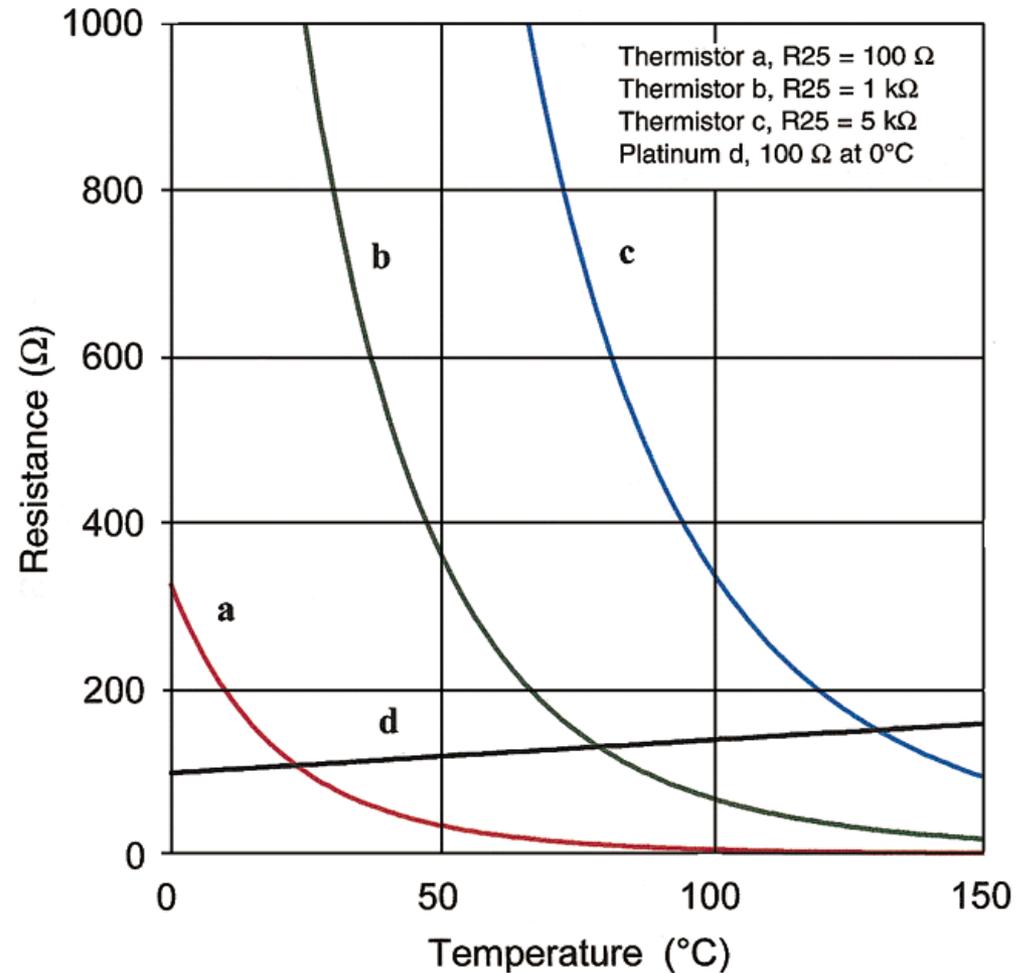
Misura di temperatura di solidi e di pelle



Termometri a resistenza elettrica

- **Metalli** (*e.g.*, Pt) $\rightarrow (dR/dT) > 0$
- **Termistori** (*e.g.*, ossidi di Mn-Ni-Co sinterizzati) $\rightarrow (dR/dT) < 0$

Comparative Resistance Graph
Thermistor vs. RTD

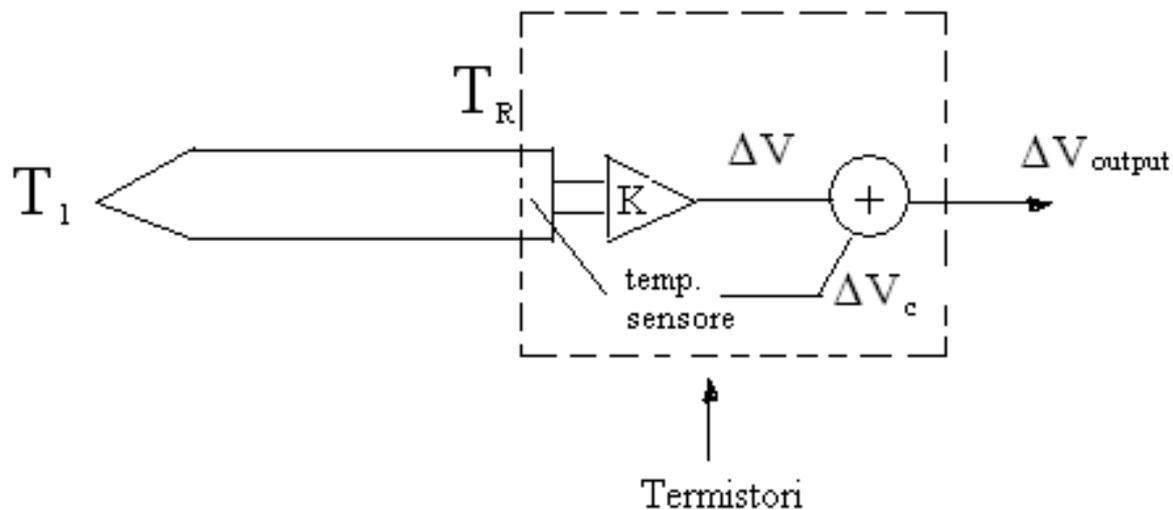


Termistori

Nei termistori la resistenza elettrica cambia velocemente al variare della temperatura.

Sono molto precisi in range di temperatura sufficientemente ridotti (0-100°C).

Sono strumenti di misura delicati.



Strumenti di misura di portata



Sensori di velocità e di portata

I sensori di portata, comunemente detti anche **flussometri**, possono essere catalogati in diversi gruppi.

Si hanno i cosiddetti **dispositivi a strozzamento**, cioè dischi forati, bocchagli e venturimetri, e il gruppo dei misuratori a sezione variabile.

Ci sono ulteriori tipi di sensori, di più recente concezione, che effettuano la misura basandosi su **altri principi** sfruttando gli sviluppi della **microelettronica** (alcuni introducono instabilità nel moto del fluido e poi ne misurano la **frequenza**, correlata con la portata; altri misurano **effetti elettromagnetici** o la forza di Coriolis indotta dal moto del fluido in specifici condotti di misura).



Sensori di velocità – tubi di Pitot

Il **carico** viene misurato tramite l'equazione di Bernoulli

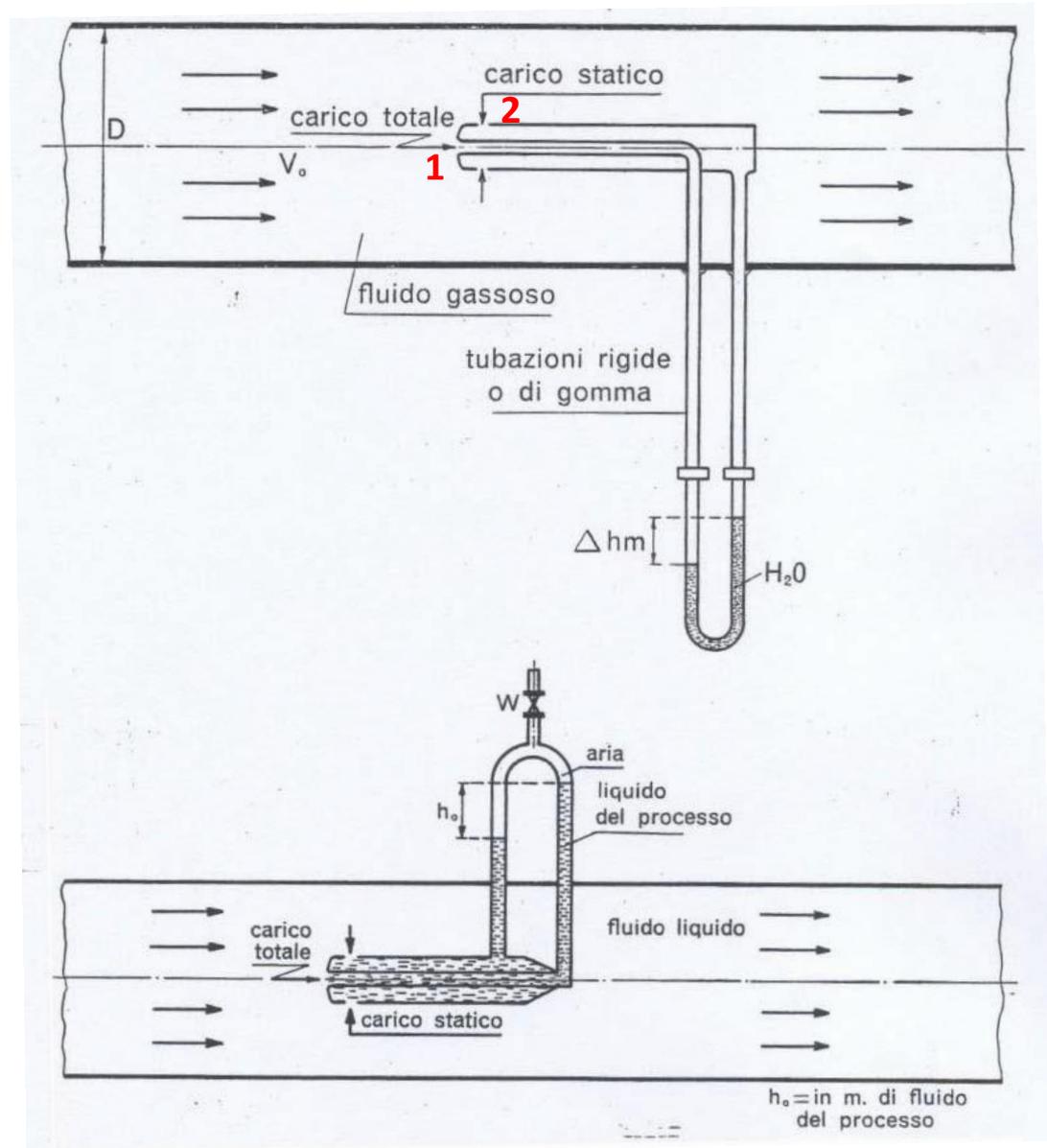
$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g}$$



$$\Delta h = \frac{v_1^2}{2 \cdot g}$$

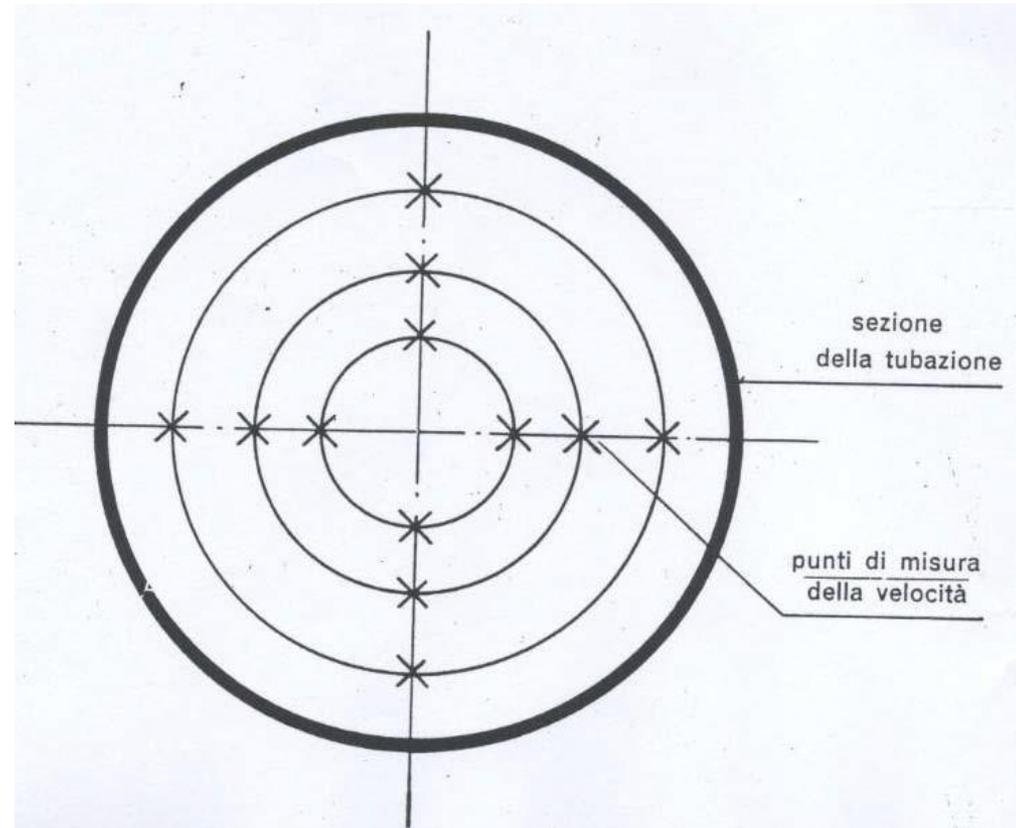
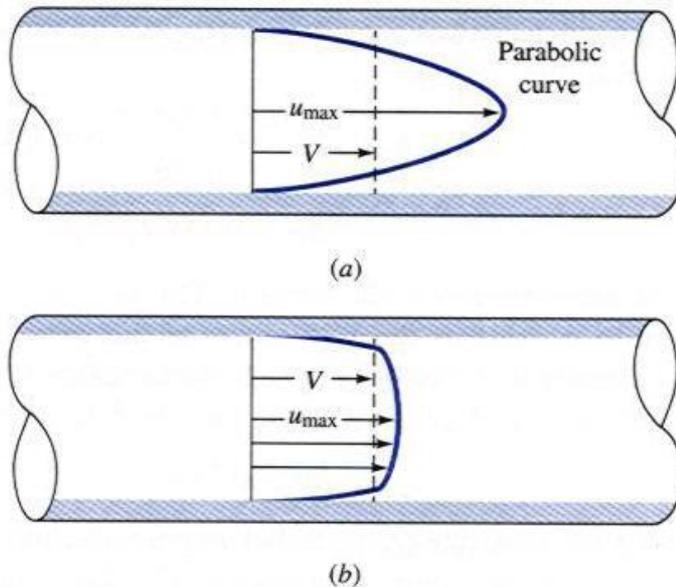


$$v_1 = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h}$$



Misurazione della velocità

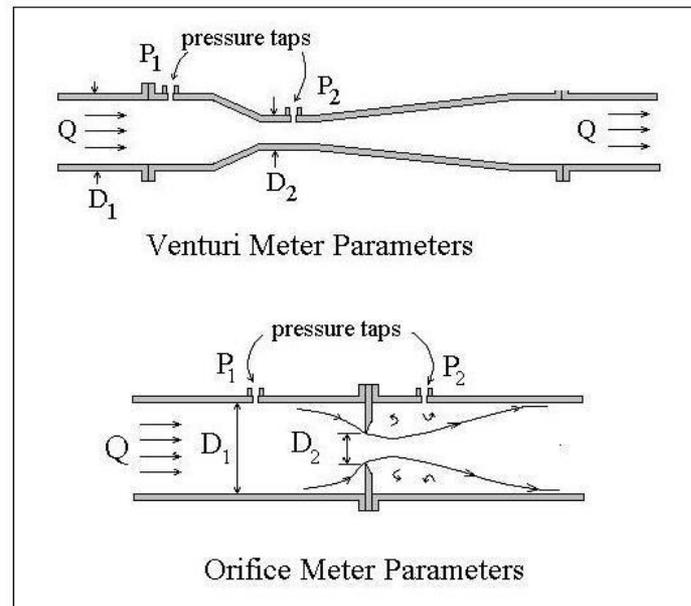
Per determinare il valore della portata occorre misurare in diversi punti a causa del profilo non uniforme sulla sezione di passaggio del fluido.



Diaframmi forati o venturimetri

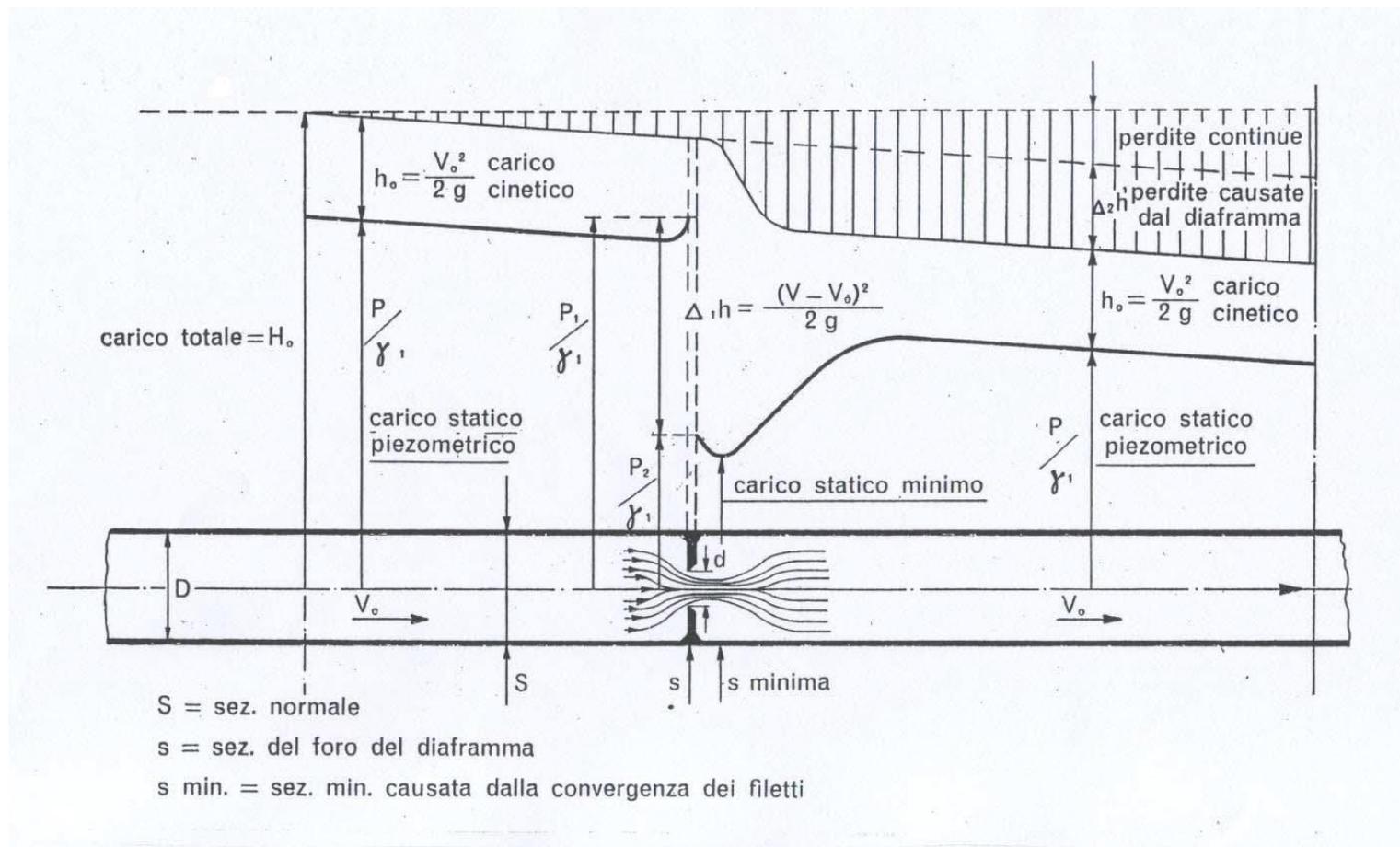
I diaframmi forati impongono una **contrazione** nella **sezione di passaggio** e provocano l'aumento della velocità del fluido in un tratto del condotto. Un aumento della velocità comporta una **caduta di pressione**, che viene misurata valutando la differenza tra la pressione a monte del dispositivo e quella in corrispondenza della sezione contratta.

Dalla caduta di pressione si può risalire alla portata fluente tramite l'**equazione di Bernoulli**.

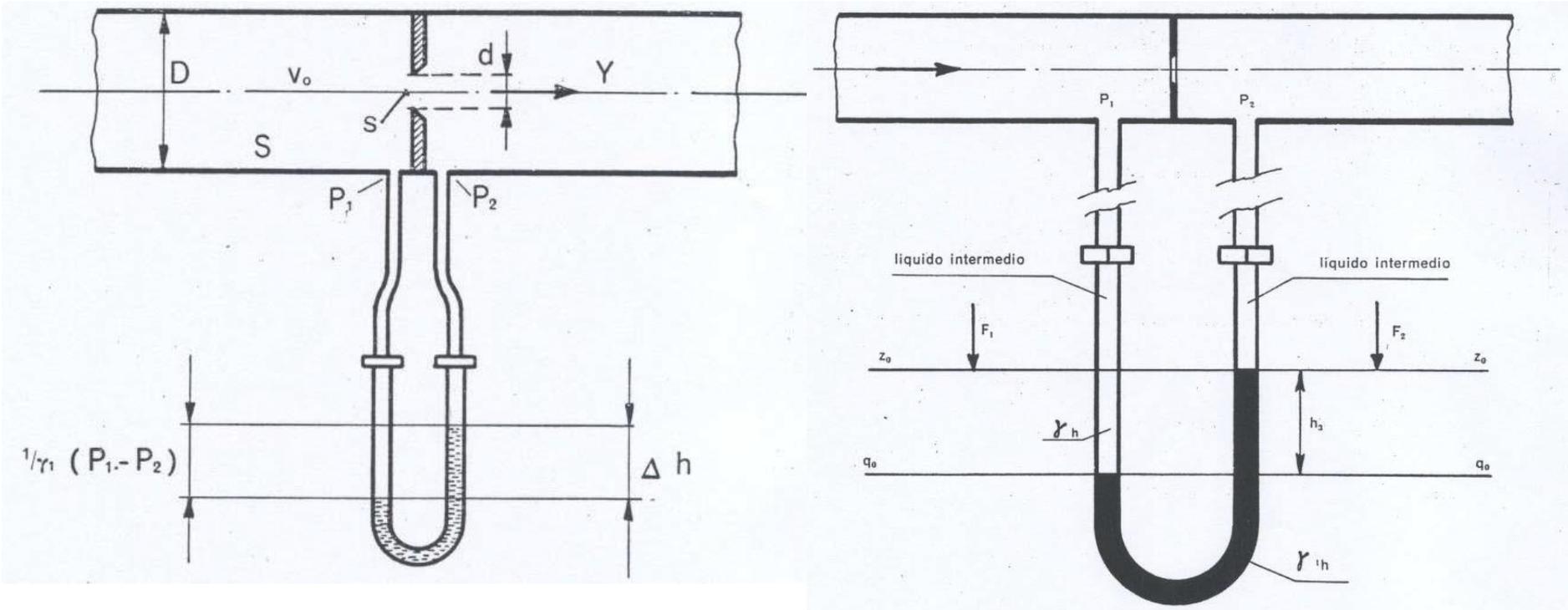


Misura di portata tramite diaframma forato

A causa della presenza di un disco forato, il carico idraulico lungo la tubazione varia a seconda della velocità del fluido.



Misura di portata tramite diaframma forato



Misura di portata tramite diaframma forato

A partire dal trinomio di Bernoulli è possibile scrivere:

$$\begin{cases} \frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} \\ Q_1 = Q_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{v_1^2}{2} + \frac{P_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + \frac{P_2}{\rho} \\ v_1 S_1 = v_2 S_2 \end{cases} \Rightarrow v_1 = v_2 \frac{S_2}{S_1}$$

$$v_1^2 - v_2^2 = 2 \frac{P_2 - P_1}{\rho} \Rightarrow \left(\frac{v_1^2}{v_2^2} - 1 \right) v_2^2 = 2 \frac{P_2 - P_1}{\rho} \quad \text{con } m = \frac{S_2}{S_1}$$

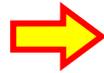
$$\Rightarrow \frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1} \Rightarrow \frac{v_1^2}{v_2^2} = \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^2 = m^2$$

$$(m^2 - 1) v_2^2 = 2 \frac{P_2 - P_1}{\rho} \Rightarrow (1 - m^2) v_2^2 = 2 \frac{P_1 - P_2}{\rho} \Rightarrow v_2 = \sqrt{\left(\frac{2}{1 - m^2} \right) \left(\frac{P_1 - P_2}{\rho} \right)}$$

Misura di portata tramite diaframma forato

È quindi possibile calcolare la portata fluente tramite la seguente formula:

$$v_2 = \sqrt{\left(\frac{2}{1-m^2}\right)\left(\frac{P_1 - P_2}{\rho}\right)}$$

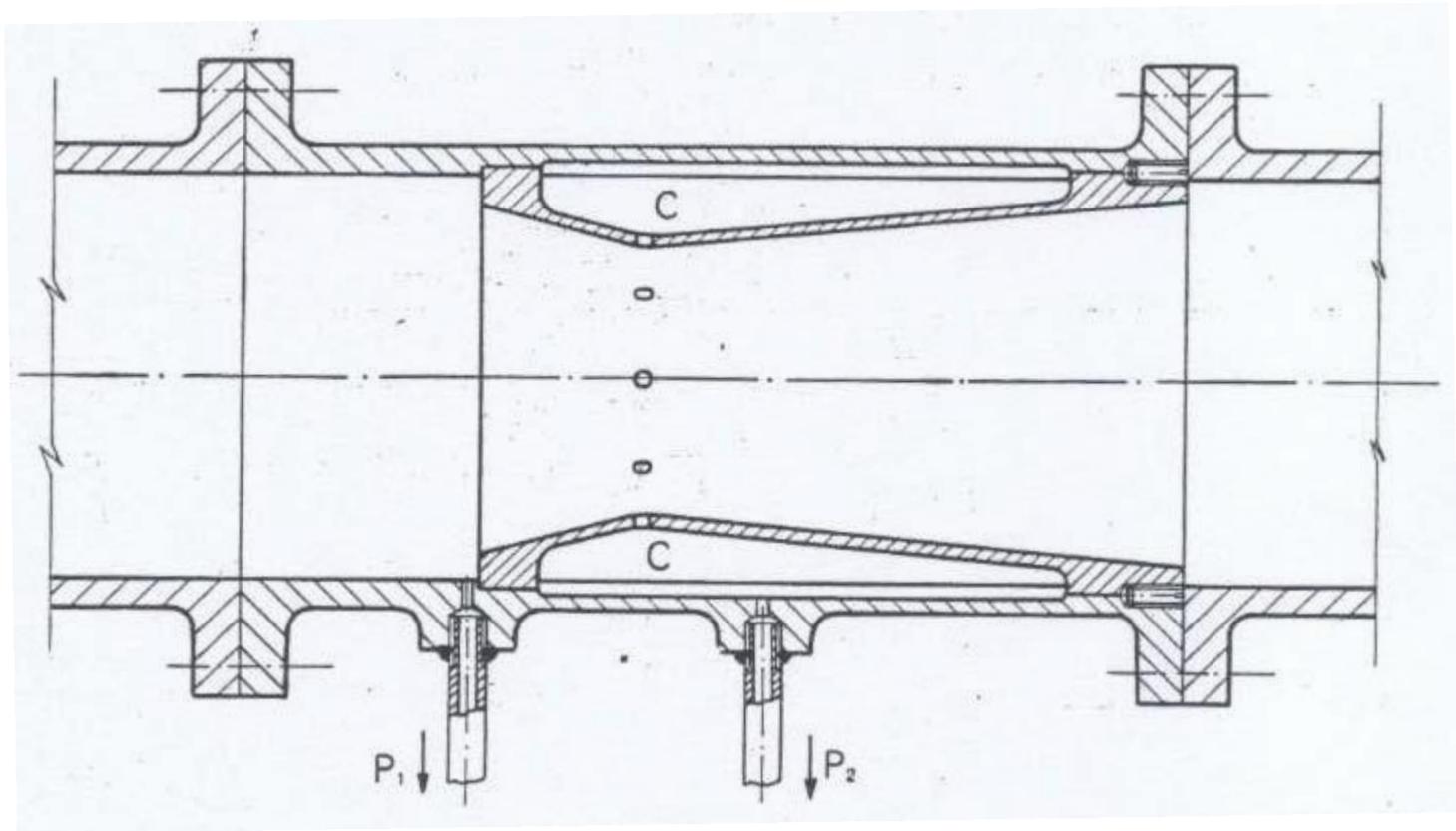


$$Q = \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\left(\frac{2}{1-m^2}\right)\left(\frac{P_1 - P_2}{\rho}\right)}$$

Misura di portata tramite tubo di Venturi

Sulla sezione contratta, i fori sulla parete mettono in comunicazione la zona di flusso con la **camera anulare** (C) da cui è misurata la pressione P_2 .

P_1 è misurata a monte.



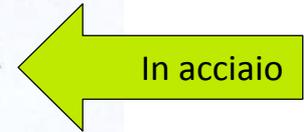
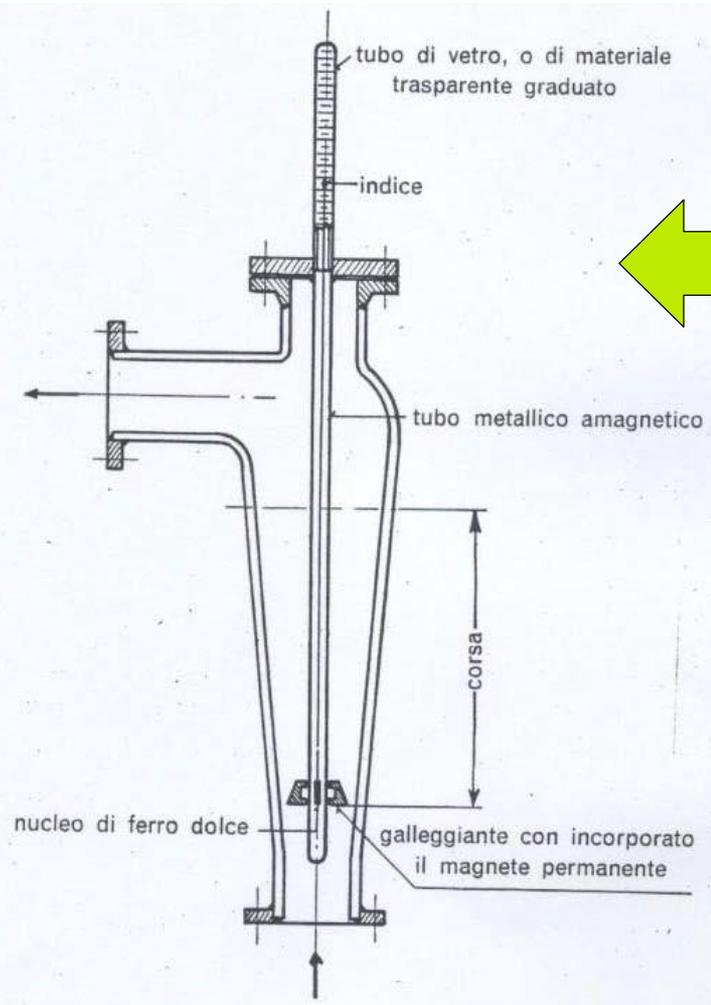
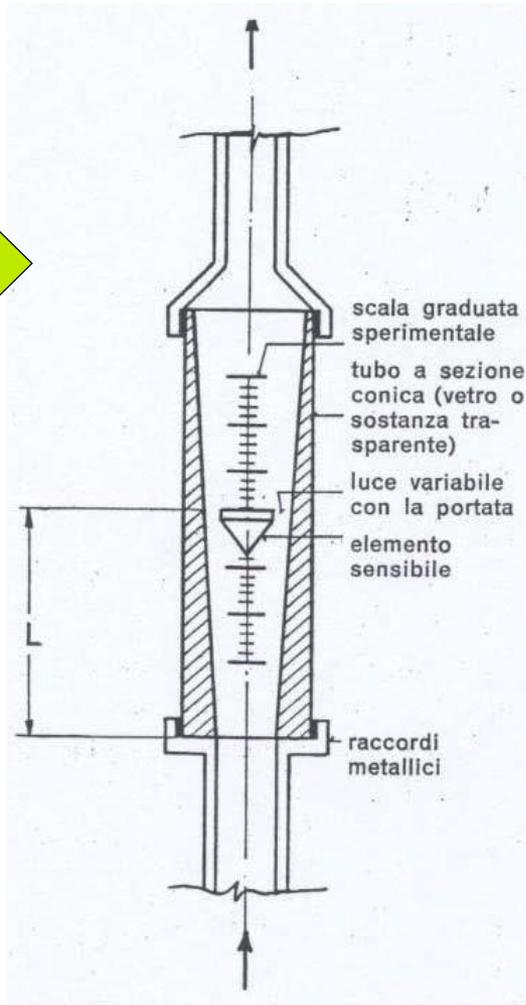
Flussimetri

Il flussimetro è sostanzialmente un **tubo** di vetro o altro materiale (solitamente) trasparente a sezione longitudinale conica, dentro il quale vi è un corpo cilindro-conico o sferico di diametro leggermente inferiore a quello minimo del tubo, detto **galleggiante**. Se il tubo viene posto in posizione verticale, con il diametro interno maggiore in alto, ed il fluido la cui portata si vuole misurare viene fatto entrare dal basso, si esercita sul galleggiante una **pressione** che dipende dalla **forma** e dalla **velocità** del **fluido** nella corona circolare tra tubo e galleggiante stesso.

La pressione decresce all'aumentare della sezione di corona circolare che resta libera, e si raggiunge un **equilibrio che dipende dalla velocità** (e dalle caratteristiche fisiche) **del fluido**, dalla massa del galleggiante e dalla sua forma. L'elemento sensibile è il galleggiante che si posiziona nella sezione tronco-conica del tubo di misura opportunamente graduata.

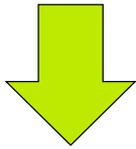


Misura di portata tramite flussimetri

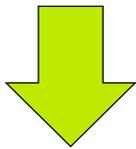


Misura di portata tramite flussimetri

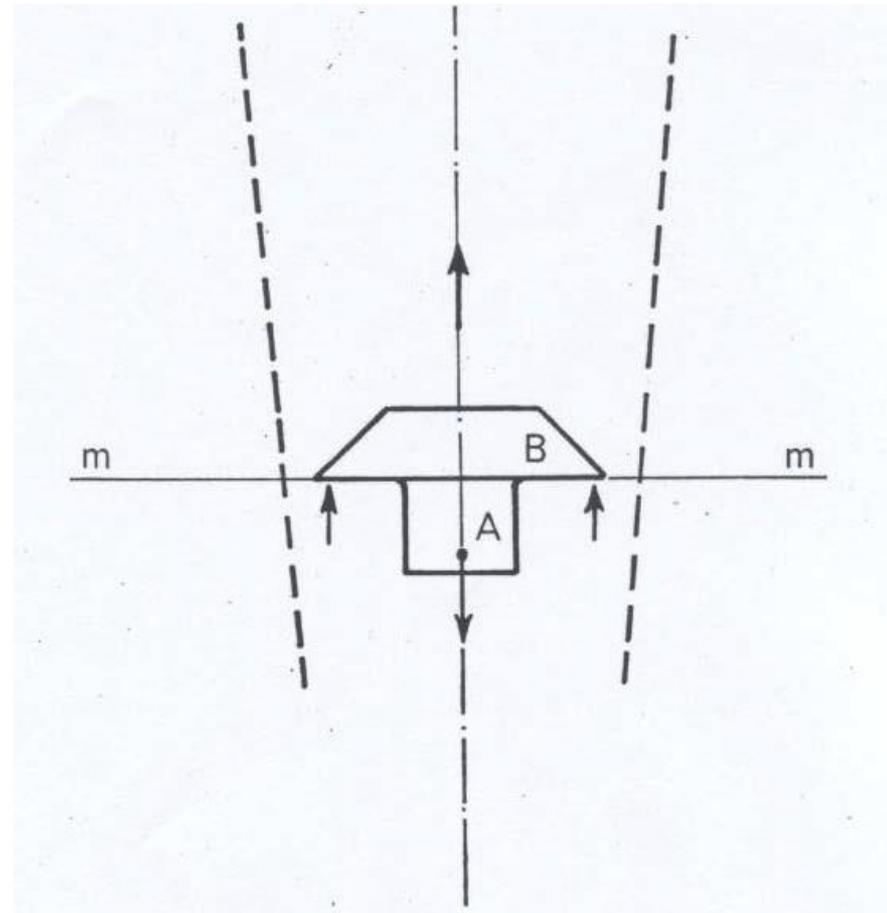
$$\rho_S v_S g - \rho_F v_F g = \Delta P \cdot A_S$$



$$\frac{\Delta P \cdot A_S}{\rho_F \cdot g} = \frac{\rho_S - \rho_F}{\rho_F} v_S = \text{costante}$$



$$\frac{\Delta P}{\rho_F \cdot g} = h = \frac{\rho_S - \rho_F}{\rho_F} \frac{v_S}{A_S} = \text{costante}$$

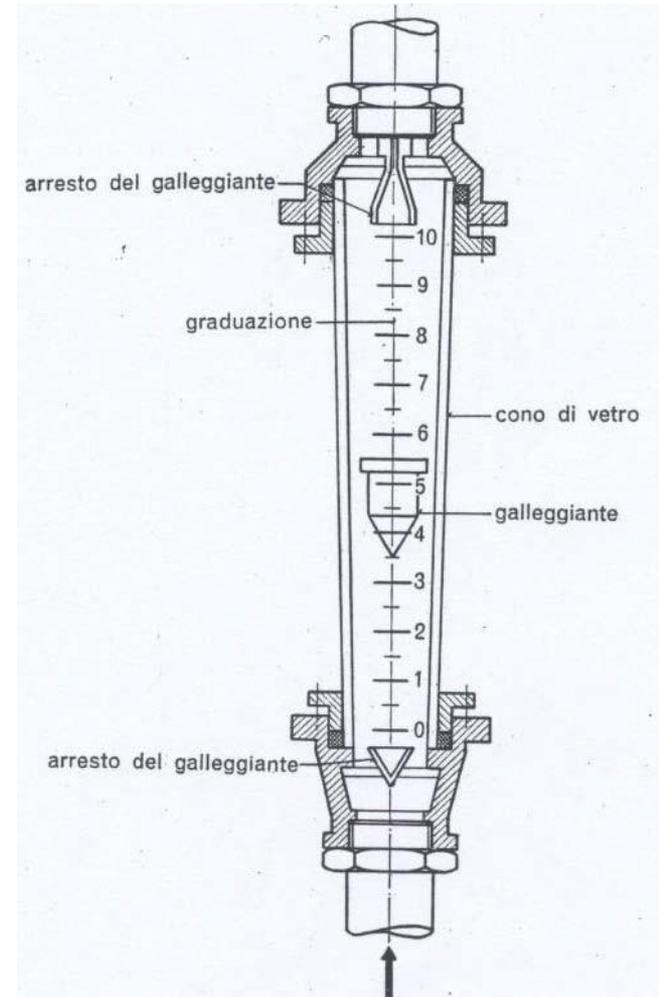


Misura di portata tramite flussimetri

La portata è proporzionale alla sezione di passaggio: questa cresce linearmente con l'altezza:

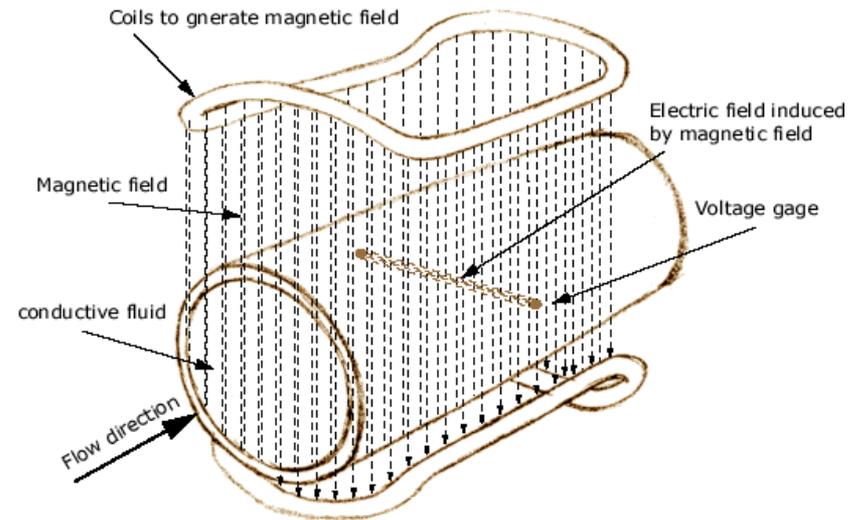
$$Q = c_c \cdot v \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)$$

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = \text{costante}$$



Sensori di portata elettromagnetici

Il **fluido conduttore** viene sottoposto ad un **campo magnetico trasversale**, generando così su un asse normale alla direzione di moto del fluido e al campo magnetico, una **forza elettromotrice** che viene individuata e misurata tramite elettrodi; da essa si ricava la velocità del fluido e quindi la portata.

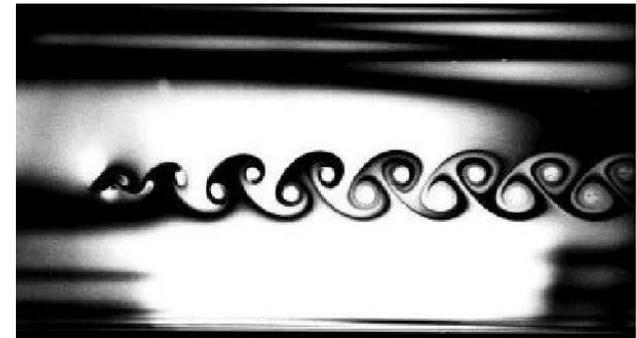


$$f_{em} = B \cdot v \cdot d_{tubo}$$

$$W = \rho \cdot A \cdot \frac{f_{em}}{B \cdot d_{tubo}}$$

Sensori di portata a vortice (Vortex)

Mediante un **corpo non smussato** inserito nel **centro** della corrente fluida si produce un **moto instabile** con formazione di **vortici** che si staccano in successione dal corpo estraneo. La **frequenza** di distacco dei vortici è **direttamente proporzionale** alla **velocità** del fluido e quindi alla portata (vedi anche numero adimensionale di Strouhal).

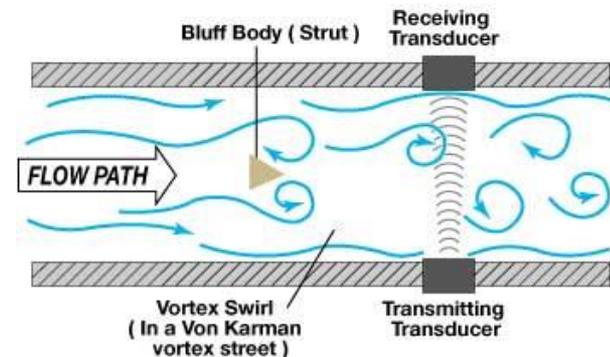


$$f_v = k \cdot v$$

frequenza vortici

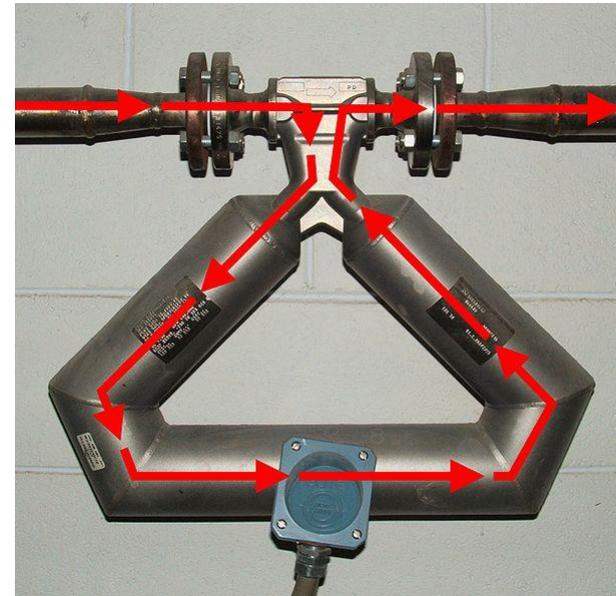
$$W = \rho \cdot A \cdot \frac{f_v}{k}$$

portata



Misura di portata tramite effetto di Coriolis

In un sistema di riferimento uniformemente rotante, un corpo in movimento appare (ad un osservatore nello stesso sistema di riferimento), come soggetto ad una forza radiale rispetto al movimento del sistema, detta **forza di Coriolis**. Se si fa quindi passare un fluido in un tubo (solitamente a forma di U) si crea uno sforzo in questo tubo cui fa seguito una deformazione/spostamento a causa della forza di Coriolis agente sul tubo stesso. Questo **spostamento** è **proporzionale** alla **portata massica**, che può così essere misurata.



Strumenti di misura di pressione



Sensori di pressione

A causa di una gran varietà di condizioni, campo di variabilità e materiali per i quali deve essere misurata la pressione, vi sono tipi differenti di sensori.

I principi su cui si basa la **misurazione della pressione** sono:

- **Pressione statica**: se un fluido non è in movimento
- **Pressione dinamica**: se un fluido è in movimento, tenendo conto delle condizioni in cui viene misurata la pressione
- **Pressione differenziale**: spesso è più interessante descrivere la pressione in termini relativi nei confronti della pressione atmosferica:

$$P_{rel} = P_{abs} - P_{atm}$$

- **“Pressione in altezza”**: pressione statica prodotta dal peso del liquido sopra il punto nel quale la pressione è descritta (dipende solo dall’altezza del liquido sopra quel punto e dalla densità del liquido):

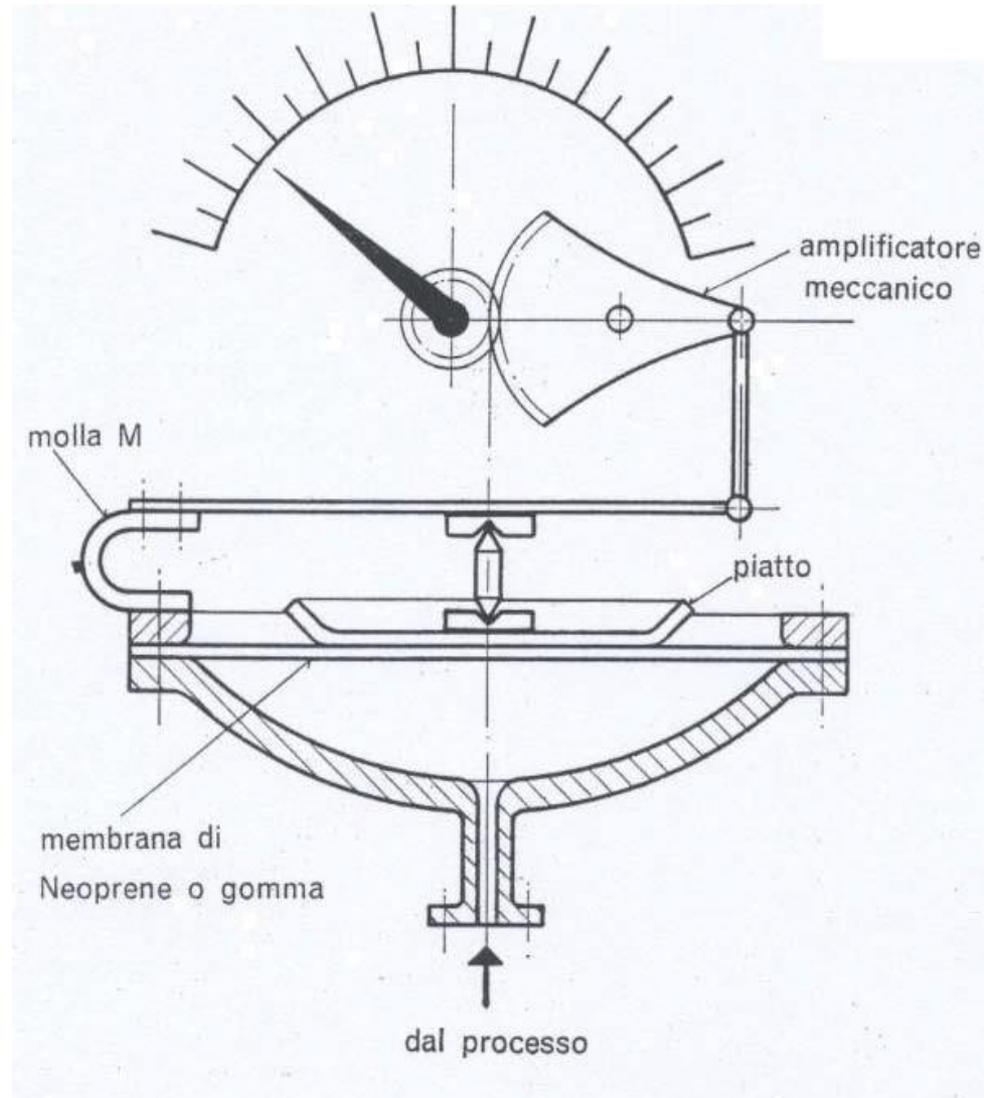
$$P = \rho \cdot g \cdot h$$



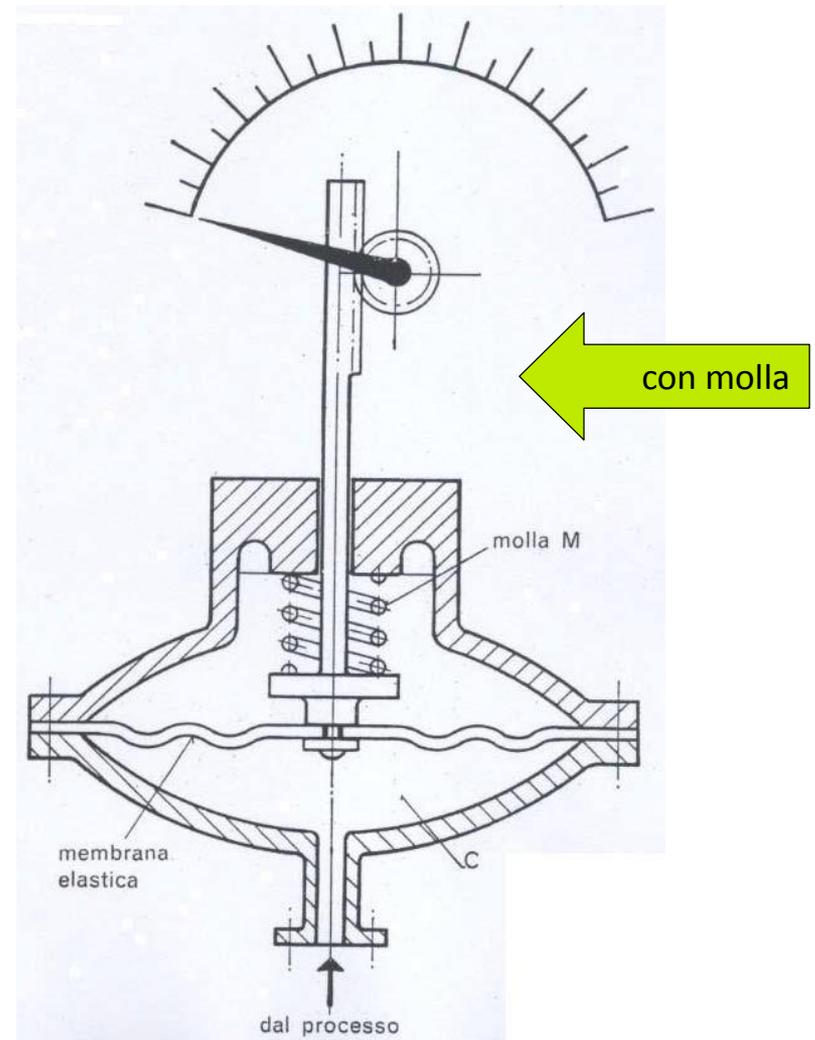
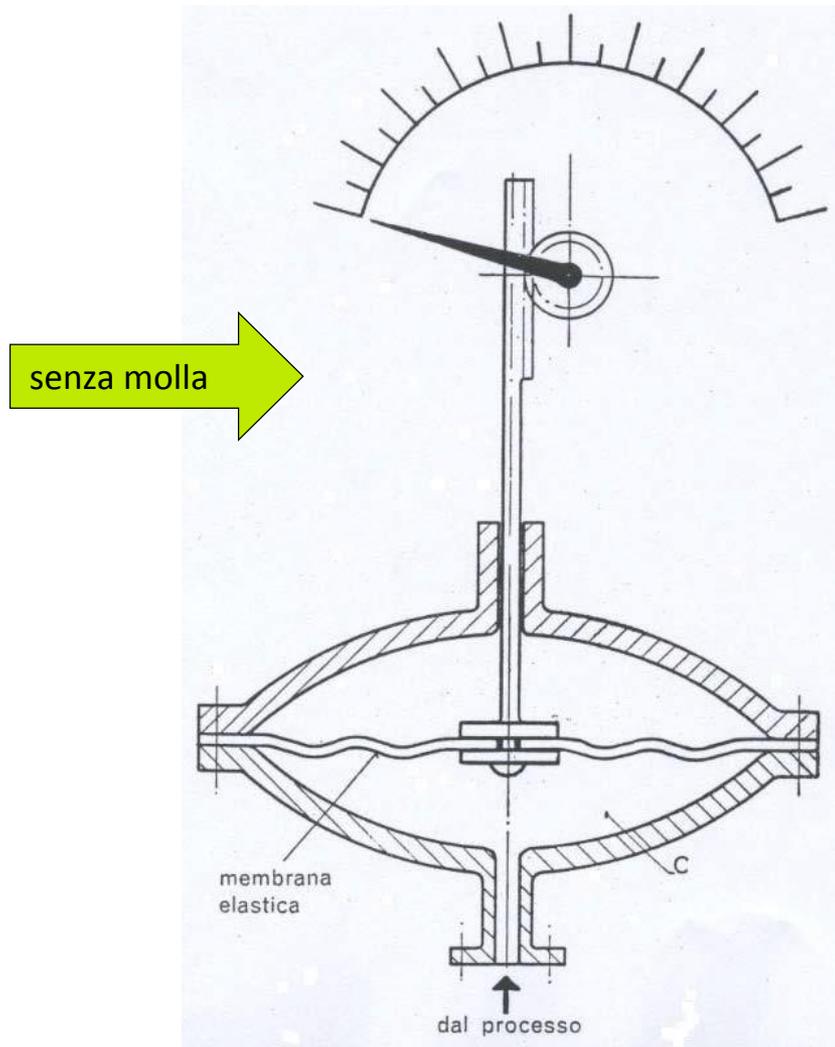
Tipologie di sensori di pressione

| Tipo di sensore | P min [bar] | P max [bar] | Errore min [bar] |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|------------------|
| Manometri con tubo ad U | 1.3 E-4 | 2.0 | 1.3 E-4 |
| Micromanometri ad U con due liquidi (Konig) | 1.3 E-6 | 1.0 E-3 | 1.3 E-6 |
| Micromanometri Askania | 0 | 0.016 | 1.3 E-6 |
| Manometri a campana per gas | 0 | 0.26 | 1.3 E-5 |
| Manometri a bilancia Toroidale per gas | 0 | 0.26 | 1.3 E-4 |
| Manometri a membrana anelastica | 0.046 | 0.1 | 0.05 |
| Manometri a membrana elastica senza molla (Schaffer) | 0.2 | 1 | 0.01 |
| Manometri a membrana elastica con molla (Schaffer) | 0 | 50 | 0.5 |
| Manometri a soffiutto | 0.01 | 7 | 0.01 |
| Manometri a molla Bourdon | 0 | 1500 | 1 % |
| Manometri a molla Bourdon con membrana separatrice e con il liquido intermedio | 0 | 1500 | 1 % |
| Manometri a bulbo | 10 | 3000 | 1 % |
| Manometri a stantuffo | 5 | 3000 | 0.02 % |
| Manometri a variazione di resistenza elettrica | 0.01 | 3000 | 0.1 % |

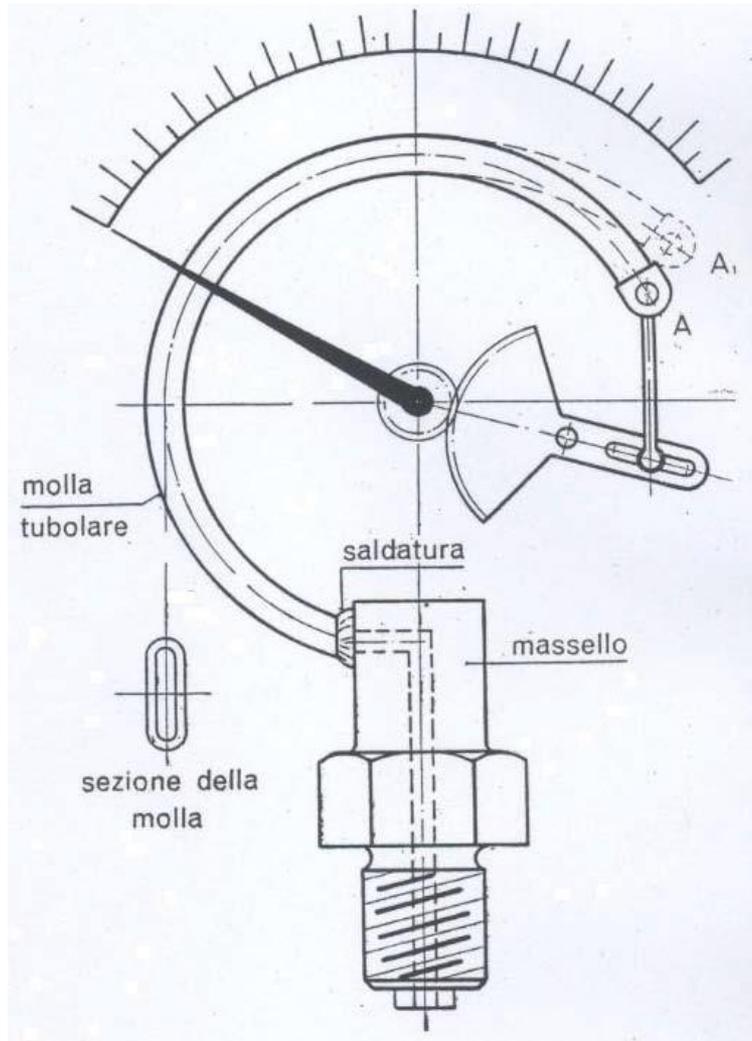
Manometro a membrana anelastica



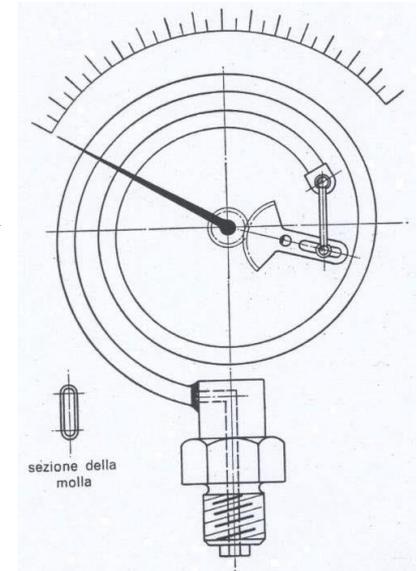
Manometro a membrana elastica



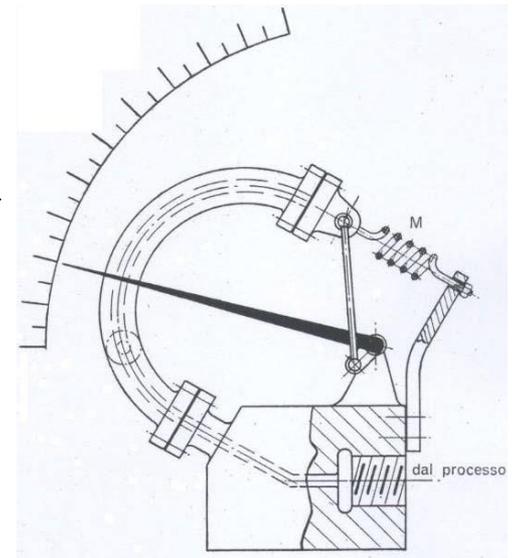
Manometro Bourdon



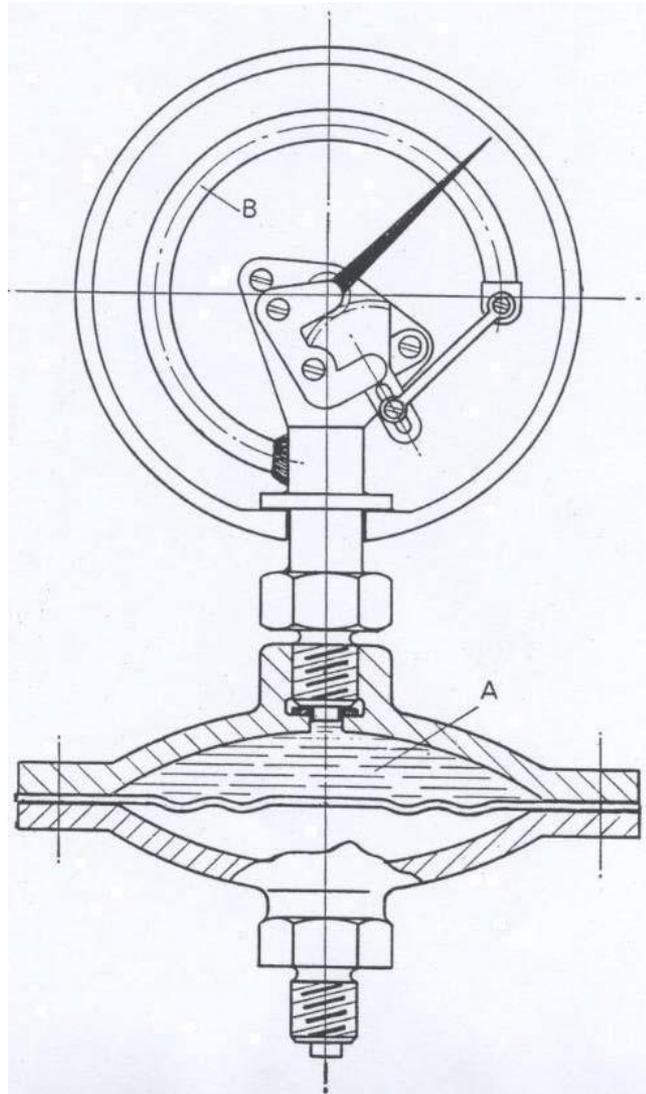
Lungo (più sensibile)



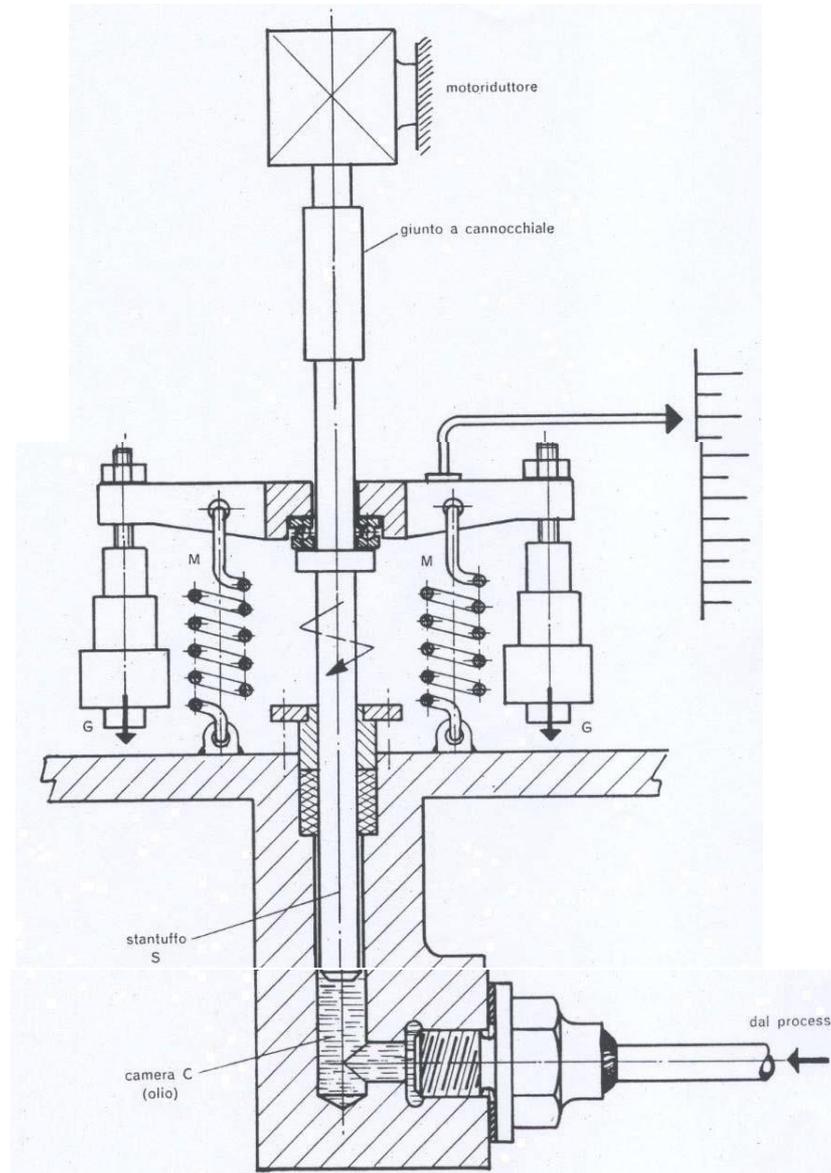
Per alte pressioni



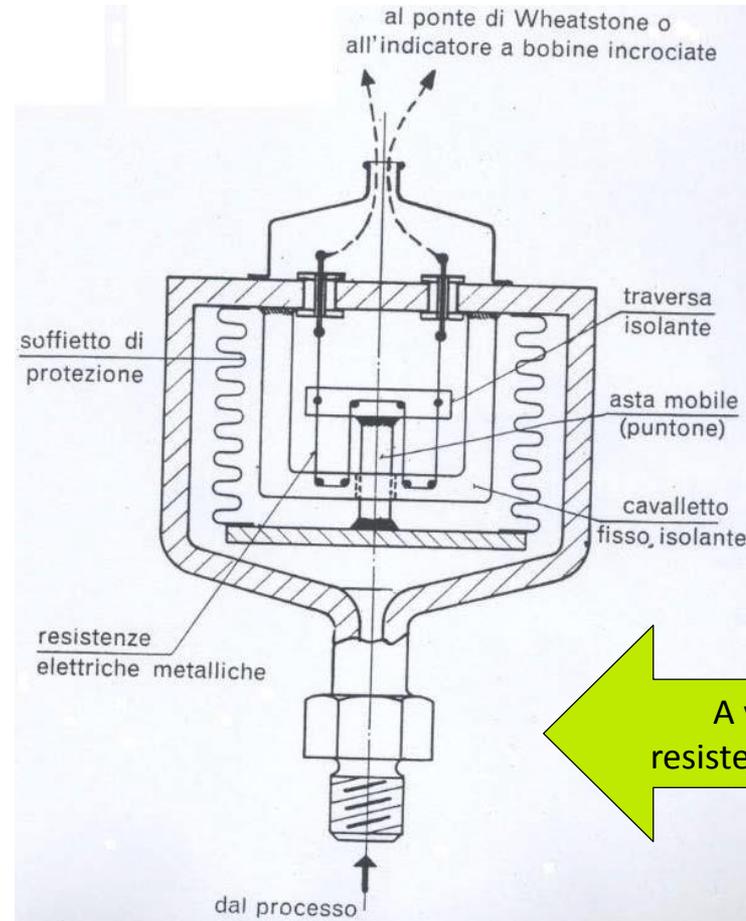
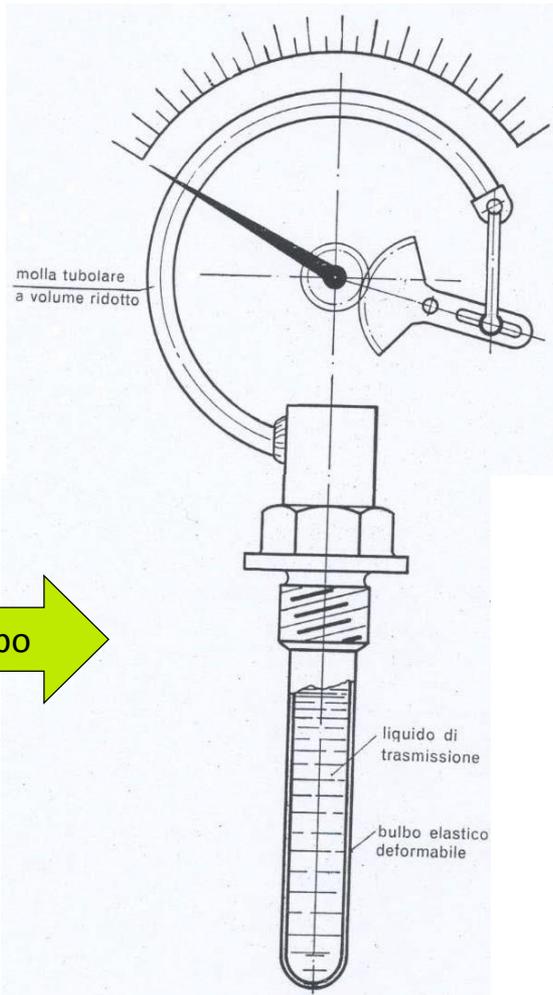
Manometro Bourdon



Manometro a stantuffo



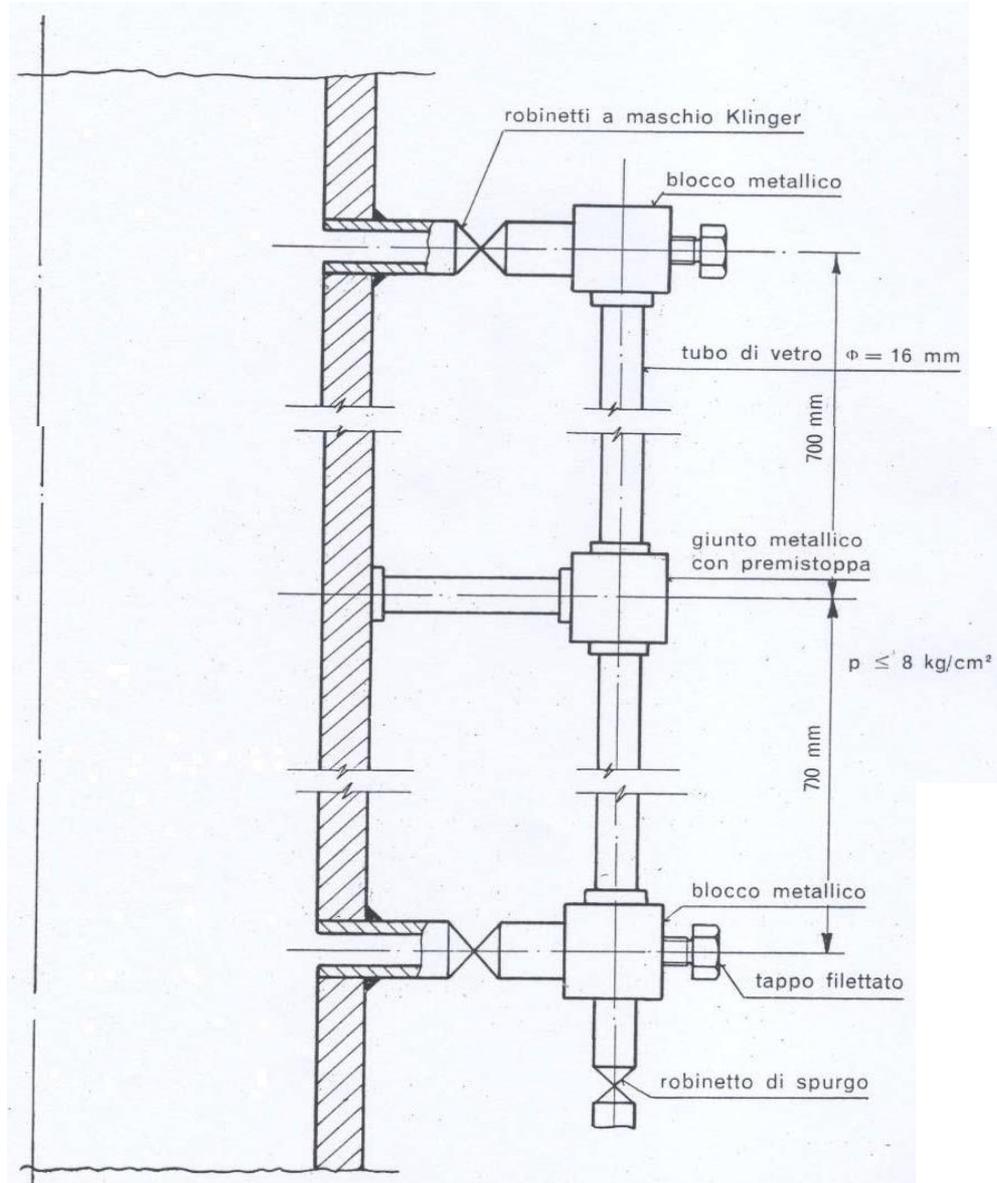
Altri manometri



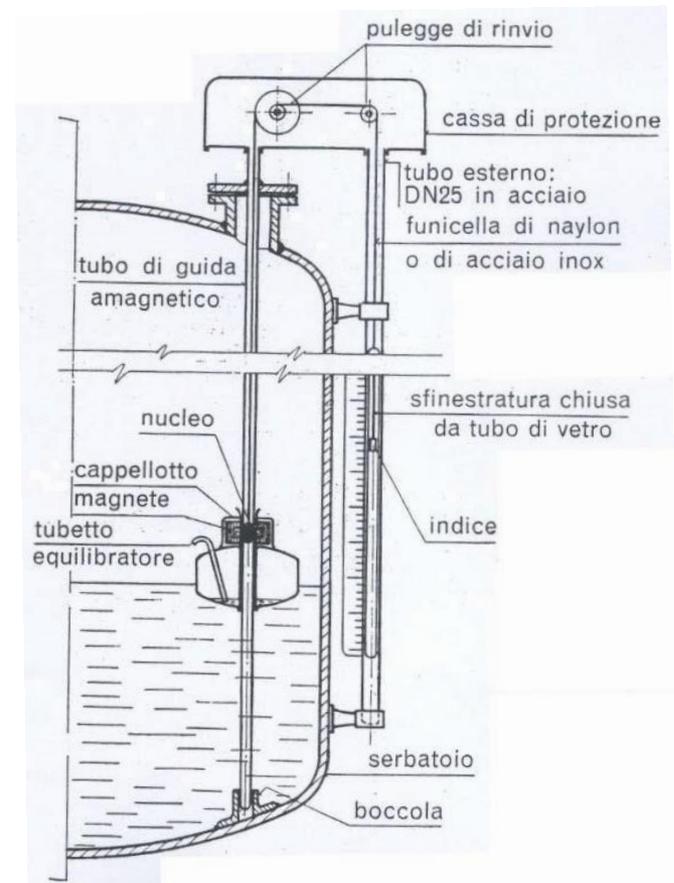
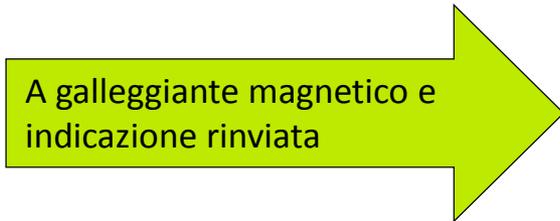
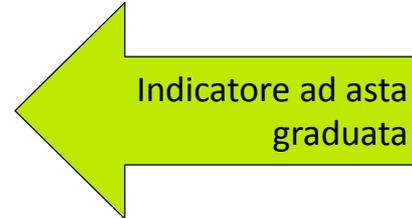
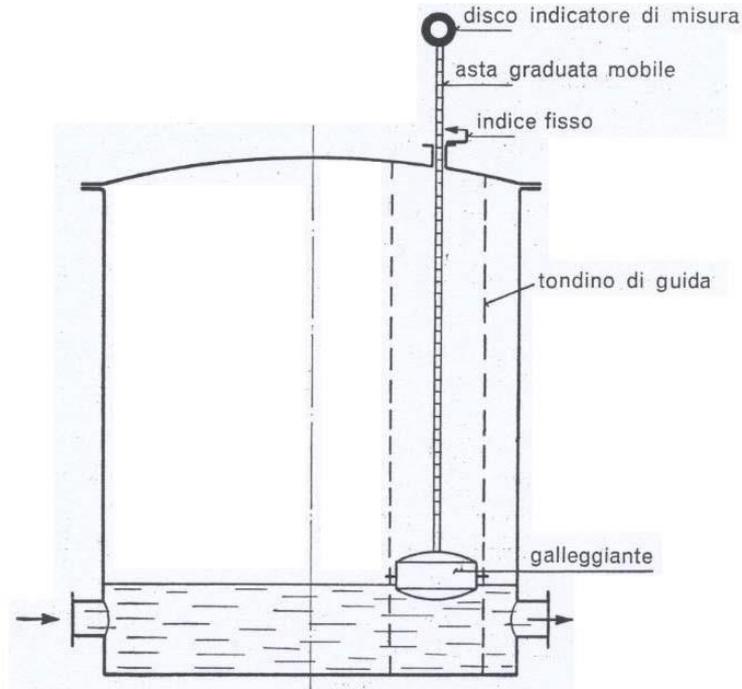
Strumenti di misura di livello



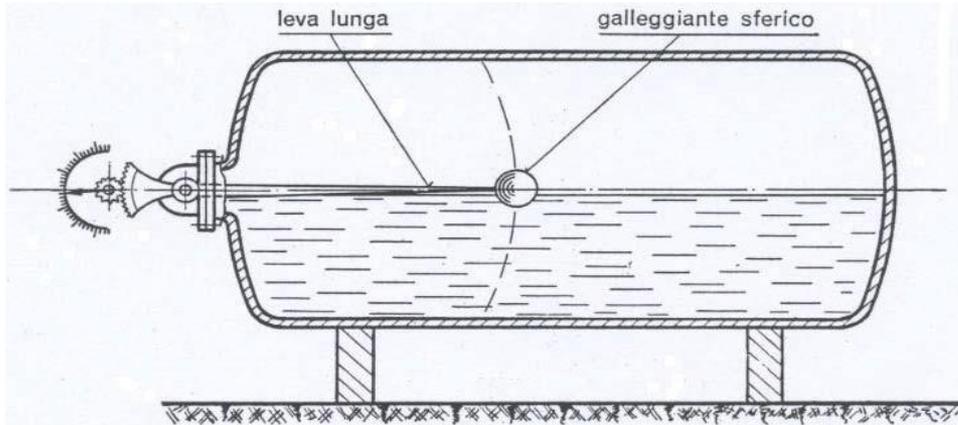
Indicatori/misuratori di livello



Indicatori/misuratori di livello

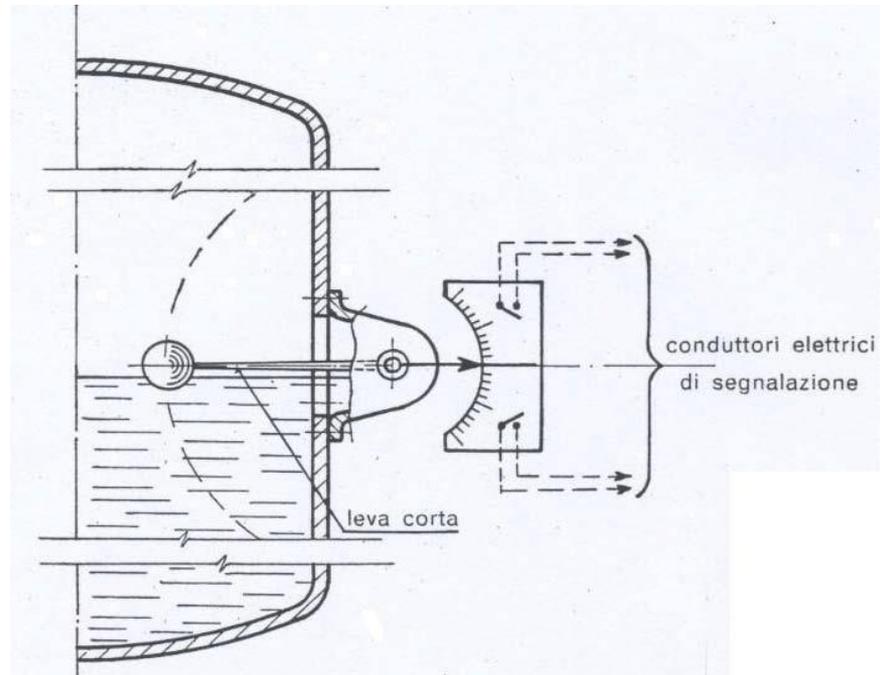


Indicatori/misuratori di livello a galleggiante

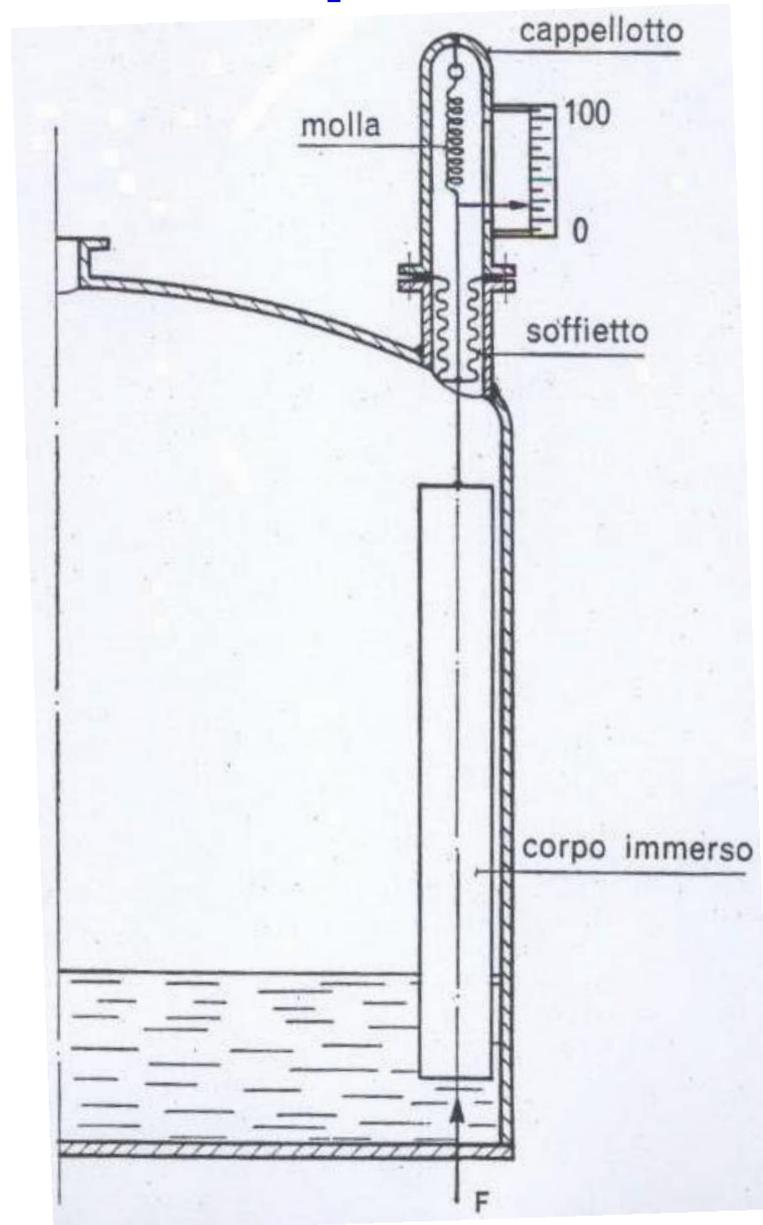


Misuratore di livello a galleggiante a leva lunga

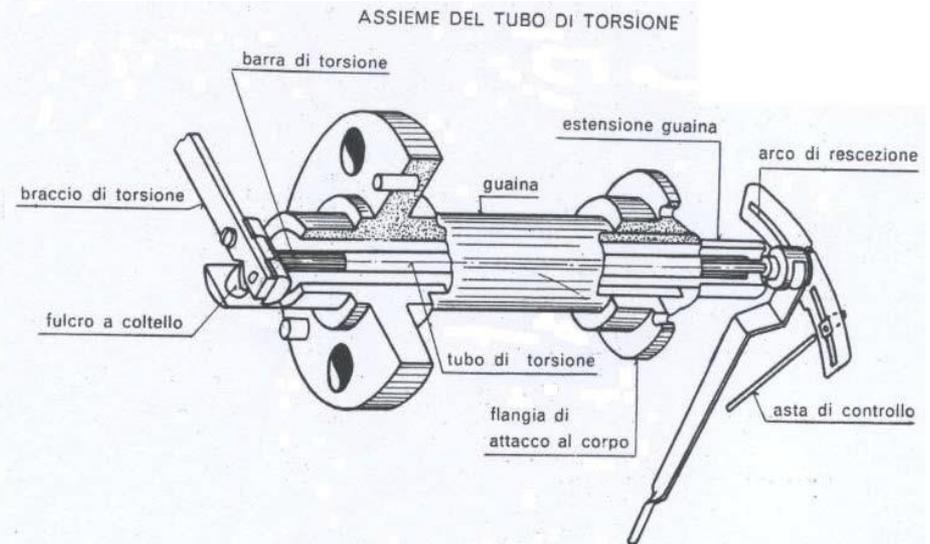
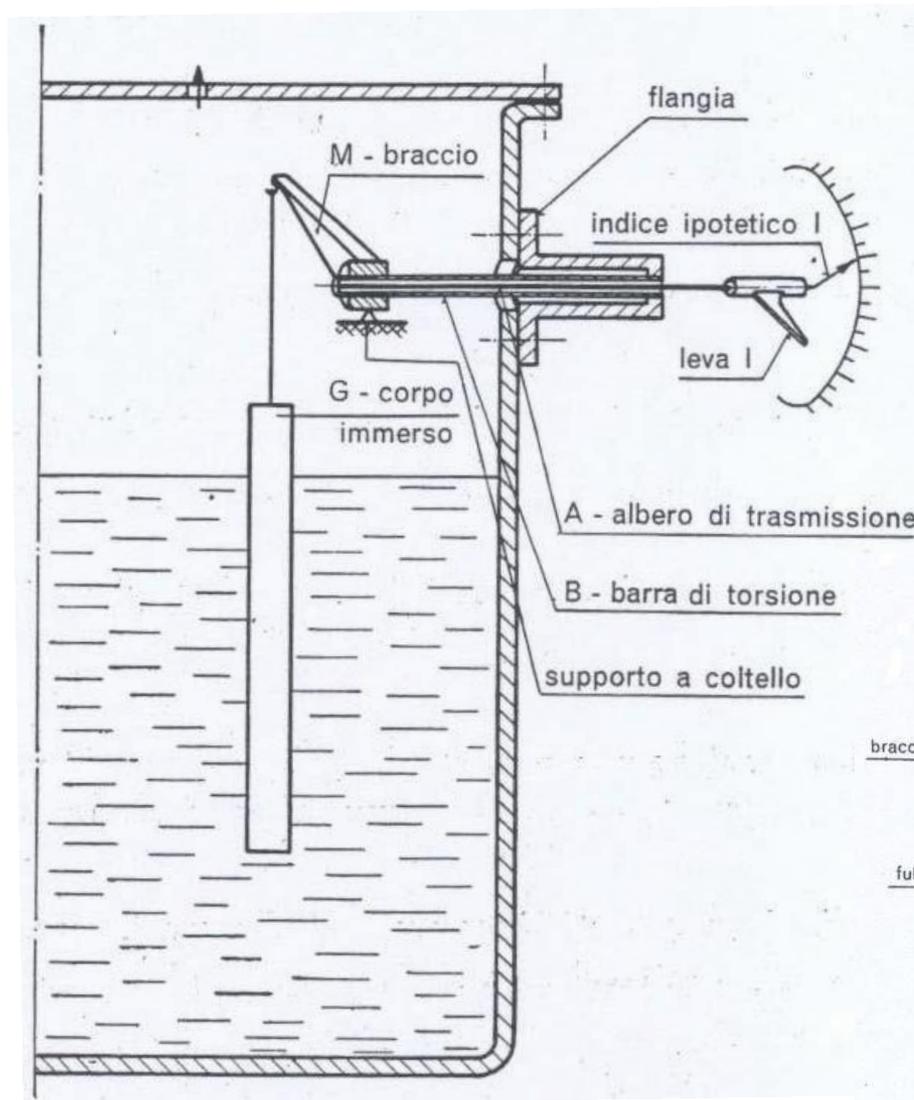
A leva corta con amplificatore



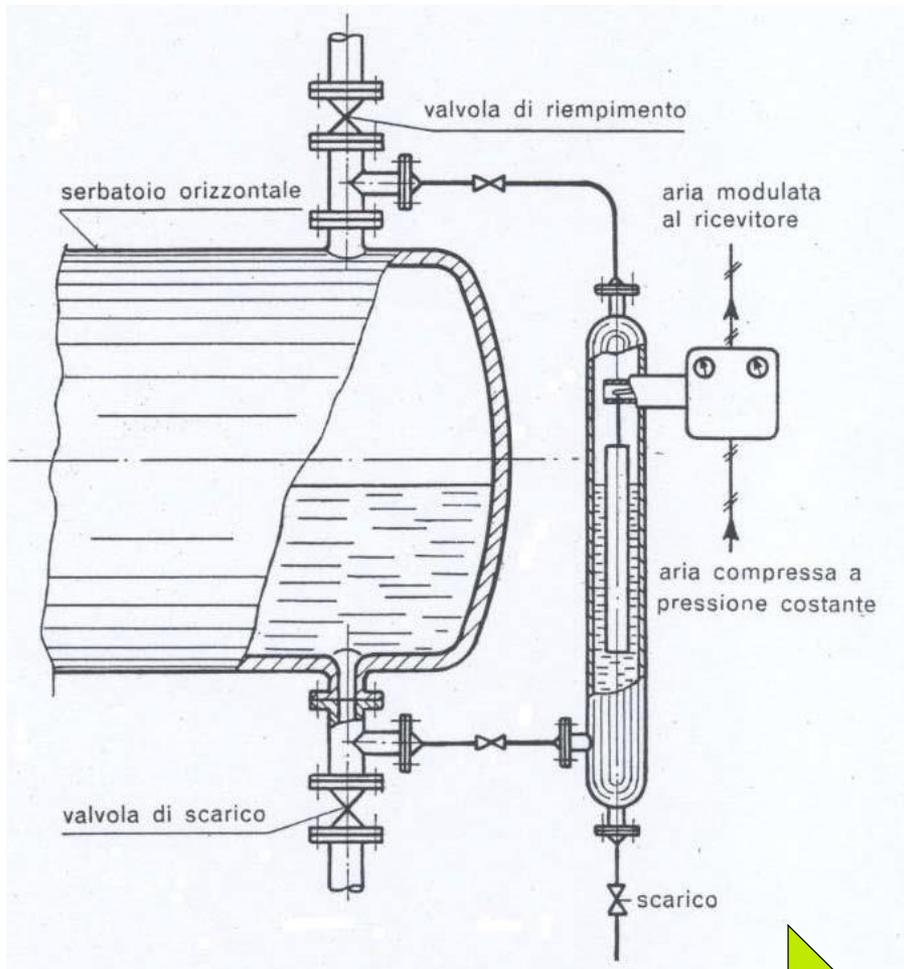
Misura di livello tramite spinta idrostatica



Misura di livello tramite spinta idrostatica

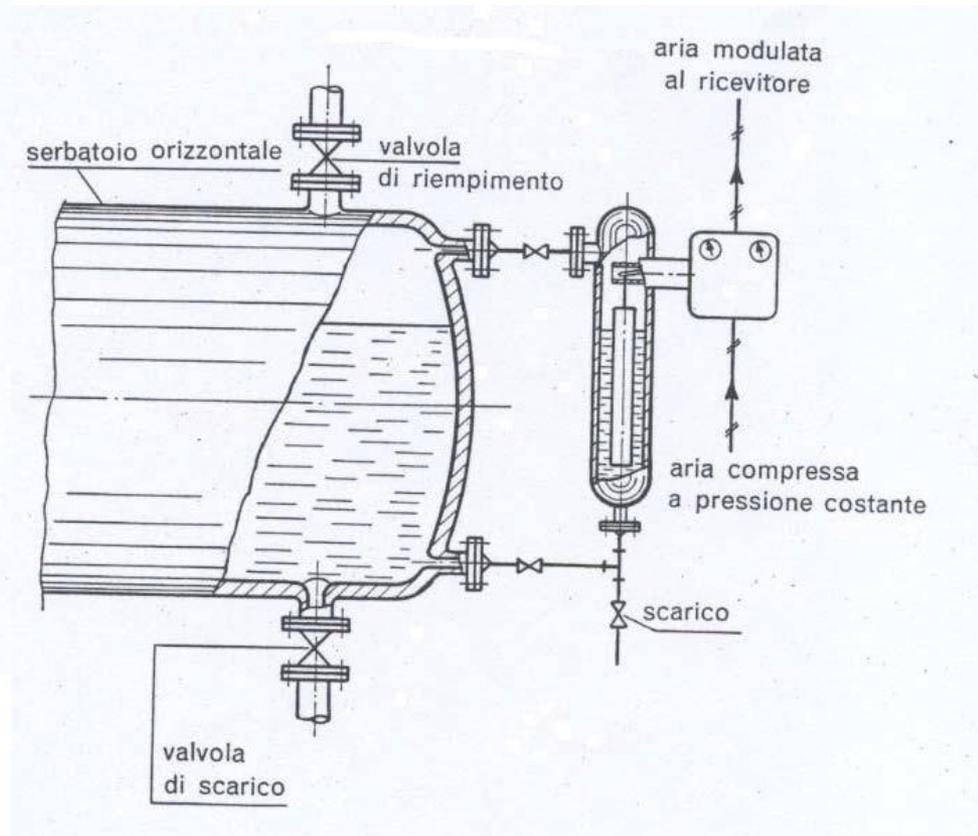


Misura di livello per recipienti ad alta pressione

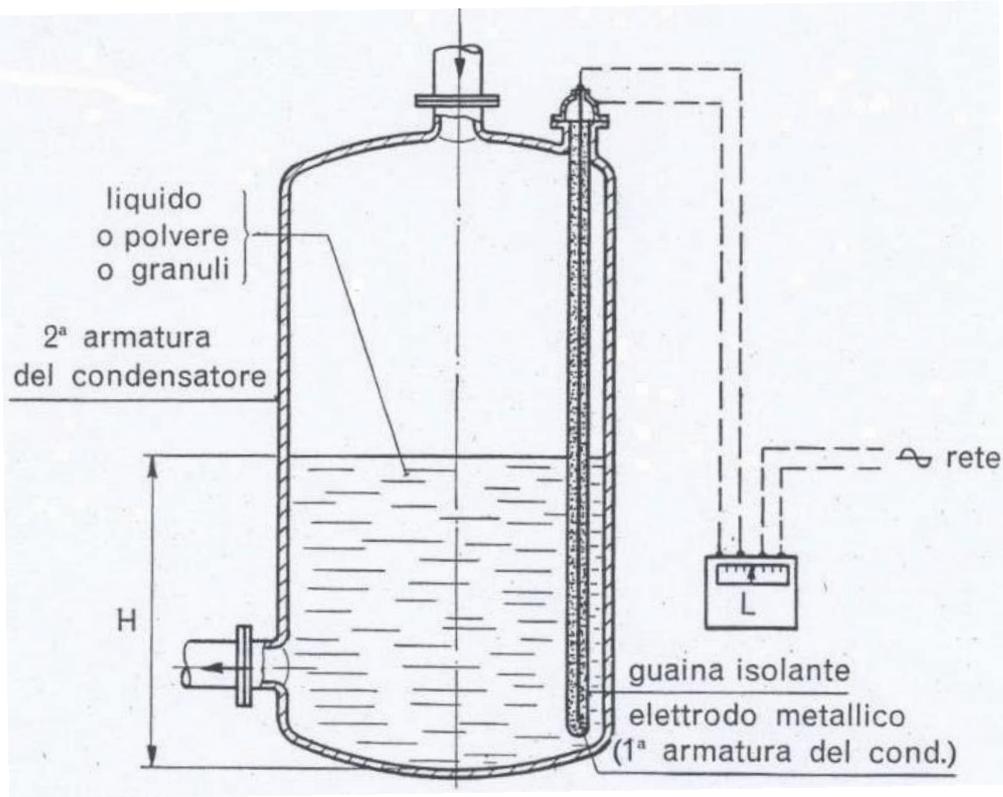


Sistemazione «side-bottom» con pozzetto esterno al serbatoio

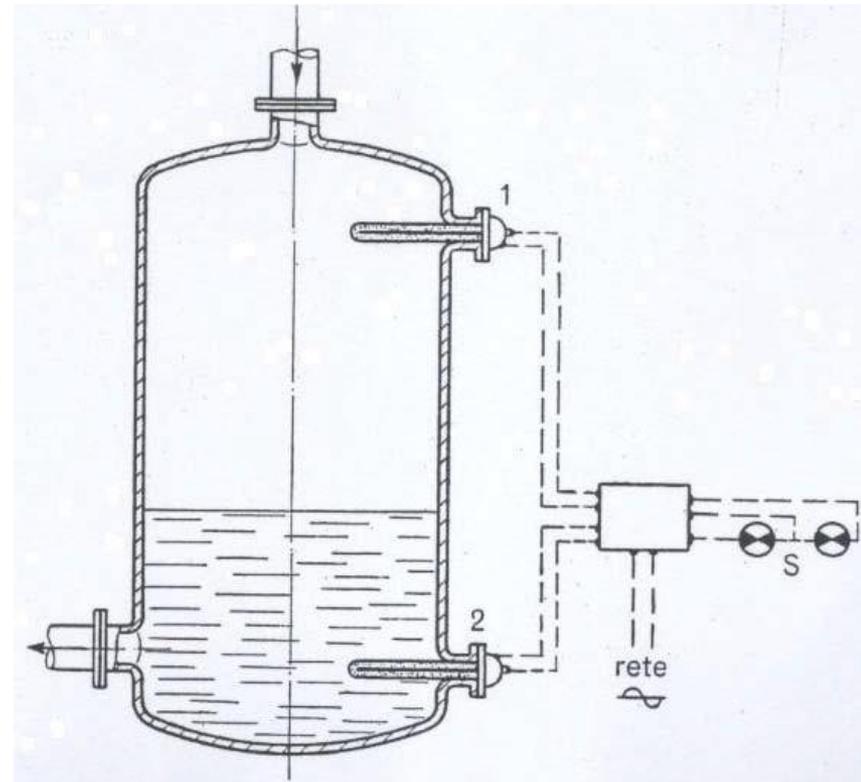
Sistemazione «top-side» con pozzetto esterno al serbatoio



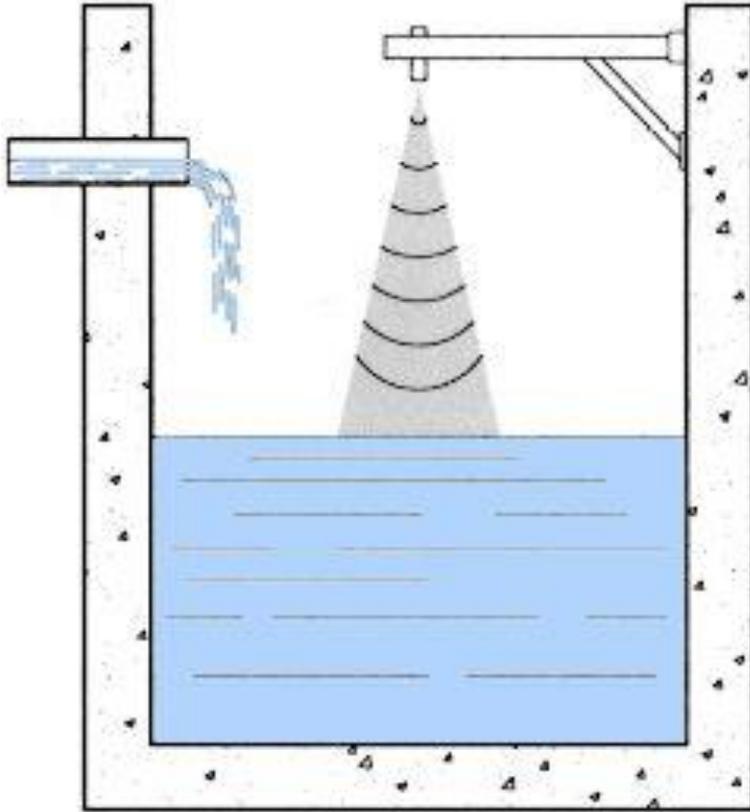
Misura di livello a capacità elettrica



Configurazione tipo
livellostato



Misura di livello a ultrasuoni



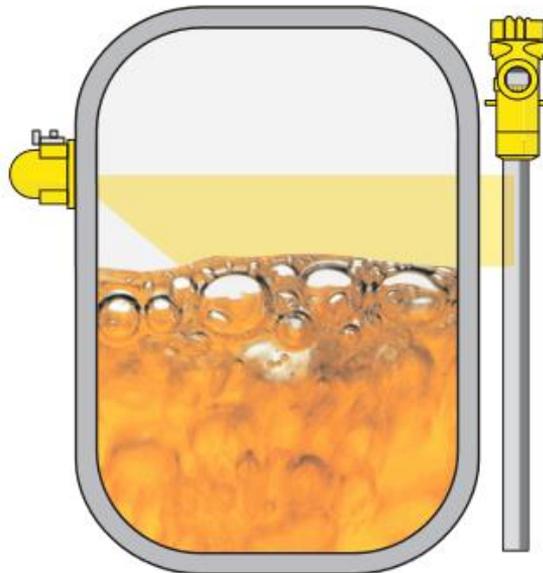
Il sensore misura il tempo intercorrente tra l'**emissione** di un segnale ad ultrasuoni e la successiva **ricezione** del segnale una volta che questi sia stato riflesso dalla superficie del liquido.



Misura di livello tramite raggi gamma

La misura di livello del pelo libero del fluido all'interno di reattori nucleari si basa tipicamente su strumenti a **radiazioni gamma**.

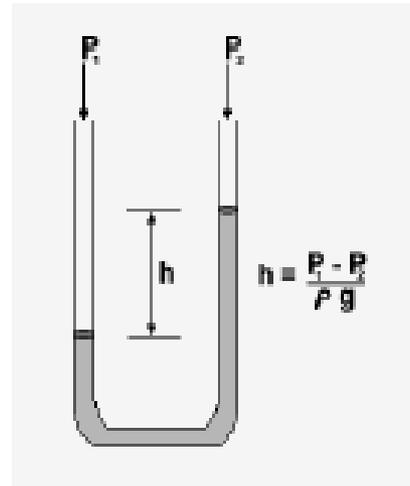
Esternamente al reattore vengono installati un **generatore** di **radiazioni** (tipicamente vengono usati gli isotopi cesio-137 o cobalto-60) ed un **rilevatore**, installato diametralmente opposto alla sorgente di radiazioni. Se il livello di processo aumenta, il fluido all'interno del reattore scherma il rivelatore. Maggiore è la radiazione ricevuta dal rivelatore, più basso è il livello di processo.



Sensori di livello

I sensori veri e propri possono essere divisi in due gruppi:

- Dispositivi basati sulla **misura dell'altezza di una colonna di liquido**: misurano la differenza tra due pressioni, p_1 e p_2 , trasducendola in altezza di colonna di liquido di densità nota.



- Dispositivi basati sulla misura di **deformazione di un elemento elastico**: sono costituiti da un elemento che si deforma proporzionalmente alla pressione e da un dispositivo che trasduce la deformazione in uno spostamento di un indicatore o di un segnale elettrico.

Sensori di livello

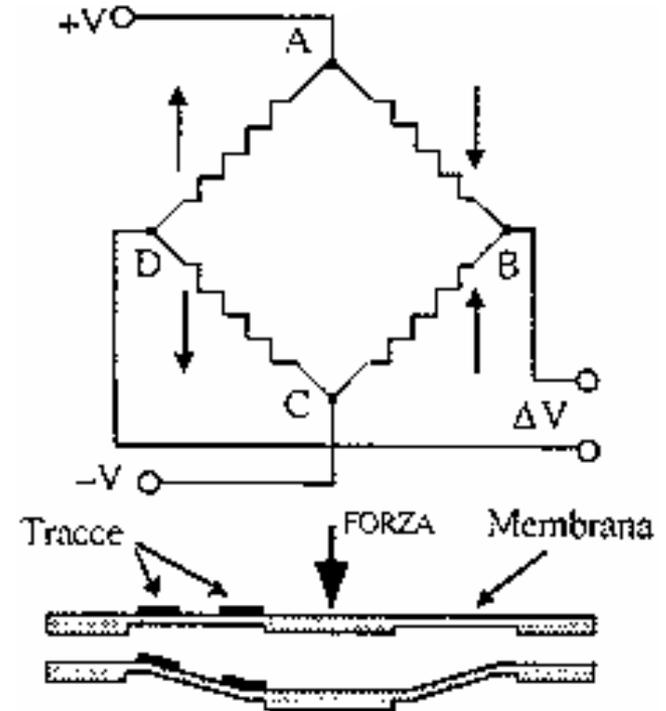
Il fluido che entra nella capsula (che serve a contenere il diaframma) esercita una pressione sul diaframma provocandone deformazione, e quindi variando la distanza d tra due armature di un condensatore e con essa la capacità

$$C = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{d}$$

A = area delle armature

ε_r = costante dielettrica relativa

ε_0 = costante dielettrica nel vuoto

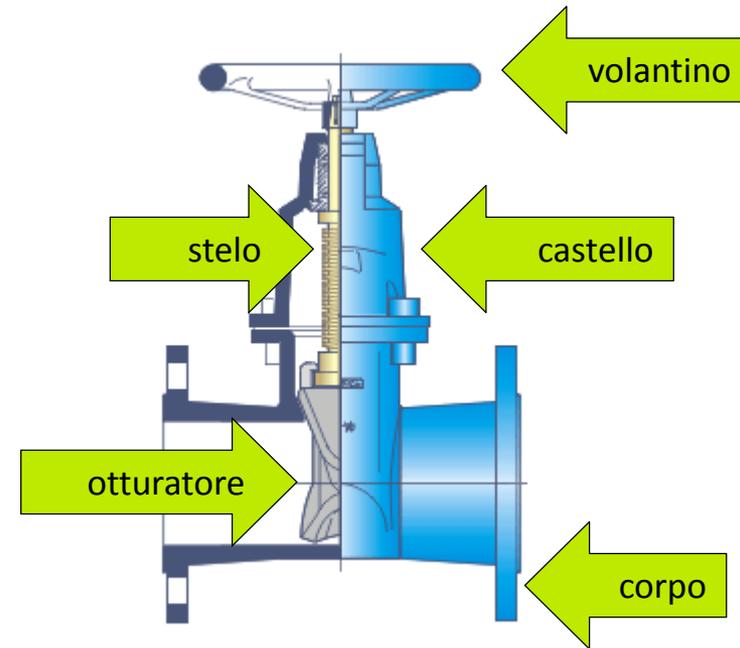


Attuatori



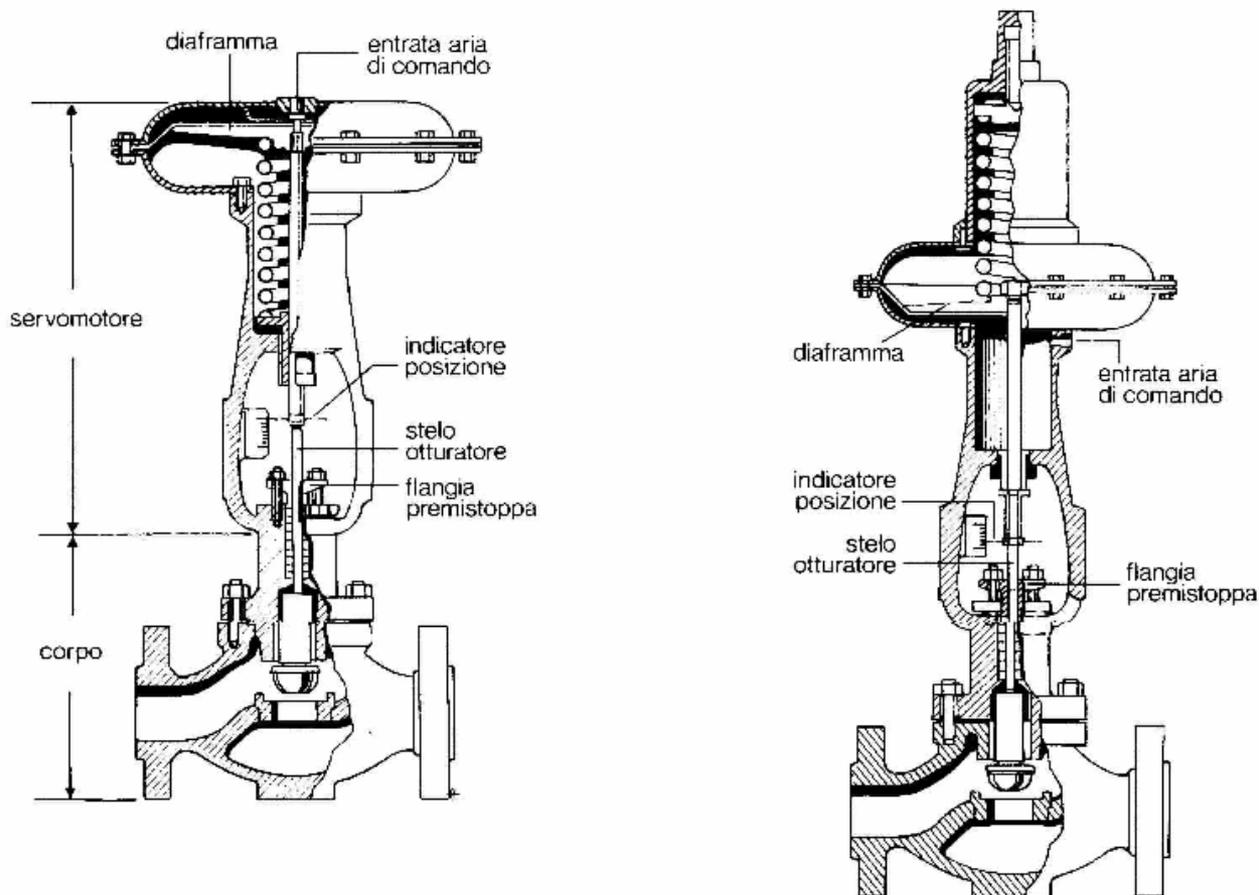
Attuatori – Valvole manuali

Gli attuatori sono organi meccanici atti alla regolazione dei flussi materiali; se presenti in un anello di controllo ricevono input dal controllore ed esercitano un output (*i.e.* apertura/chiusura dell'otturatore) sulla vena fluida da regolare.



Attuatori – Valvole pneumatiche

In una valvola pneumatica lo stelo è comandato attraverso un diaframma ad aria compressa.



Caratteristica della valvola

L'equazione di "comportamento" della valvola definisce la relazione tra l'azione del regolatore Y (percentuale di apertura dell'otturatore) e la portata F che attraversa la valvola.

Nell'ipotesi che il fluido che attraversa la valvola sia un liquido:

$$F = c_v \cdot f(Y) \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}$$

c_v = coefficiente di efflusso

$f(Y)$ = funzione caratteristica della valvola

ΔP = salto di pressione a cavallo della valvola

ρ = densità del liquido



Caratteristica della valvola

Nel caso in cui il fluido non sia liquido, ma gas o vapore, si possono scrivere espressioni analoghe, tipo:

$$F = c_v \cdot f(Y) \cdot K \cdot \sqrt{\frac{P_2}{\rho}}$$

P_2 = pressione del fluido in ingresso

$$K = K(P_2/P_1, n)$$

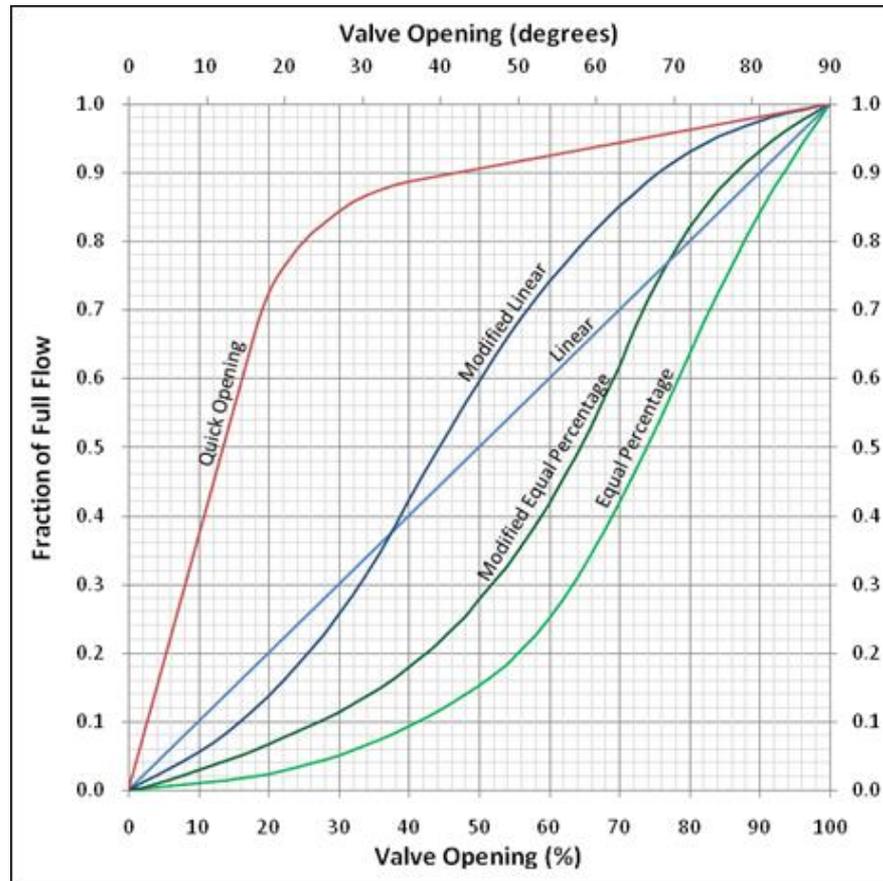
n = esponente della politropica



Caratteristica della valvola

Le diverse curve caratteristiche corrispondono ad altrettante tipologie fisiche del dispositivo di regolazione di portata.

Le curve caratteristiche riportate valgono a $\Delta P = \text{costante}$ a cavallo della valvola.

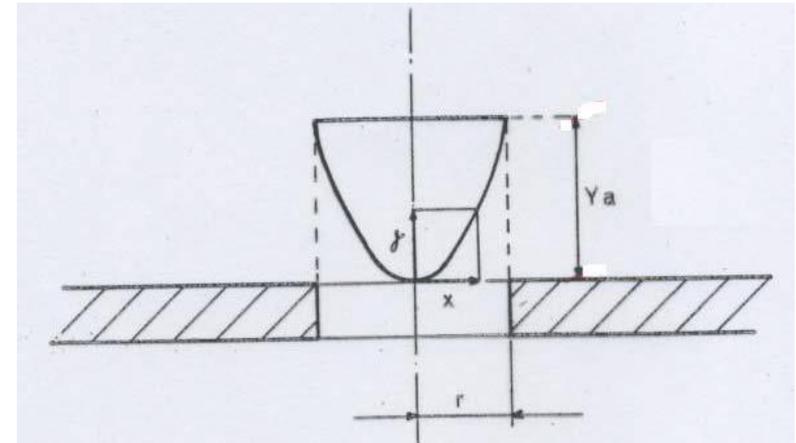
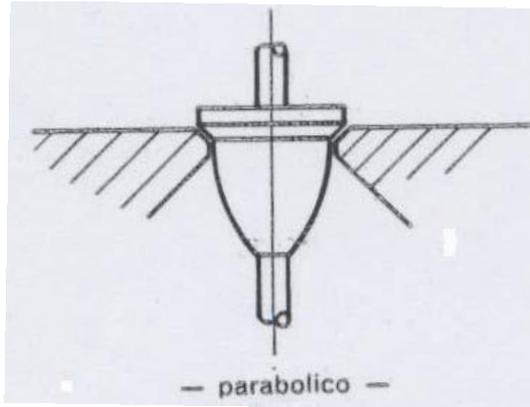


Caratteristica della valvola

- **Valvole a caratteristica lineare ($C_V \cdot f(Y) = Y$):** operano bene quando si può imporre un'elevata perdita di carico concentrata sulla valvola ($\sim 40\%$ ΔP prodotto lungo la linea di distribuzione).
- **Valvola a caratteristica quadrata ($C_V \cdot f(Y) = \sqrt{Y}$):** per piccoli valori della Y si raggiungono alti valori di f . Tali valvole servono per regolazioni ad apertura rapida.
- **Valvola a percentuale costante o a caratteristica esponenziale ($C_V \cdot f(Y) = e^{\beta Y}$):** per uguali spostamenti dello stelo si hanno variazioni percentuali costanti della portata. A uguale spostamento dello stelo la variazione di f è proporzionale al valore stesso di f . Queste valvole sono utilizzate in linee dove esiste già un'altra forte perdita di carico concentrata (e.g., linea con scambiatori).

$$\frac{\Delta F}{F} = \beta \cdot \Delta Y$$

Otturatori



Area di passaggio

$$A = \pi(r^2 - x^2) = A_{MAX} \left(1 - \frac{x^2}{r^2}\right) = A_{MAX} \left(1 - \frac{y}{y_A}\right)$$

Paraboloide di rivoluzione

$$\begin{cases} y = k \cdot x^2 \\ y_A = k \cdot r^2 \end{cases} \Rightarrow \frac{y}{y_A} = \frac{x^2}{r^2}$$

L'area di passaggio è funzione lineare della corsa dell'otturatore.

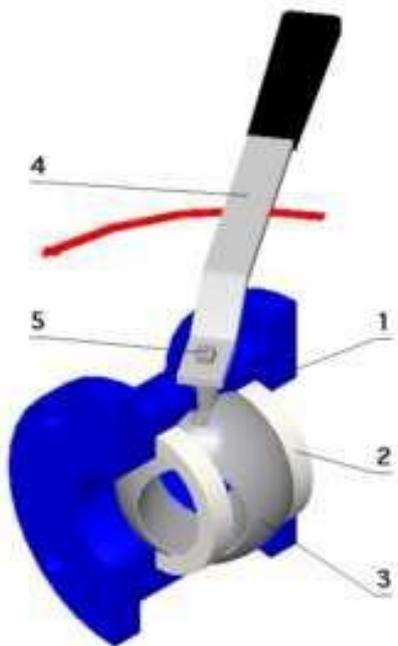
Se $\Delta P \cong$ costante, la portata fluente dipende dall'area di passaggio, quindi dalla corsa dello stelo dell'otturatore

$$\begin{cases} y = 0 \\ A = A_{MAX} \end{cases} \quad \begin{cases} y = y_A \\ A = 0 \end{cases}$$

Valvole a maschio (con otturatore)



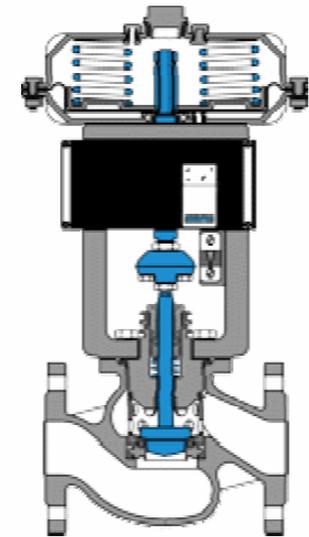
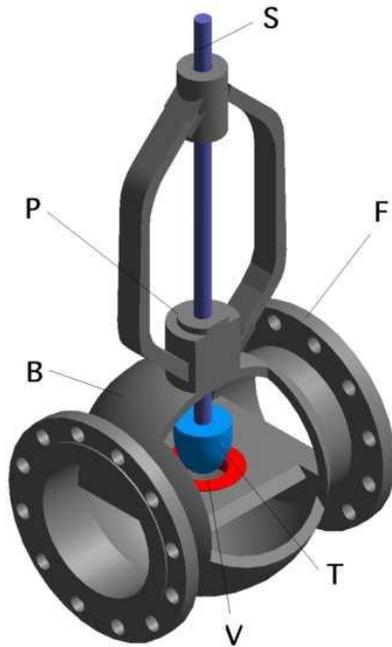
Valvole a sfera



1. Corpo valvola
2. Anelli di tenuta
3. Otturatore a sfera
4. Asta di manovra a maniglia
5. Asta di comando della sfera



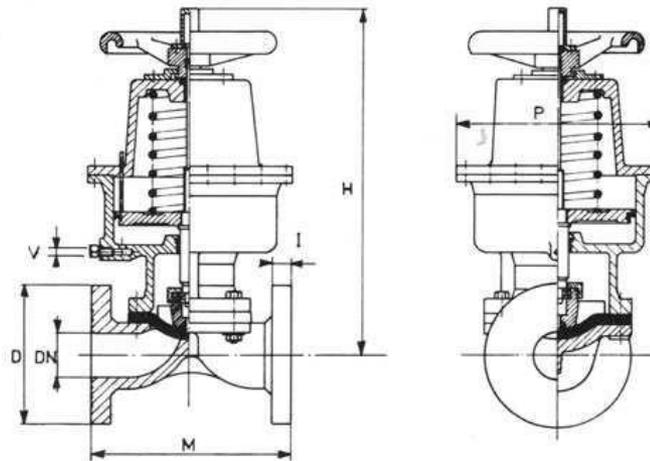
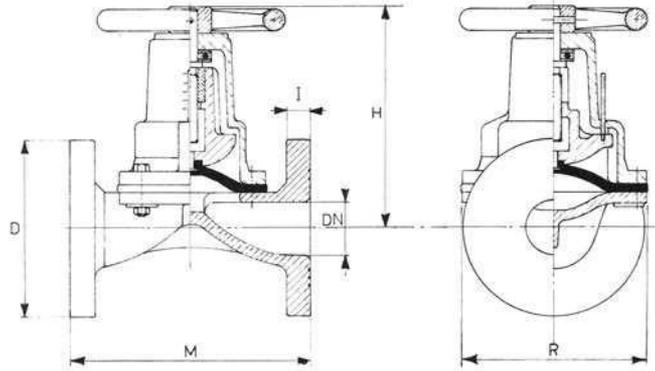
Valvole a disco (otturatore a disco)



- **Corpo valvola B:** costituisce la struttura portante della valvola
- **Premistoppa P:** isola il processo dall'ambiente tramite opportune tenute
- **Stelo S:** costituisce l'equipaggio mobile, il cui movimento regola la distanza tra l'otturatore e la sede
- **Otturatore T** di tipo a globo
- **Sede V** con organo di tenuta per l'otturatore
- **Attuatore** (non mostrato, all'estremità superiore dello stelo)
- **Flangia F**



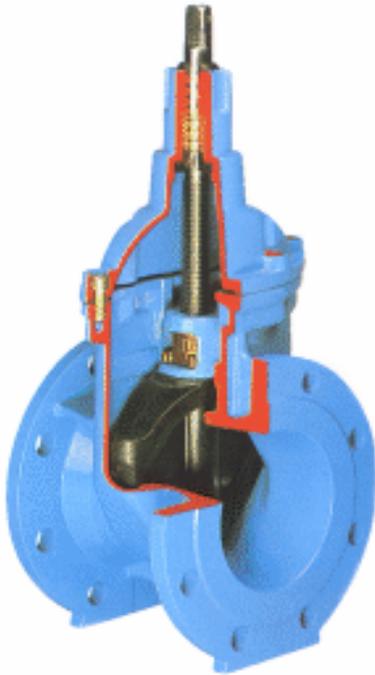
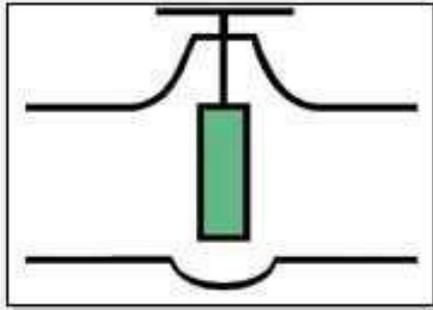
Valvole a membrana



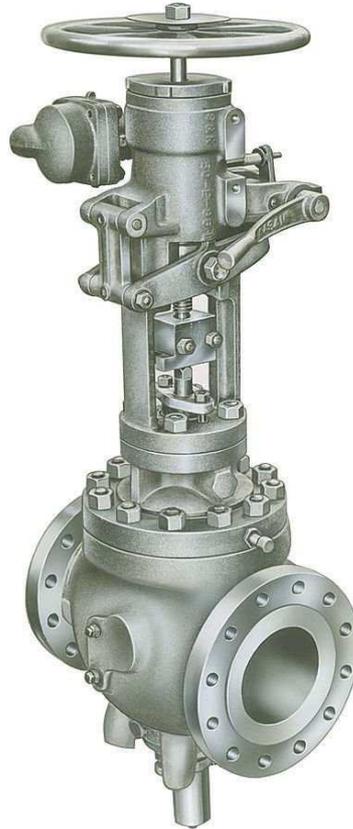
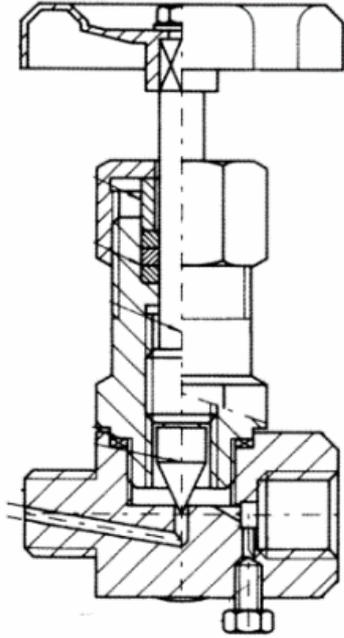
Valvole a farfalla



Valvole a saracinesca



Valvole a spillo



Valvole di processo

