



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE

Misure di Pressione

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 dei principali strumenti per la misura della pressione nelle seguenti categorie:
 - Pressione statica (manometri, trasduttori a deformazione elastica, trasduttori di pressione elettrici)
 - Pressione nei fluidi in movimento
 - Cenni sulla misura del vuoto

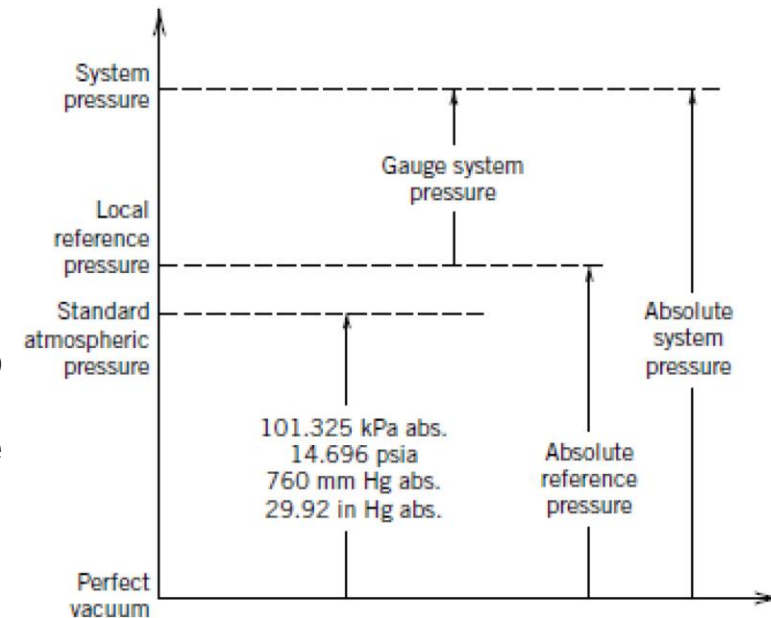
Introduzione

La pressione è definita come il rapporto tra la **forza agente su una superficie** e l'area della stessa, è quindi data dal rapporto tra grandezze derivate da massa, lunghezza e tempo

$$P = \frac{F_{\perp}}{S} \text{ (Pa)}$$

Si definiscono tre tipi di misure di pressione

- **Pressione assoluta:** la misura è riferita rispetto al vuoto. Mentre il vuoto rappresenta un concetto ideale, il punto di riferimento è sperimentalmente adottato rispetto a condizioni di alto vuoto.
- **Pressione relativa (gauge pressure):** la pressione è rilevata rispetto a quella ambientale ($P_r = P - P_{\text{amb}}$).
- **Pressione differenziale:** pressione misurata tra due punti di misura arbitrari.



Unità di misura della pressione

L'unità di misura della pressione nel sistema internazionale è il *Pascal*:

$$1 \text{ Pa} = \frac{1 \text{ N}}{\text{m}^2}$$

Nel sistema CGS si può invece trovare il *baria* (dina/cm² – la dina è l'unità di misura della forza). Altre unità di misura sono:

Il *bar* (10⁵ Pa), del quale sono diffusi i sottomultipli quali il millibar (meteorologia) o il microbar (acustica)

Il *Torr* (9.81 Pa), ovvero la pressione esercitata da una colonna di mercurio alta 1 mm

L'*atmosfera* (atm), unità di misura obsoleta rimasta nel linguaggio comune, corrisponde alla pressione esercitata dall'atmosfera terrestre a livello del mare (1 atm = 101325 Pa = 760 Torr = 760 mm_{Hg})

Misure di pressione statica

Categorie di strumenti

Manometri

Misura di carattere differenziale – Una forza non nota dovuta alla pressione viene comparata con la forza di gravità

Trasduttori a deformazione elastica

L'elemento sensibile è caratterizzato da un elemento solido, tipicamente metallico

Trasduttori di pressione elettrici

La variazione di pressione viene codificata in una variazione di un parametro elettrico

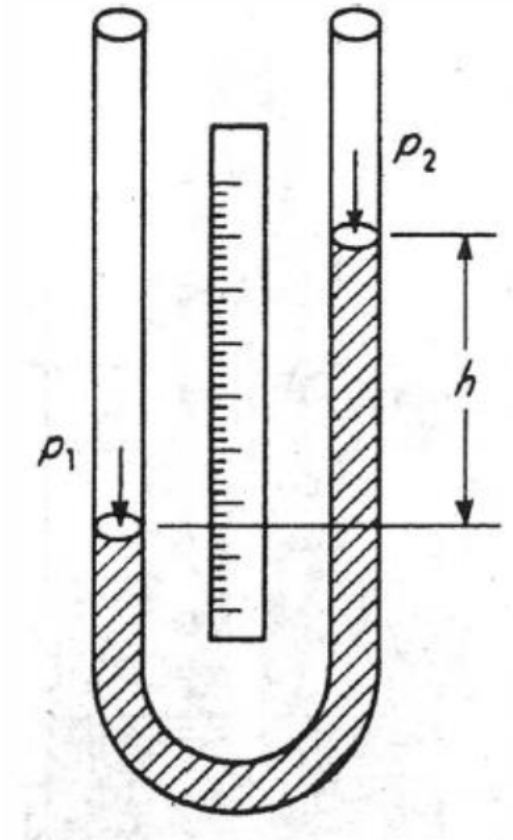
Misure di pressione statica - Manometri

Manometro differenziale

Il manometro a colonna di liquido, come la sonda a pesi diretti, basa il suo funzionamento sul confronto di una forza non nota con la forza di gravità esercitata su una massa nota. Si impiega per la misura di piccole differenze di pressione e la forza agente su una delle due superfici di pelo libero di un fluido contenuto in un condotto a forma di "U", provoca una variazione della distanza tra i due peli liberi del liquido. Dal principio di Bernoulli:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = h\rho g$$

La misura non dipende dalla dimensione della sezione trasversale dello strumento di misura.

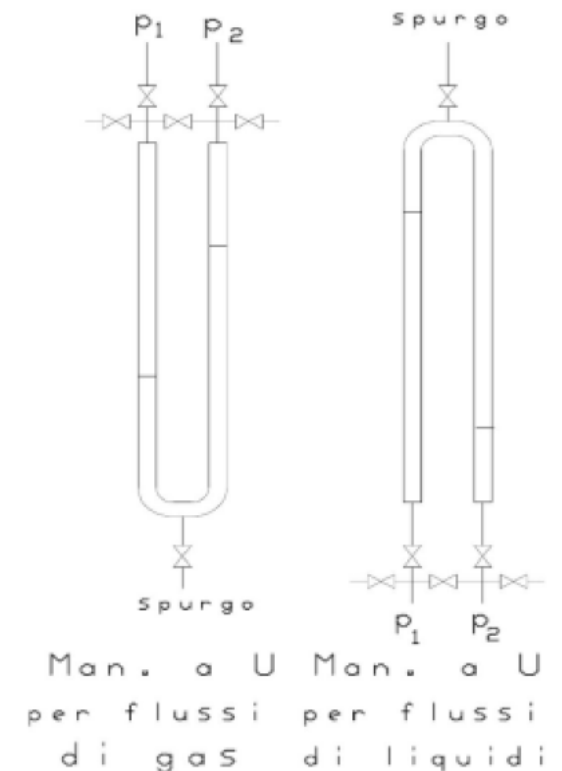


Manometro differenziale

Il manometro differenziale può essere usato sia per misure di liquidi che di gas. Il mercurio (fluido comunemente usato in passato) è stato successivamente sostituito da acqua o da alcool. A fronte della tossicità, il mercurio permetteva di operare in un campo di misure un ordine di grandezza superiore rispetto a quello dell'acqua ($\rho_{Hg}/\rho_{H_2O} = 13.5$), che permette di operare da circa 100 a 20000 Pa.

Fonti di errore per questo strumento sono date da:

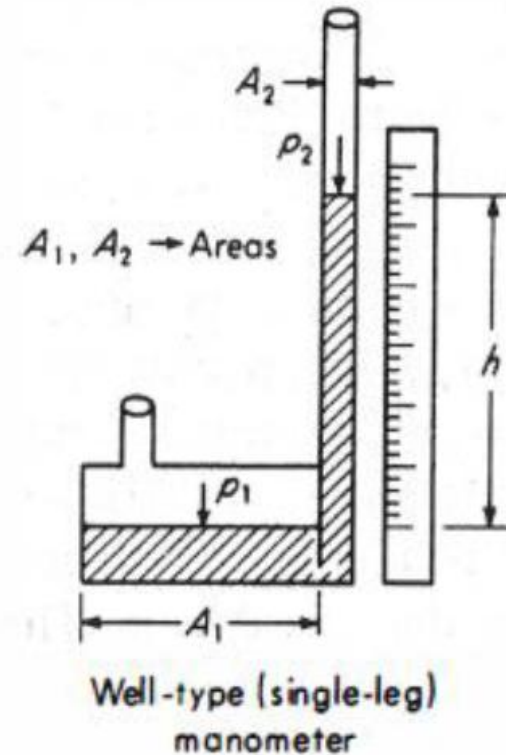
- Variazioni di densità del fluido manometrico o alla scala di misura legate alla variazione di temperatura
- Non perfetta verticalità dei tubi
- Difficoltà di lettura dovuta alla formazione del menisco



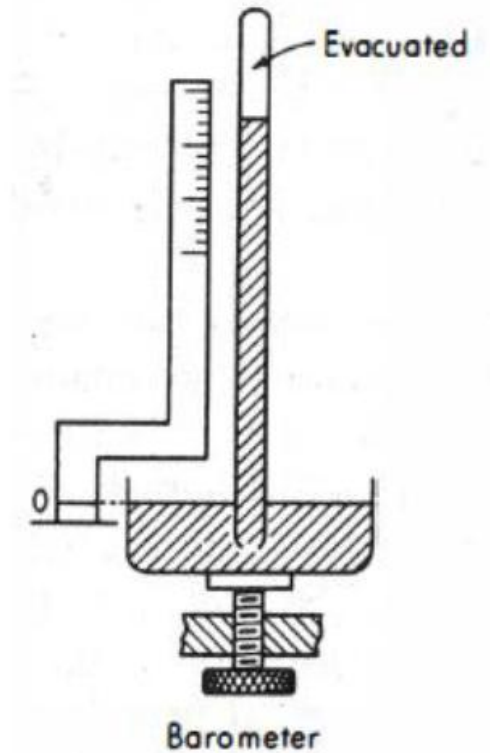
Manometro a pozzetto

Il loro impiego è dovuto alla sua semplicità d'uso e al fatto che si richiede la lettura di un solo dato.

L'area della sezione del pozzetto è ampio a confronto con quella del tubo; in questo modo lo spostamento del livello di zero è trascurabile rispetto a quando viene applicata la pressione; tale errore si può poi compensare tarando opportunamente la scala ed apportando opportune distorsioni



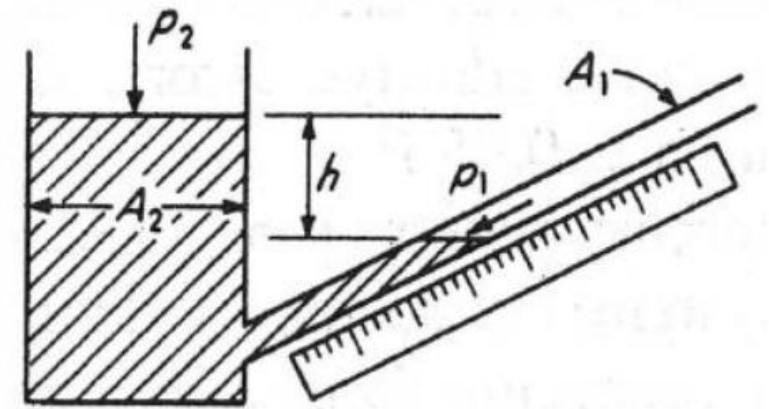
$$h = \frac{\Delta p}{\rho g}$$



Manometro a tubo inclinato

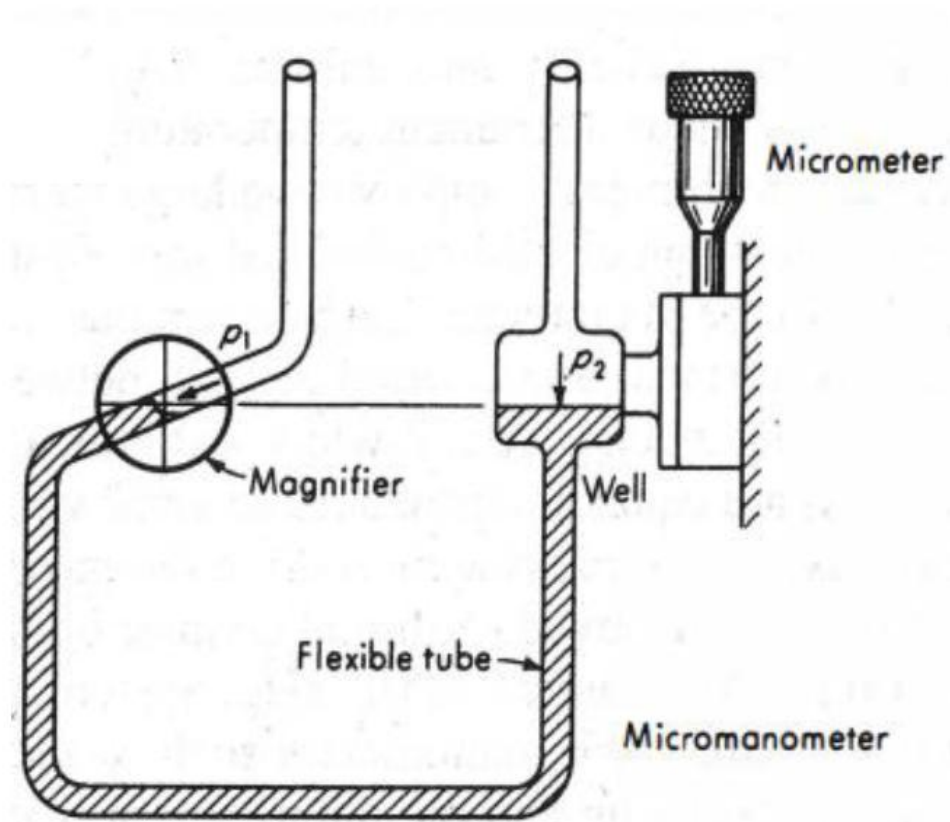
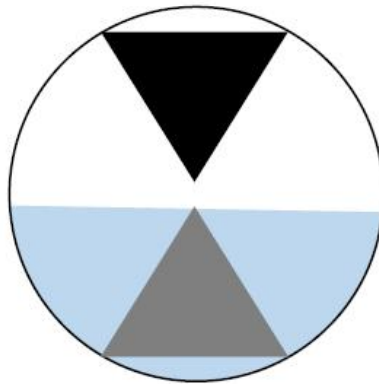
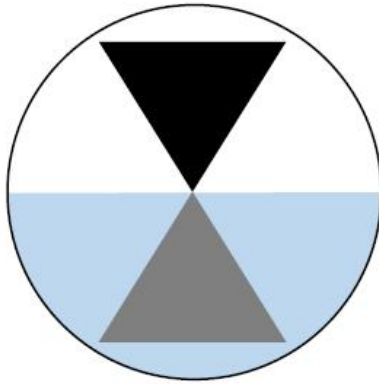
Il manometro a tubo inclinato permette di aumentare la sensibilità dello strumento di misura; il ramo dove si esegue la lettura è inclinato rispetto alla verticale, e di conseguenza produce un maggior spostamento del fluido manometrico a parità di variazione di quota nella direzione verticale.

$$\frac{\Delta p}{\rho g} = h = l \sin \theta$$

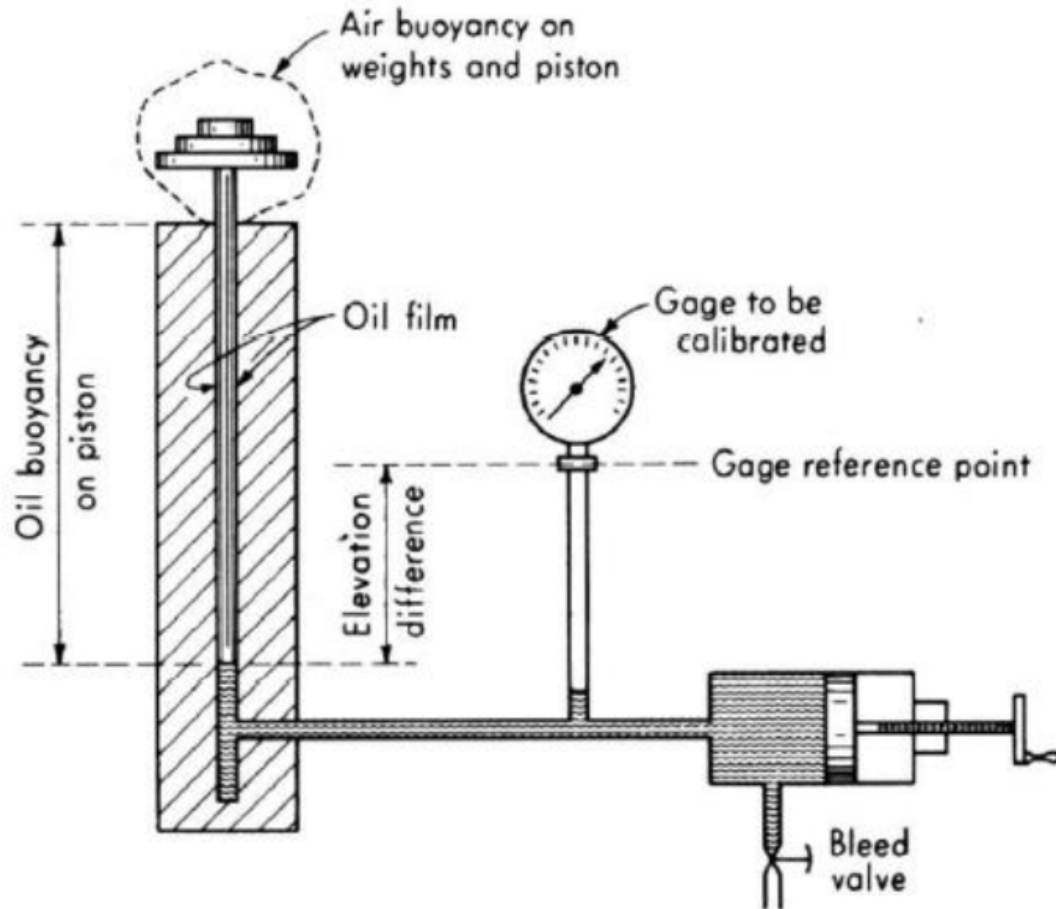


Inclined manometer

Micro-manometri differenziali



Banco di taratura manometri



Impiegata principalmente per operazioni di taratura di sistemi meno accurati.

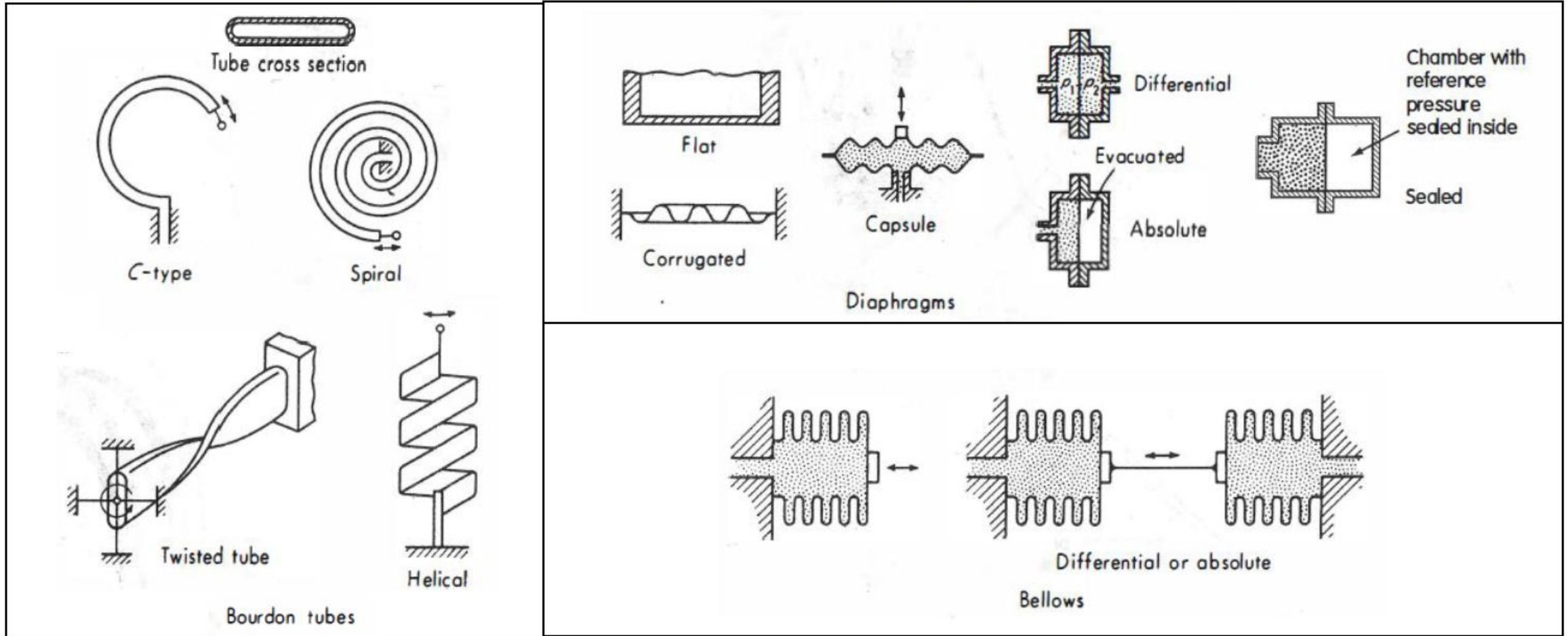
I principali elementi che compongono il sistema sono:

- La sonda da tarare (misura di pressione), inserita all'interno di
- Un sistema di pompaggio e da una valvola di scarico per il fluido (olio) contenuto all'interno del sistema
- Cilindro-pistone verticale, atto ad ospitare diversi pesi campione noti.

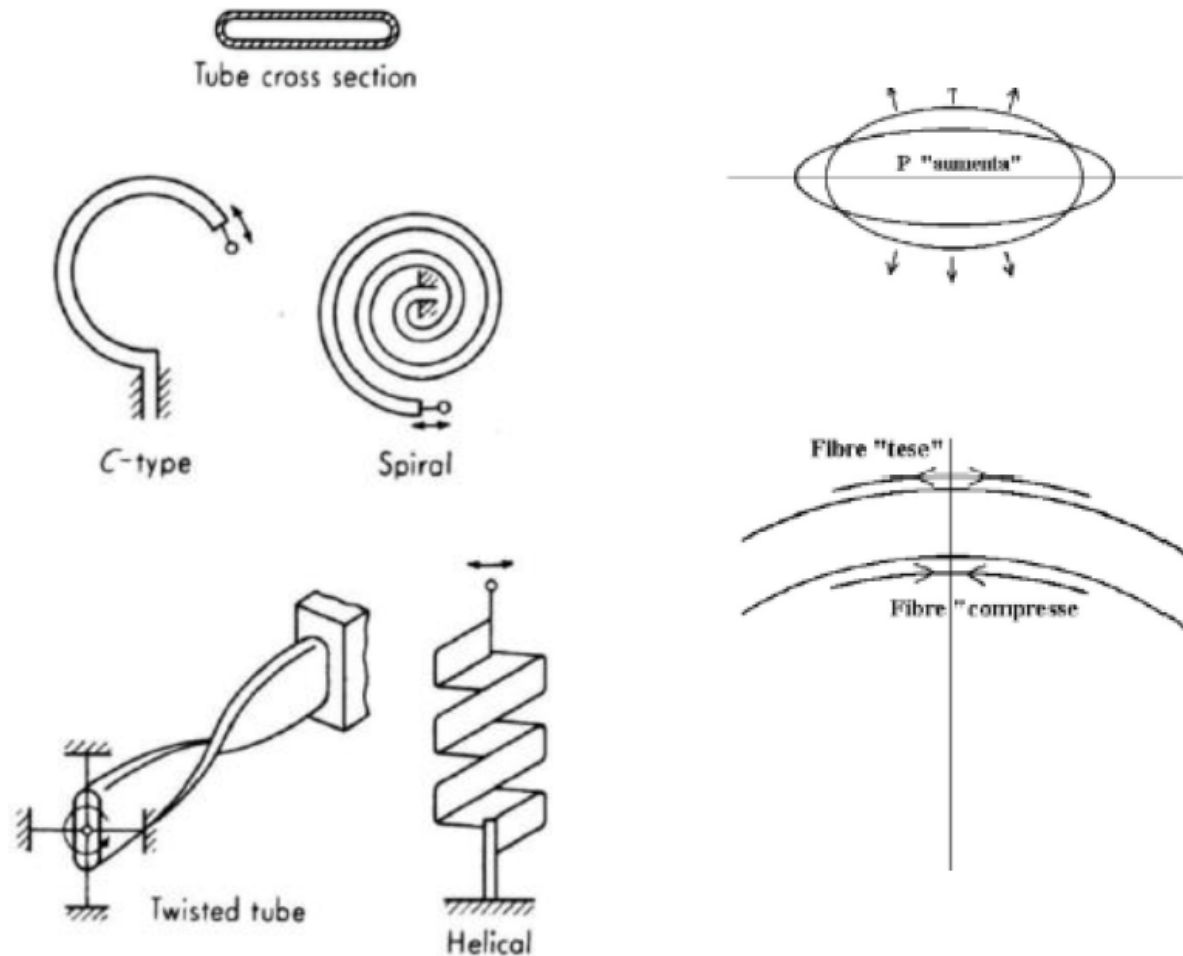
Tale sistema di misura permette di tarare sonde fino al migliaio di bar; il limite inferiore è definito dalla massa del peso proprio del pistone.

Misure di pressione statica - Trasduttori a deformazione elastica

Trasduttori basati sulla deformazione di un elemento elastico sul quale agiscono le forze di pressione



Il tubo di Bourdon

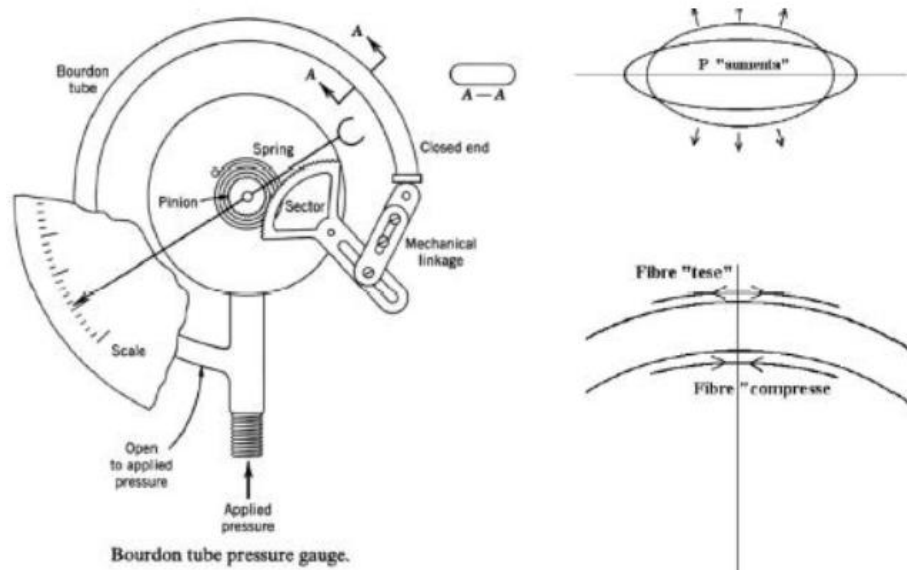


L'elemento base costituente il tubo di Bourdon è un tubo a sezione non circolare. La differenza di pressione fra l'interno e l'esterno del tubo fa sì che il tubo tenda ad assumere una sezione circolare, e la deformazione è proporzionale alla differenza di pressione applicata.

Diverse configurazioni permettono di operare in diversi campi di lavoro (ad esempio le geometrie ad elica o a spirale permettono di operare su intervalli di misura più estesi) e presentano diversi tempi di vita.

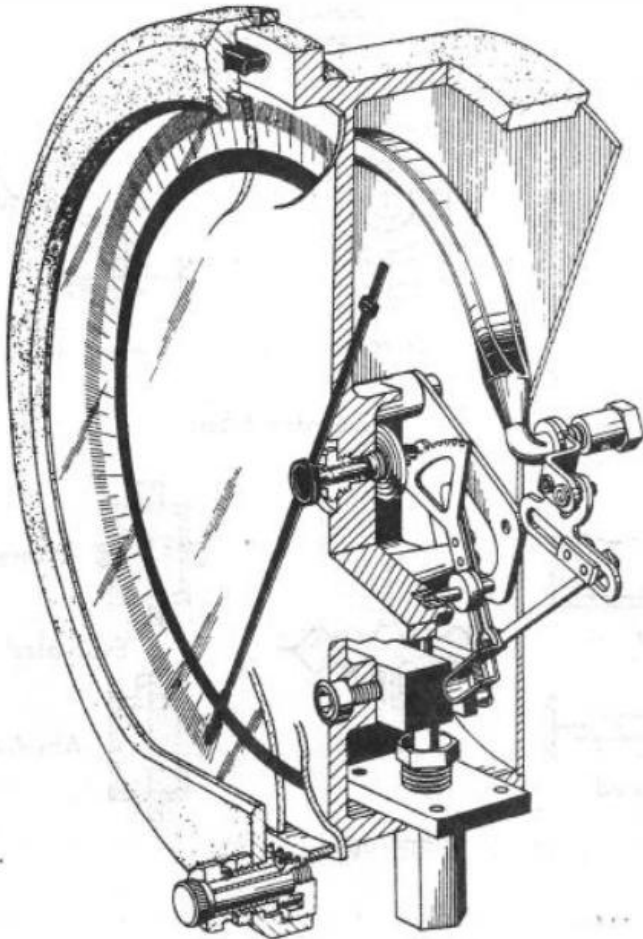
Il tubo di Bourdon

Principio di funzionamento dei manometri a deformazione

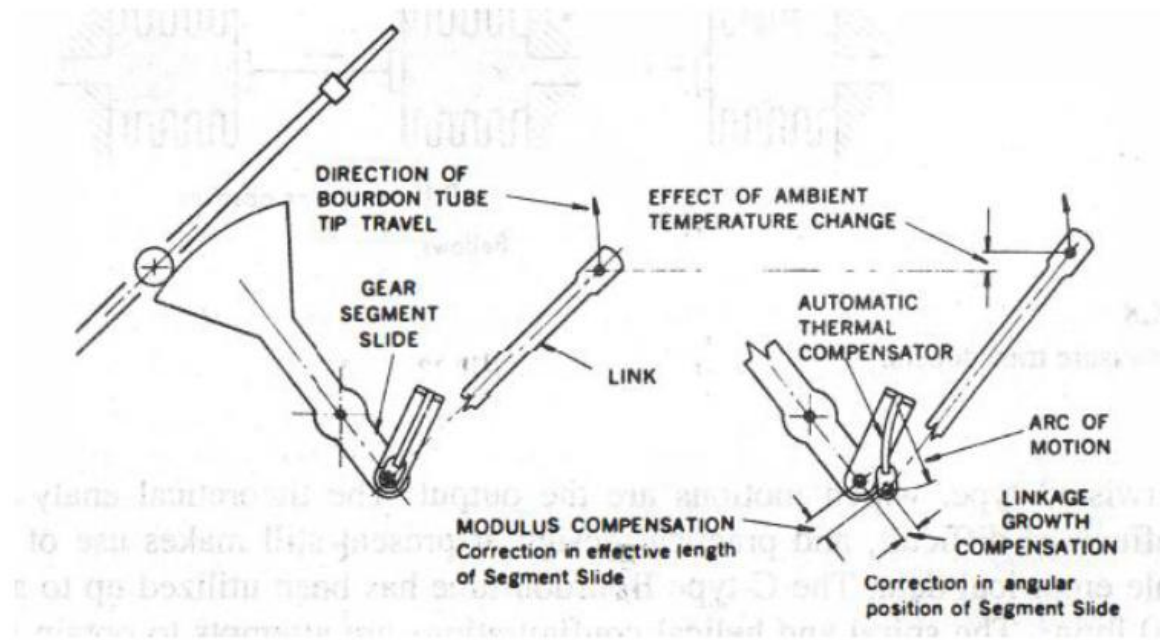


- Indipendentemente dalla geometria, la pressione provoca una deformazione del corpo sensibile.
- Questa deformazione viene tradotta in uno spostamento (variazione di posizione).
- Esempio: geometria a C
 - La pressione interna deforma il tubo.
 - L'estremità libera si sposta lungo una traiettoria curvilinea.
- Lo spostamento è elastico.
- Un meccanismo di trasmissione converte lo spostamento in:
 - Movimento di un ago su un quadrante graduato (indicazione analogica).
- In alternativa:
 - Parti mobili collegate a un potenziometro → elaborazione elettronica diretta (indicazione digitale).
- Tipicamente: fino a 7 kPa.
- Alcuni tubi di Bourdon: fino a 700 MPa (pressioni molto elevate).

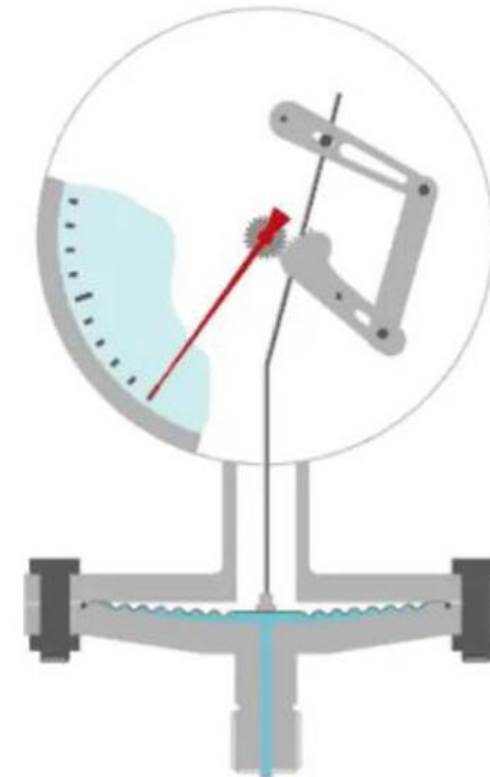
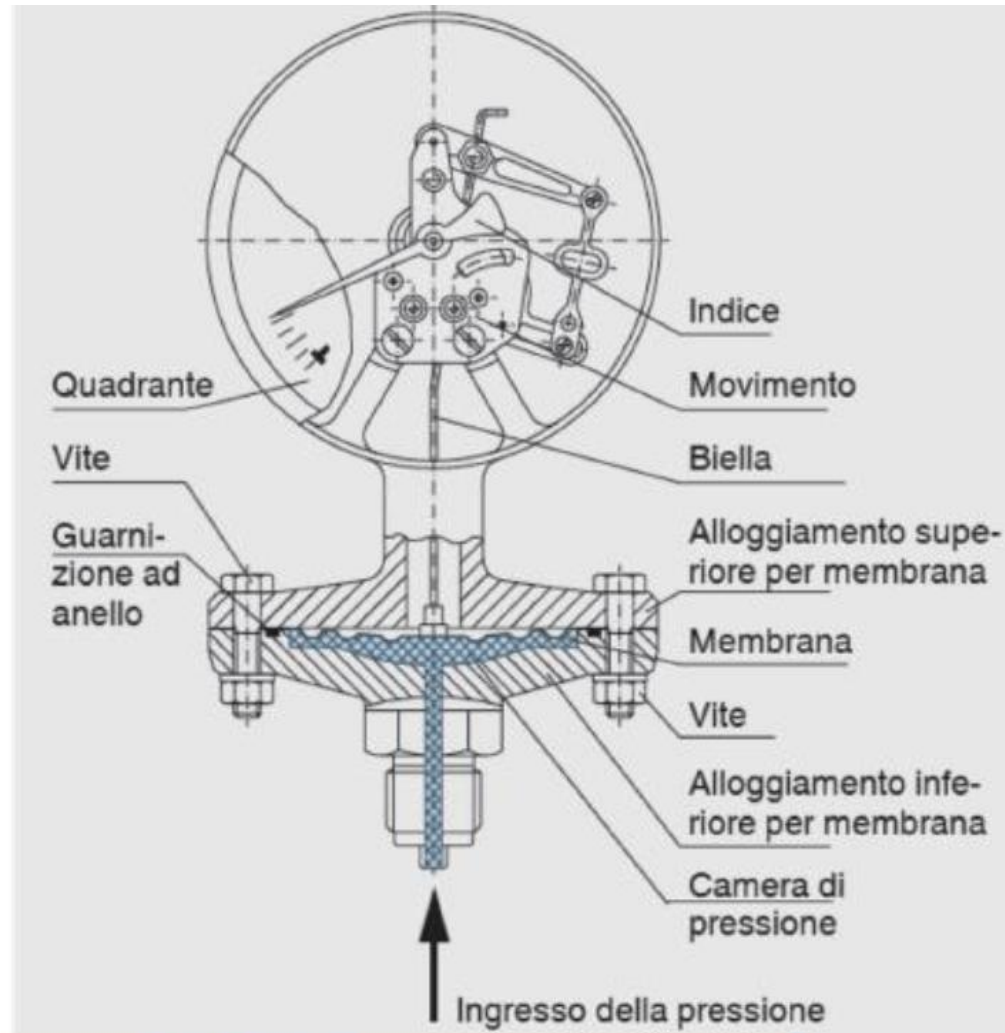
Il tubo di Bourdon



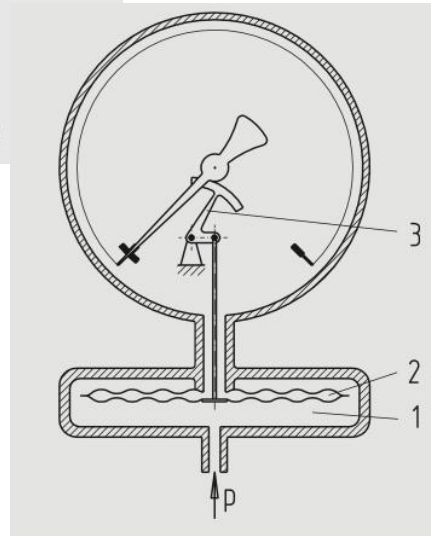
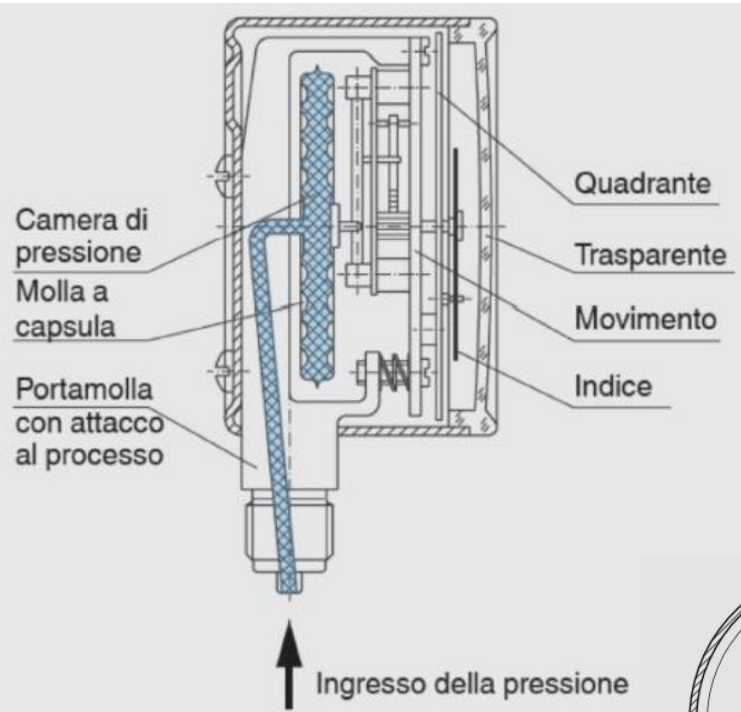
L'architettura del tubo di Bourdon può essere inoltre raffinata introducendo meccanismi in grado compensare meccanicamente eventuali errori dovuti alla variazione di temperatura.



Manometri a membrana



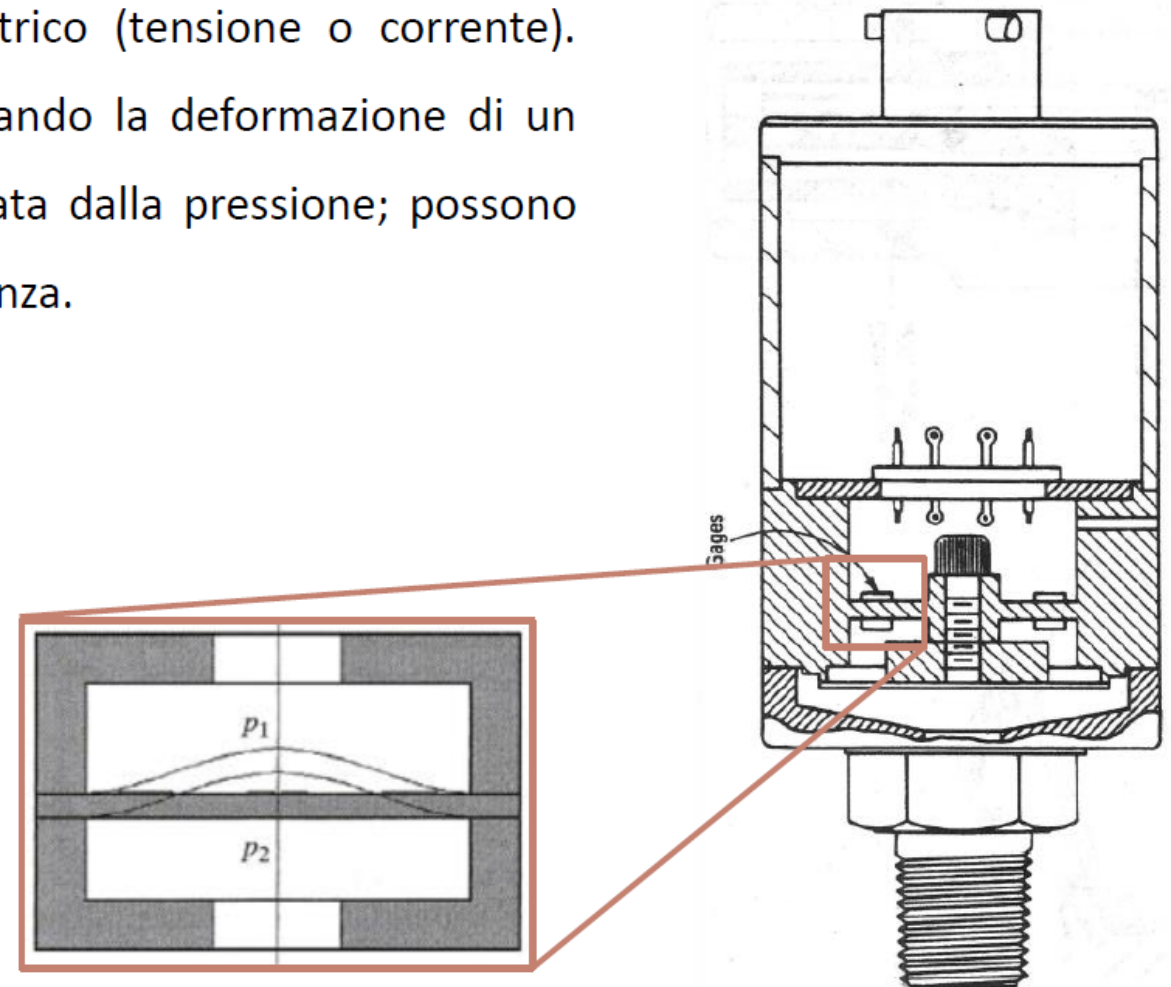
Manometri a capsula



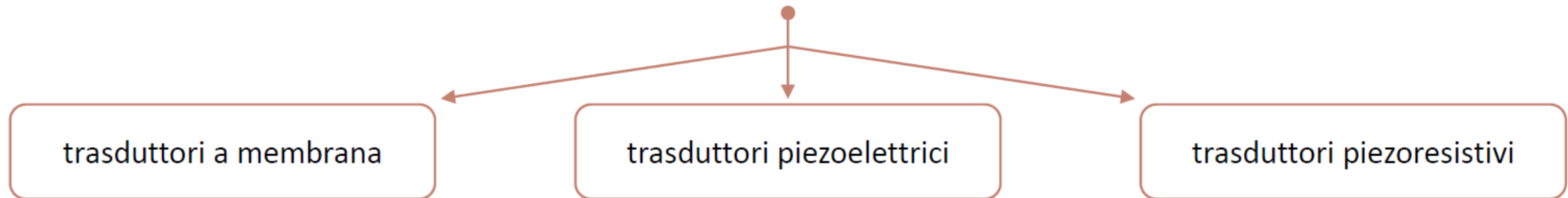
- Due dischi ondulati (in ottone o acciaio inox) saldati lungo la circonferenza → formano una capsula circolare.
- Minime variazioni di pressione → la capsula si espande o si contrae.
- Il movimento è trasmesso a un indice tramite un meccanismo a pignone.
- Strumenti economici e molto precisi per basse pressioni.
- Verticale (parallela al quadrante): migliore sensibilità alle basse pressioni.
- Misura basse pressioni con elevata precisione.

Misure di pressione statica - Trasduttori di pressione elettrici

La pressione rilevata viene trasdotta in un segnale elettrico (tensione o corrente). Solitamente la misura di pressione viene realizzata misurando la deformazione di un elemento elastico sottoposto all'azione della forza esercitata dalla pressione; possono essere impiegati i misuratori di spostamento visti in precedenza.



Diverse classi di trasduttori di pressione si differenziano in base al loro principio di funzionamento, in base alla qualità della misura, in base al costo, ma anche relativamente la loro compatibilità con liquidi o con flussi aventi specifiche caratteristiche (es. flussi carichi di particolato) e dal grado di miniaturizzazione.

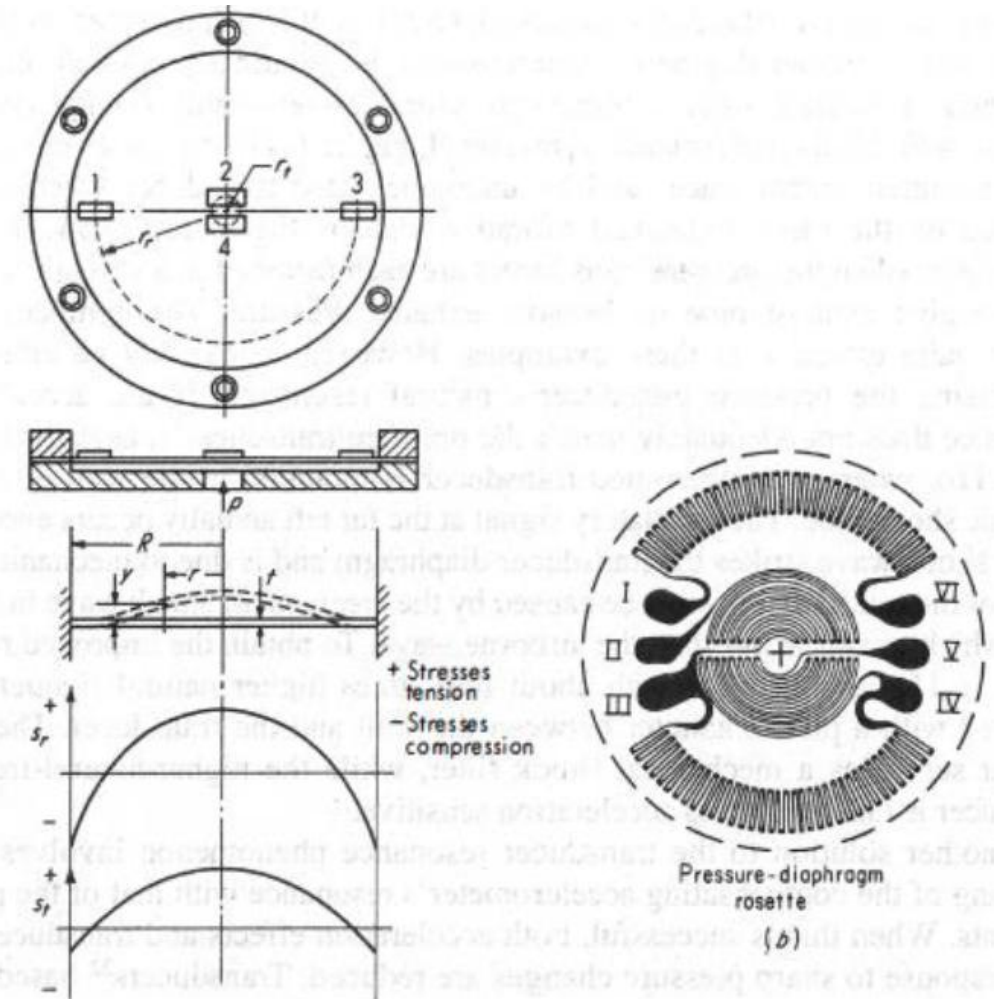


Trasduttori a membrana o diaframma

Diaframma: realizzati in metallo o in plastica (es neoprene), deve essere elastico, sottile, circolare e piatto. È supportato sulla sua circonferenza. Sono adatti per misure sia statiche che dinamiche. La trasduzione avviene tramite estensimetri (o rosette) applicati sulla membrana, oppure tramite membrane corrugate che applicano una forza su una trave estensimetrica. Nel primo caso la risposta è di carattere non lineare:

$$p = \frac{16Et^4}{3r^4(1-\nu^2)} \left[\frac{y_c}{t} + 0.488 \left(\frac{y_c}{t} \right)^3 \right]$$

Dove y_c è il centro di flessione, E , ν e t sono rispettivamente il modulo elastico, il coefficiente di Poisson e lo spessore della membrana.



Trasduttori a membrana o diaframma

Progettando la membrana con rapporti y_c/t sufficientemente piccoli, $\left(\frac{y_c}{t}\right)^3 \ll \frac{y_c}{t}$ e le non linearità diventano trascurabili:

$$p \cong \frac{16Et^4}{3r^4(1-\nu^2)} \frac{y_c}{t}$$

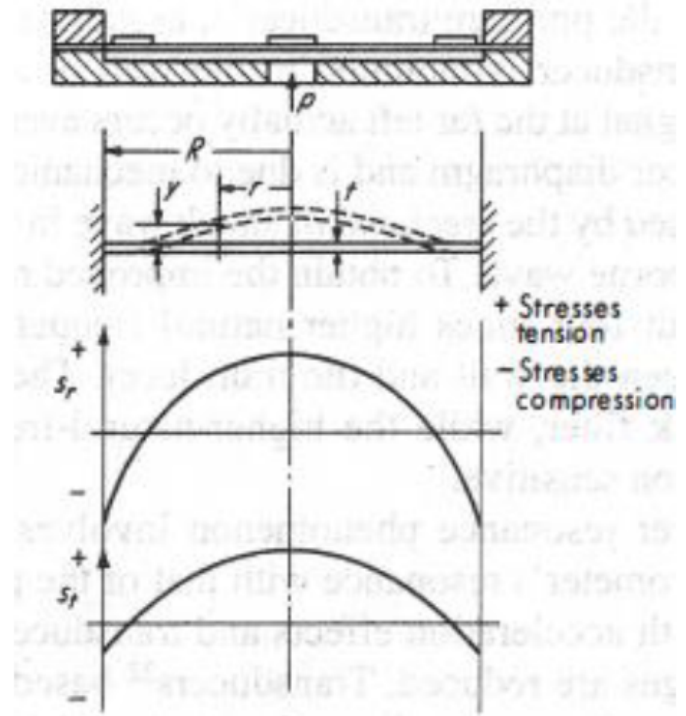
Progettare la membrana in modo tale che la deformazione indotta sia piccola, consente di linearizzare:

1. le equazioni per l'analisi degli sforzi radiali e tangenziali, qui riportate

$$s_r = \frac{3pR^2\nu}{8t^2} \left[\frac{1}{\nu} + 1 - \left(\frac{3}{\nu} + 1 \right) \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad s_t = \frac{3pR^2\nu}{8t^2} \left[\frac{1}{\nu} + 1 - \left(\frac{1}{\nu} + 3 \right) \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]$$

2. l'equazione che permette di calcolare la deflessione puntuale della membrana:

$$y = \frac{3p(1-\nu^2)(R^2 - r^2)^2}{16Et^3}$$

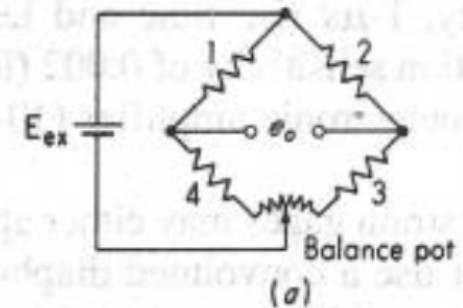
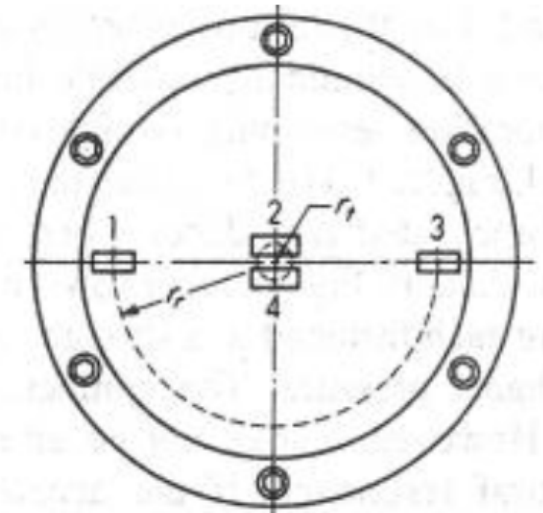


Trasduttori a membrana o diaframma

La possibilità di lavorare all'interno di un regime di misura lineare consente così l'impiego di un circuito di condizionamento a ponte, nel quale quattro estensimetri sono posti tra loro in equilibrio. Nell'esempio rappresentato in figura gli estensimetri 1 e 3 sono orientati per misurare le deformazioni radiali e sono posizionati verso l'esterno, dove le deformazioni raggiungono il loro valore massimo negativo. Gli estensimetri 2 e 4 misurano le deformazioni tangenziali e sono posizionati al centro, dove queste assumono il loro valore massimo. Infine, nella configurazione in esempio le deformazioni considerate devono essere di natura biassiale, dove $\varepsilon_r = (s_r - \nu s_t)/E$ e $\varepsilon_t = (s_t - \nu s_r)/E$. Segue:

$$\frac{e_0}{E_{ex}} = k \frac{R^2(1 - \nu^2)}{Et^2} p$$

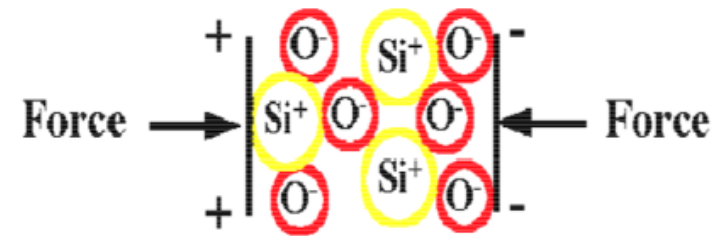
Dove k è una costante di proporzionalità specifica del trasduttore.



Trasduttori piezoelettrici

Le misurazioni dinamiche di pressione utilizzano sensori che si basano su quello che viene comunemente chiamato "effetto piezoelettrico".

Questo consiste nel fatto che alcuni cristalli, se sottoposti all'azione di una sollecitazione esterna, generano una migrazione di cariche che, con l'utilizzo di un apposito circuito, può essere tradotto in una differenza di potenziale.



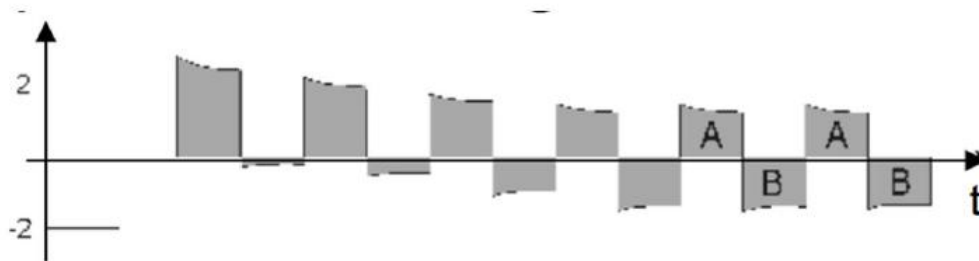
La misurazione di questa permette di risalire all'intensità della forza F agente sull'elemento. Conoscendo, quindi, F ed A (la superficie su cui viene applicata la forza) si può risalire alla pressione P .

Fra i materiali con questa proprietà il più usato è certamente il quarzo per via della sua stabilità e sensibilità.

Trasduttori piezoelettrici

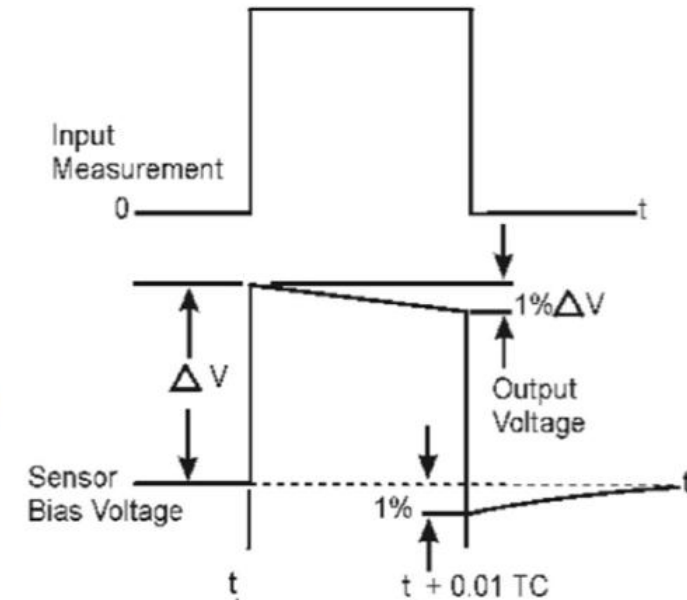
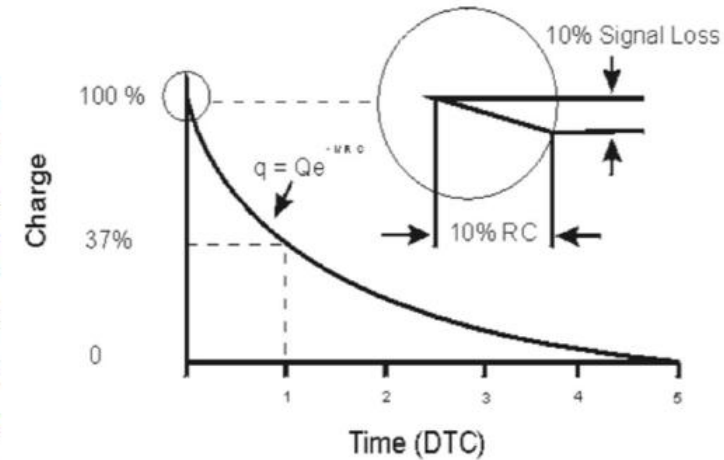
Corrente di scarica

Quando la variazione di sollecitazione non è più presente, la carica tende ad annullarsi; proprio come accade per i circuiti resisto-capacitivi, la dispersione segue una legge con andamento esponenziale. Il valore della capacità elettrica, per la resistenza è denominata DTC (Discharge Time Constant) o Costante di Scarica (in secondi). Questa è definita come il tempo necessario al sistema di misura per attenuare il segnale fino al 37% del valore originario.



Si perde la componente media del segnale

i sensori di tipo piezoelettrico non possono essere utilizzati per misure di pressione costante.

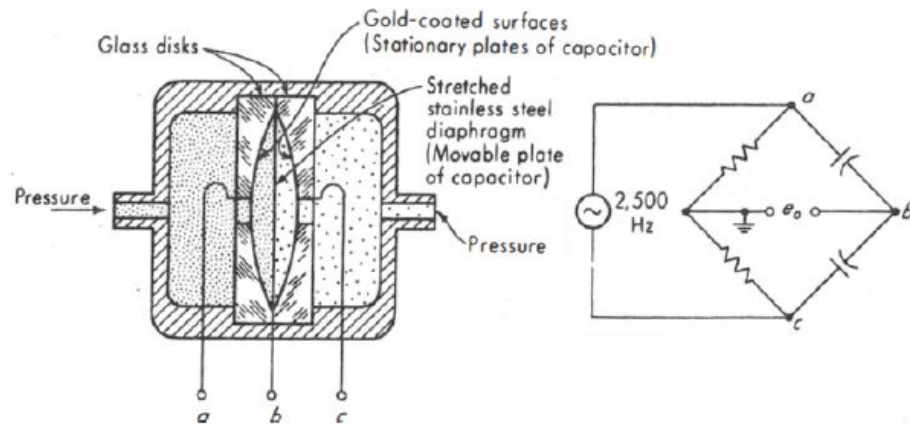
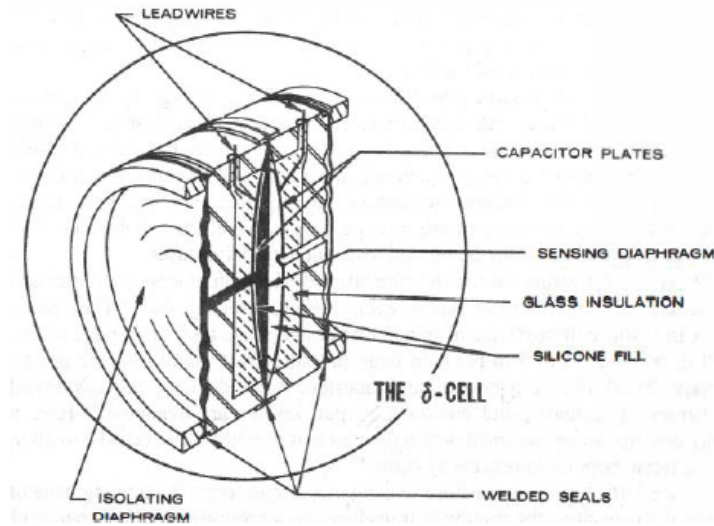


Trasduttori piezoresistivi

La piezoresistenza è la resistenza che un materiale (conduttore o semiconduttore) oppone al passaggio di una corrente elettrica quando varia la resistività elettrica a seguito di una deformazione indotta sul materiale da una sollecitazione esterna.

Questo effetto è apprezzabile solo in alcuni materiali (primi fra tutti i cristalli di silicio) e, al contrario di quanto accade in quelli piezoelettrici, questa variazione di resistenza avviene sia con forze statiche che dinamiche.

Trasduttori capacitivi



Trasduttori capacitivi

Principalmente impiegati per la misura di pressioni differenziali, la membrana sensibile costituisce l'armatura mobile di una capacità; la misura di pressione viene indirettamente legata alla misura di capacità indotta dalla misura di spostamento ($C = \epsilon A/x$).

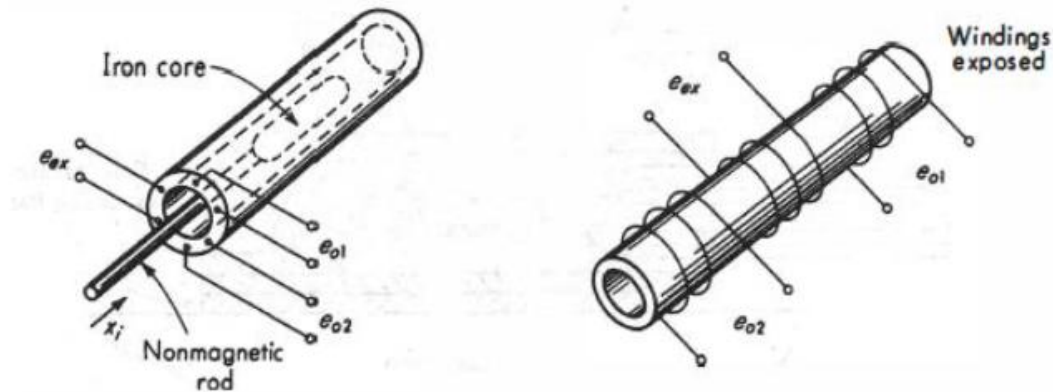
Il movimento della membrana mobile viene trasdotto in una variazione di un parametro elettrico (corrente o tensione). La trasduzione viene fatta per mezzo di un circuito a ponte alimentato in corrente alternata.

Tali sensori riescono a garantire elevate sensibilità (0.25% del fondo scala) a scapito del costo.

Trasduttori capacitivi

Trasduttori induttivi

La misura di pressione, rilevata tramite misura di spostamento può anche far uso di sensori a induttanza variabile ($L = \mu N^2 A / l$) per trasdurre la pressione in variazione di parametri elettrici ($v(t) = L di(t)/dt$).



Misure di pressione di fluidi in movimento

Pressione statica (p): pressione del fluido in moto o in movimento; viene misurata tramite fori appositamente ricavati nelle pareti della condotta.

Pressione dinamica (p_v): pressione equivalente esercitata dal fluido dovuta all'incremento di pressione derivante dalla energia cinetica dello stesso.

Pressione totale (p_0): la pressione totale (o di ristagno) rappresenta la pressione alla quale il fluido sarebbe portato se, in condizioni isoentropiche ed in tempo infinitesimo, sarebbe portato a velocità nulla.

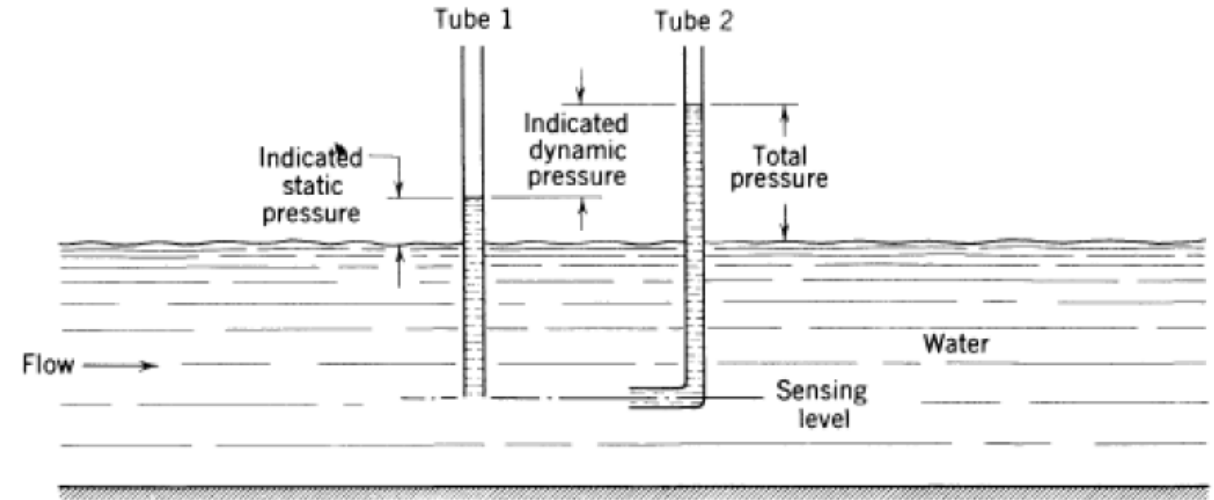
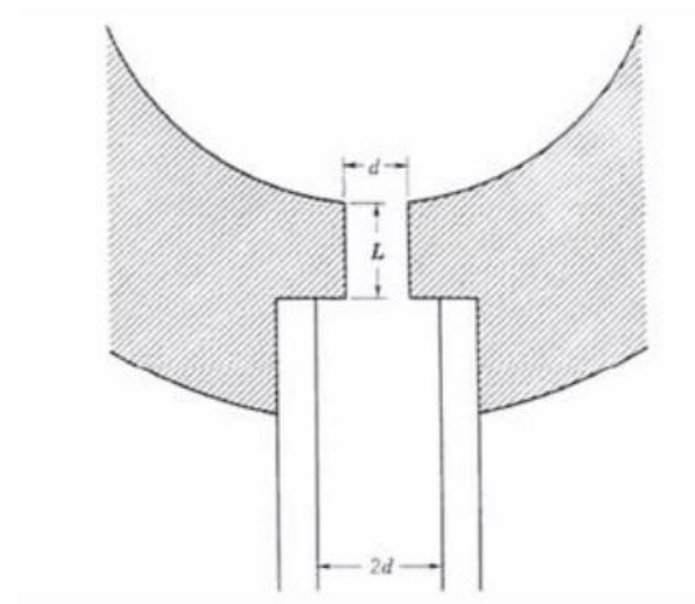


FIGURE 17.23 Basic Pitot-tube method of sensing static, dynamic, and total pressures.

Misura di pressione statica

Le misure di pressione statica sono largamente impiegate per misure di portata, velocità e direzione di un flusso.

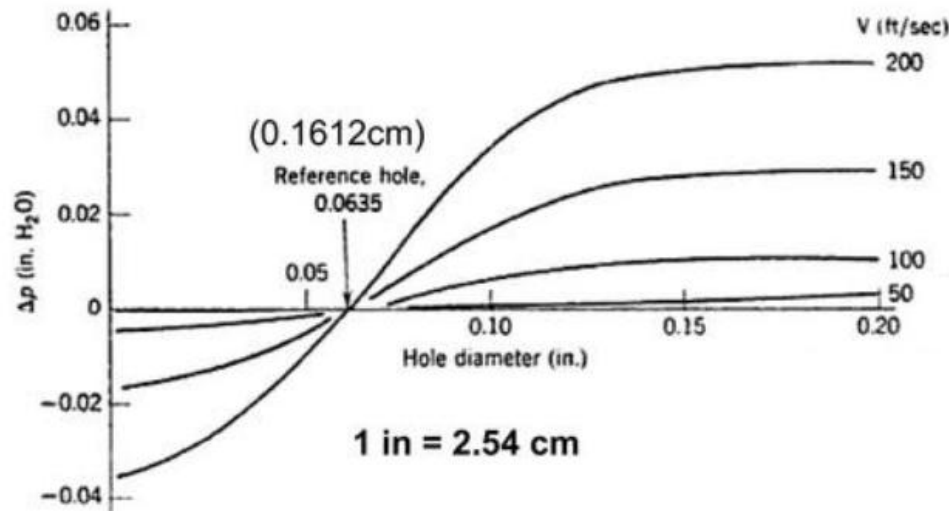
In condizioni statiche, la pressione viene rilevata tramite la connessione di un sensore di pressione con il fluido, che avviene per mezzo di fori (*wall taps*) perpendicolari alla sezione della condotta.



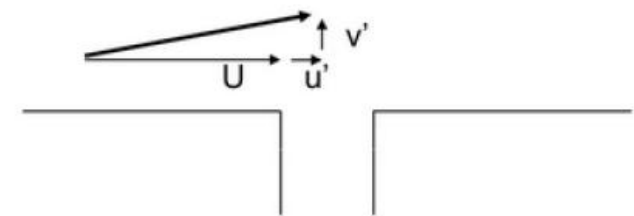
A recommended static pressure wall-tap geometry $1.5 < L/d < 6$

Misura di pressione statica

Al fine di ridurre l'influenza del processo di misura sulla propagazione del fluido, si desidera che il foro di misura sia il più ridotto possibile. Anche in questo campo è necessario trovare un compromesso progettuale, in quanto fori di dimensioni minori possono essere più complessi da realizzare (in particolare in relazione alla rimozione della bava) e hanno tempi di risposta più elevati. Al contrario, fori di dimensioni maggiori possono introdurre un errore più elevato.



$$\frac{v'^2}{U^2} = 0.25\% - 0.5\% \text{ of dynamic pressure}$$



Misura di pressione statica

$$\frac{v'^2}{U^2} = 0.25\% - 0.5\% \text{ of dynamic pressure}$$

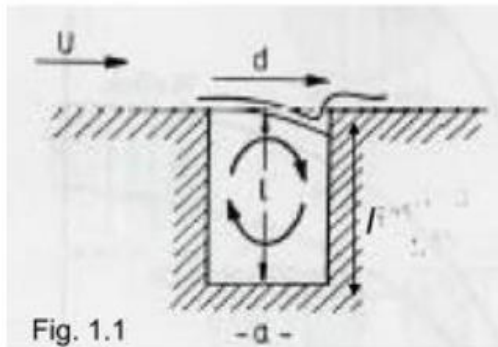
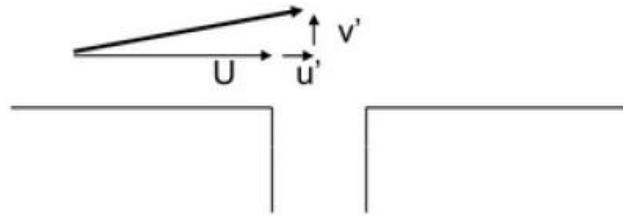


Fig. 1.1

L'errore di misura è infatti dovuto alla sollecitazione di taglio (τ) del fluido che passa sopra il foro dedicato alla misura della pressione statica. Tale sollecitazione induce la formazione di micro vortici all'interno della cavità di misura che producono un aumento della pressione statica misurata.

$$\varepsilon_p = \frac{p_{\text{misurata}} - p_{\text{reale}}}{\tau} > 0$$

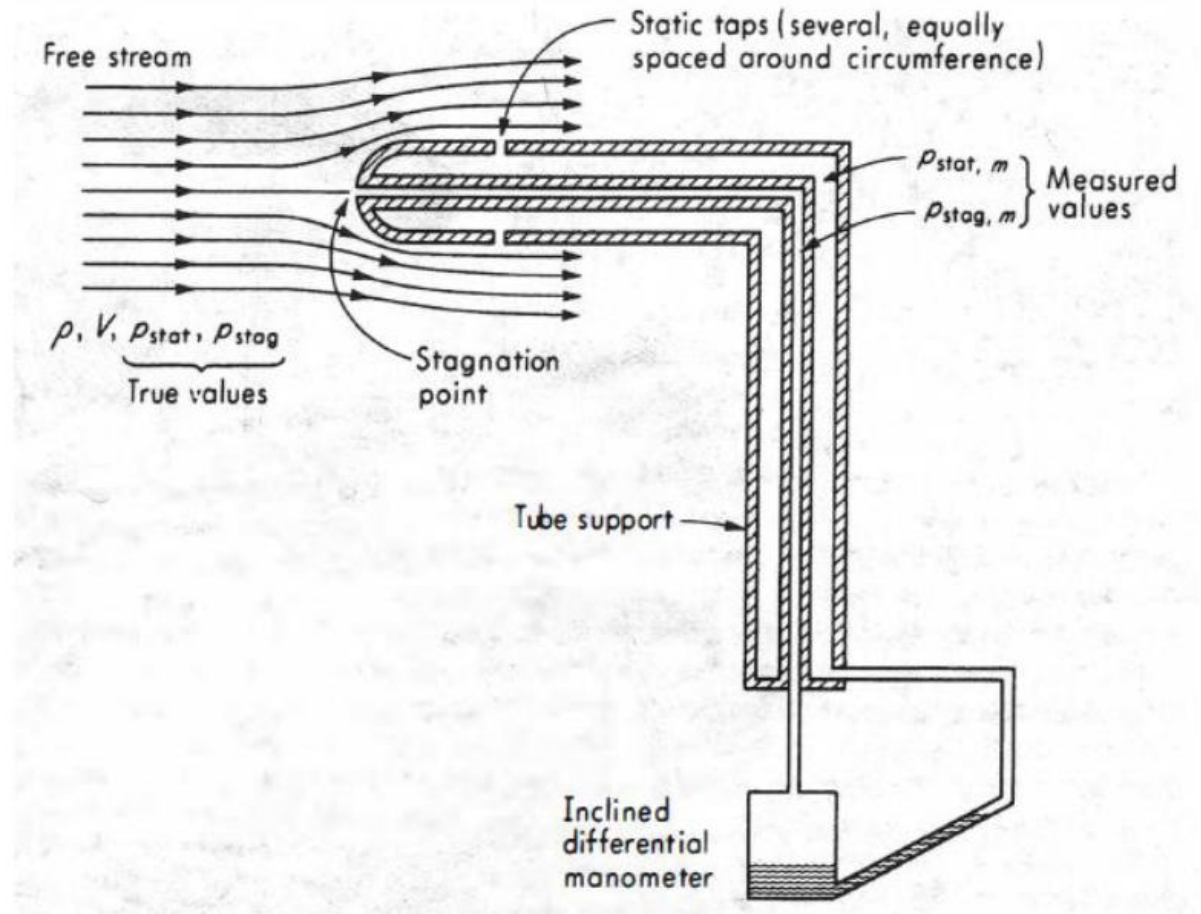
L'errore generato è dipendente dalla geometria della presa di pressione e dal numero di Reynolds.

Misura di pressione tramite tubo di Pitot

Il tubo di Pitot è costituito da una sonda con un foro frontale per la misura della pressione totale e da quattro fori laterali per la misura della pressione statica.

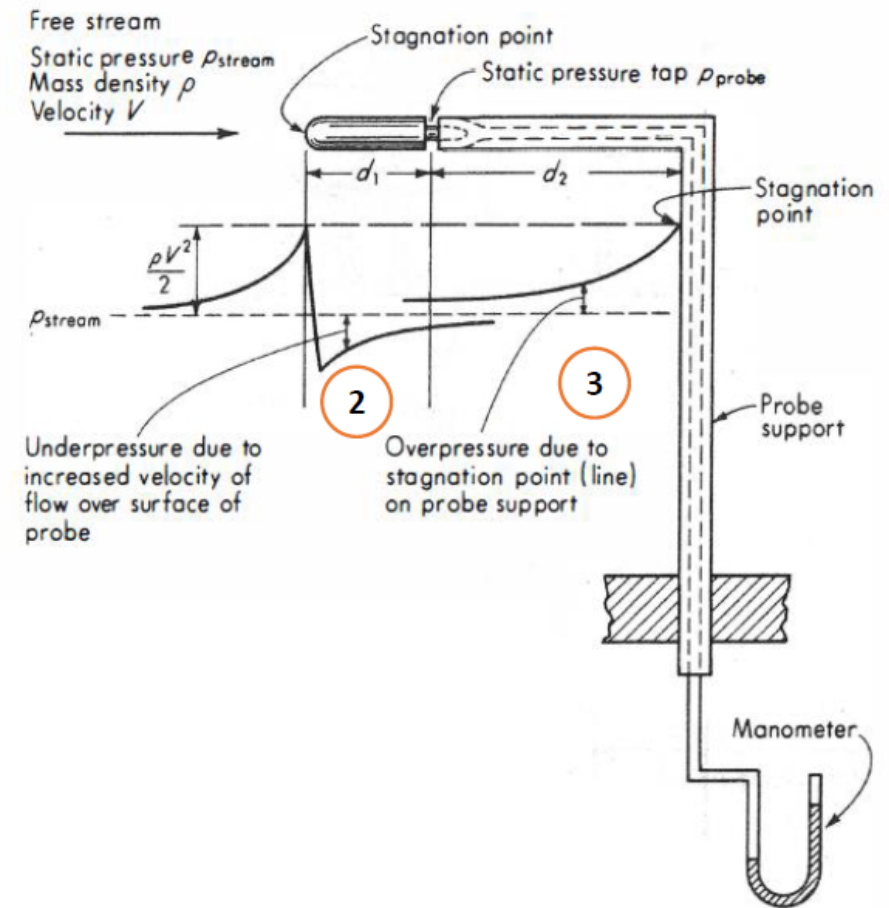
Possibili fonti d'errore per la misura di pressione statica sono date da:

1. Eventuale disallineamento tra l'asse del tubo e il vettore velocità, che introduce un errore legato alla velocità del fluido



Misura di pressione tramite tubo di Pitot

2. Diametro del tubo non nullo, che provoca una differente distribuzione delle linee di velocità attorno al tubo. L'aumento della velocità del fluido riduce il valore della pressione statica misurata. In parallelo, si riscontra l'influenza del punto di ristagno sulla misura della pressione statica, che porta all'aumento della pressione statica misurata al diminuire della distanza tra la punta del tubo e le prese di misura statica.
3. In aggiunta all'errore indotto dalla distanza tra le prese di pressione statica e il punto di stagnazione, si deve considerare anche la presenza di una sovrappressione dovuta alla distanza troppo ravvicinata del supporto della sonda.



Misura di pressione tramite tubo di Pitot

Quantitativamente gli errori ai punti 2 e 3 si possono compensare reciprocamente in fase di progettazione della sonda.

Un compromesso soddisfacente si osserva a partire da 5 diametri dopo l'imbocco (nose) ed oltre 15 dalla diramazione (stem)

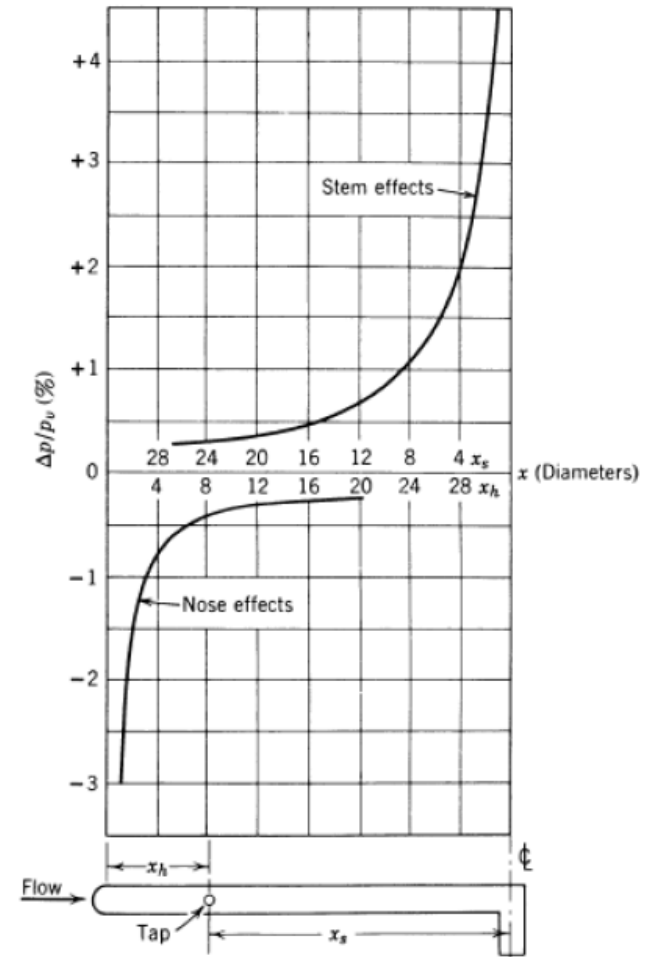
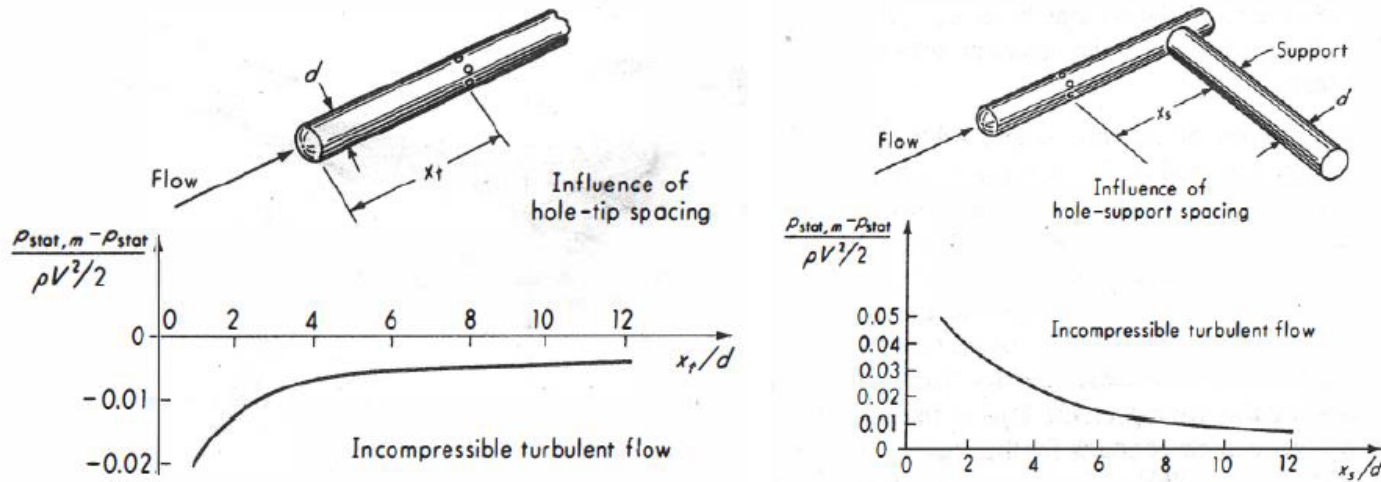


FIGURE 17.12 Static tube characteristics. x_s —position of taps from centerline of stem; x_h —position of taps from base of nose. (Source: From Dean et al. [41].)

Misure di vuoto

Misura di basse pressioni (vuoto)

Al diminuire della pressione al di sotto della pressione atmosferica, si parla di vuoto. In base alla frazione di pressione presente, si parla di diversi gradi di vuoto, così classificato:

• basso vuoto (<i>rough vacuum</i> , RV)	$10^5 \text{ Pa} \div 3 \times 10^3 \text{ Pa}$
• medio vuoto (<i>medium vacuum</i> , MV)	$3 \times 10^3 \text{ Pa} \div 10^{-1} \text{ Pa}$
• alto vuoto (<i>high vacuum</i> , HV)	$10^{-1} \text{ Pa} \div 10^{-3} \text{ Pa}$
• alto vuoto spinto (<i>very high vacuum</i> , VHV)	$10^{-3} \text{ Pa} \div 10^{-7} \text{ Pa}$
• ultra alto vuoto (<i>ultra high vacuum</i> , UHV)	$10^{-7} \text{ Pa} \div 10^{-10} \text{ Pa}$
• vuoto estremamente alto (<i>extremely high vacuum</i> , EHV)	$< 10^{-10} \text{ Pa}$

In condizioni di vuoto, non si può più impiegare il concetto di misura legato alla misura di una forza agente su una superficie nota, e differenti approcci devono essere adottati.

Misura di basse pressioni (vuoto) – manometri a diaframma

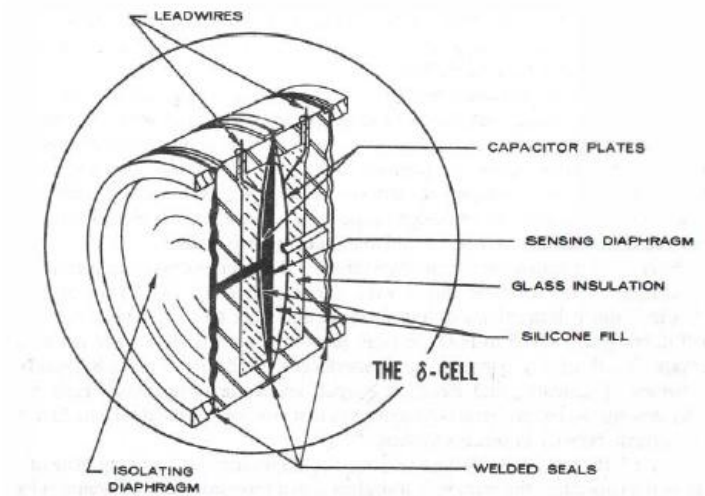


Figure 6.16

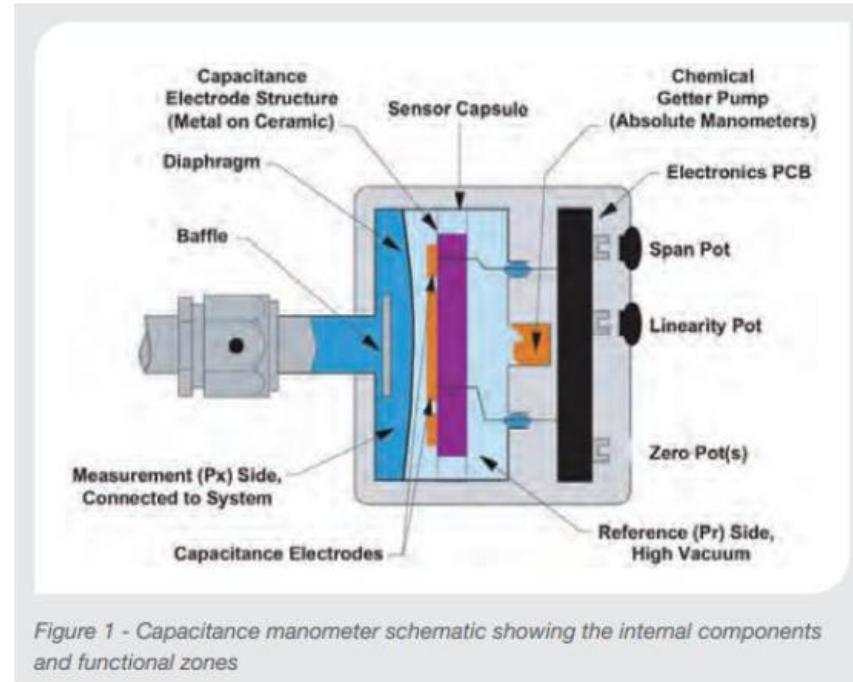
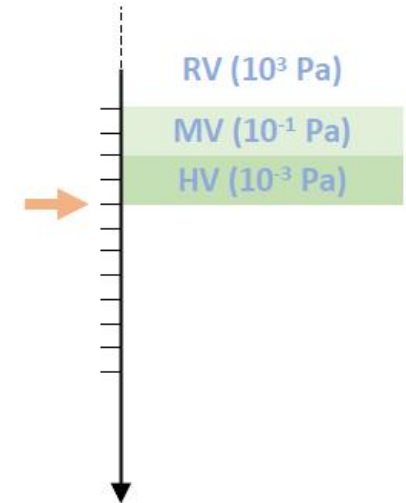


Figure 1 - Capacitance manometer schematic showing the internal components and functional zones

https://www.mks.com/mam/celum/celum_assets/resources/PressureBasics-AppNote.pdf



Misura di basse pressioni (vuoto) – manometri di McLeod

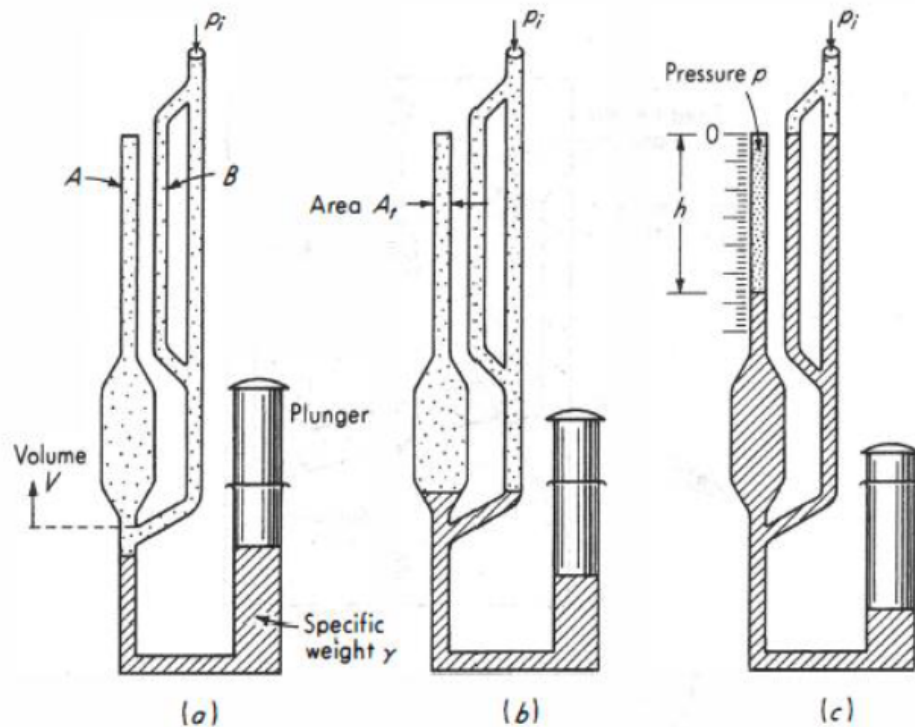


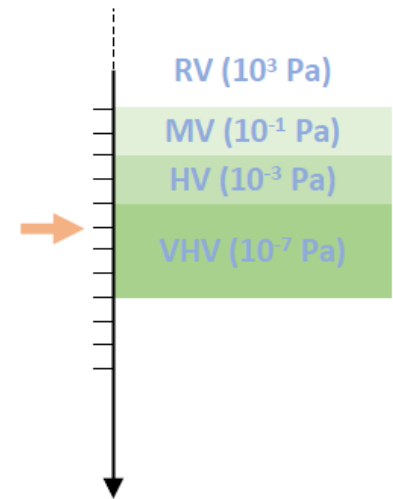
Figure 6.30

Ormai obsoleti: il gas a pressione ignota (p_i) viene introdotto in una camera apposita (a). Un fluido di peso specifico noto, viene usato per separare una parte di gas in un volume confinato (b). Aumentando la pressione nota sul fluido (Hg), una volta il fluido ha raggiunto il riferimento di una scala graduata, tramite la legge di Boyle ($pV = \text{costante}$) è possibile ricavare la pressione ignota:

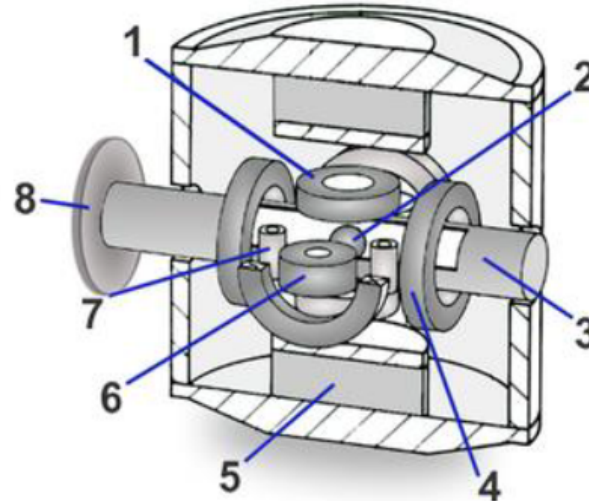
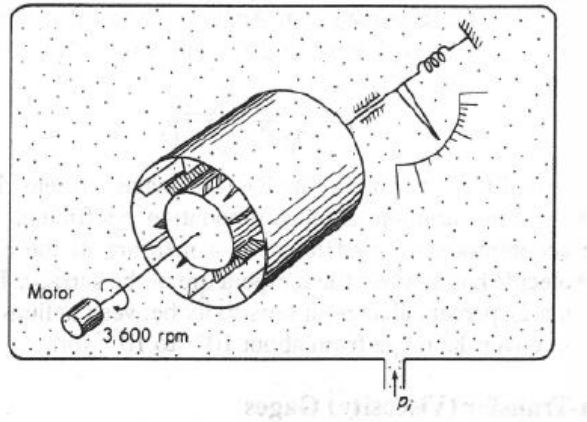
$$p_i V = p A_t h$$

$$p = p_i + h\gamma$$

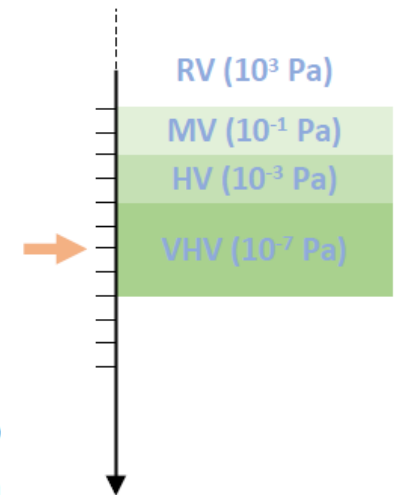
$$p_i = \frac{h\gamma^2}{V - A_t h} \cong \frac{h\gamma^2}{V}; V \gg A_t h$$



Misura di basse pressioni (vuoto) – manometri a viscosità



<https://sens4.com/srg-explained.html>



La differenza di pressione si misura rilevando la variazione di viscosità di un gas noto. L'elemento sensibile può essere composto da due cilindri concentrici, o (più recentemente) da un corpo in metallo (2) messo in rotazione in una cavità (3) e sostenuto in sospensione da un campo magnetico indotto da un magnete permanente (5). Il corpo in metallo viene messo in rotazione per mezzo di un elettromagnete (4): la misura della sua decelerazione (proporzionale alla pressione indotta dal gas presente nella camera sulla sfera), permette di ricavare la pressione interna alla camera.

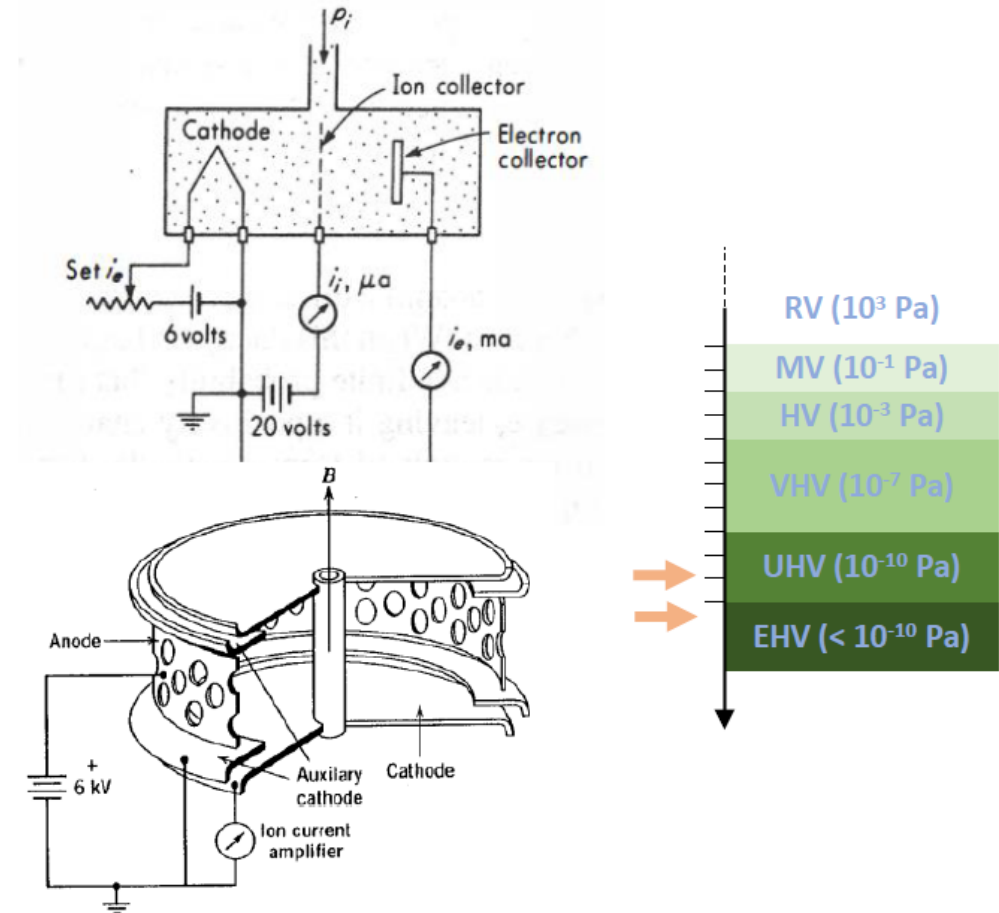
Misura di basse pressioni (vuoto) – manometri a ionizzazione

In questa classe di manometri, la pressione viene rilevata per mezzo di una misura della densità di molecole presenti nella camera di misura.

La sensitività per questa classe di strumenti può essere espressa come:

$$S = f\left(\frac{i_{i^+}}{i_{e^-}}\right)$$

Sensibilità maggiori si possono ottenere impiegando dei misuratori a magnetron. Qui la sezione circolare permette di ridurre il rumore indotto nella camera di misura da un campo elettrico trasversale, che, nella precedente configurazione introduceva una perturbazione nell'elettrodo di misura



From "Pressure measurement with ionization gauges", by Karl Jousten.



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE**



Ronelly De Souza

ronellyjose.desouza@dia.units.it

www.units.it