



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE**



Dipartimento di
**Ingegneria
e Architettura**

MISURE MECCANICHE TERMICHE E COLLAUDI MISURE DI PRESSIONE

Prof. Marco Bogar

A.A. 2024-2025

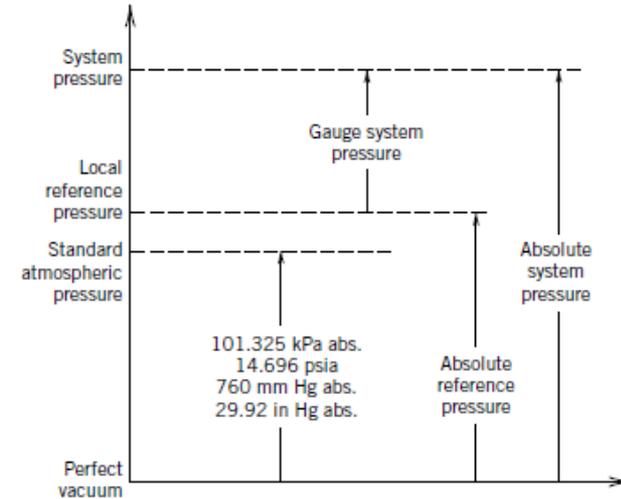
Introduzione

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:

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

La misura di pressione è una misura indiretta. 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*:

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

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

Strumenti di misura della pressione

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



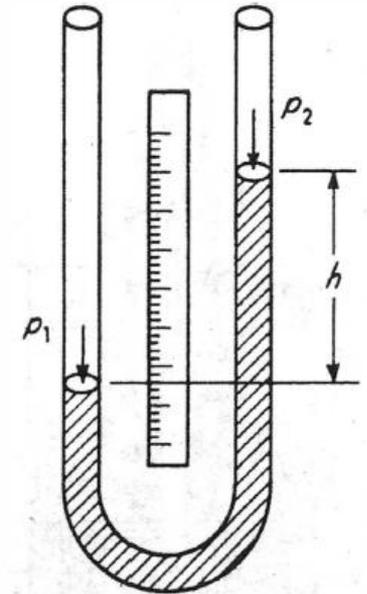
Manometri

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.

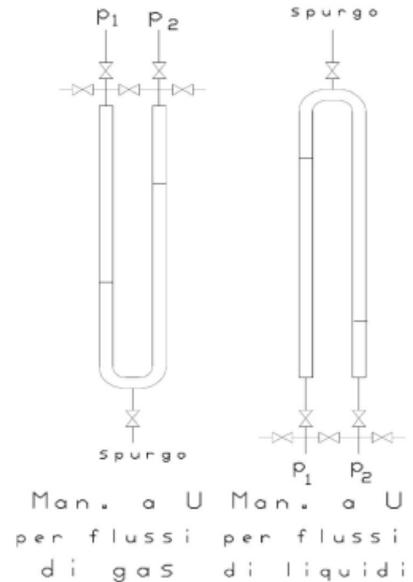


Manometro differenziale

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:

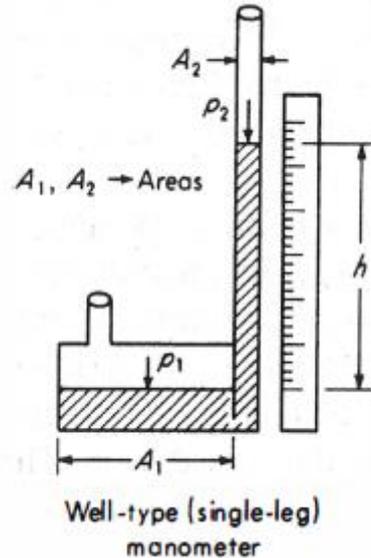
- Variazioni di densità del fluido manometrico o alla scala di misura legate alla variazione di temperatura
- Non perfetta verticalità dei tubi
- Difficoltà di lettura dovuta alla formazione del menisco



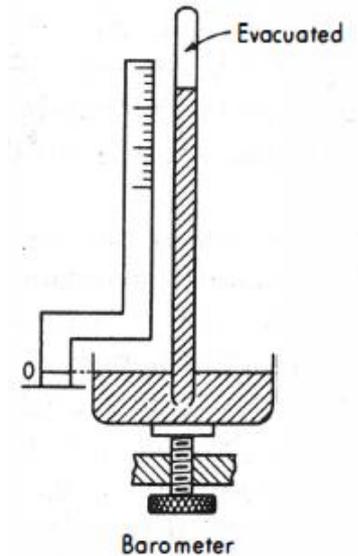
Manometri a pozzetto

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



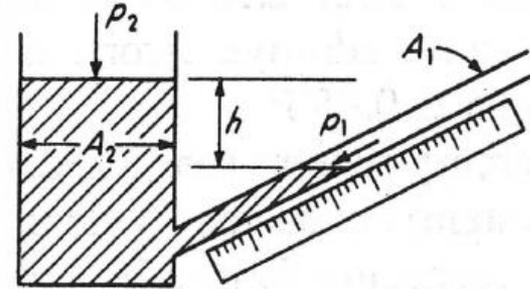
$$h = \frac{\Delta p}{\rho g}$$



Manometro a tubo inclinato

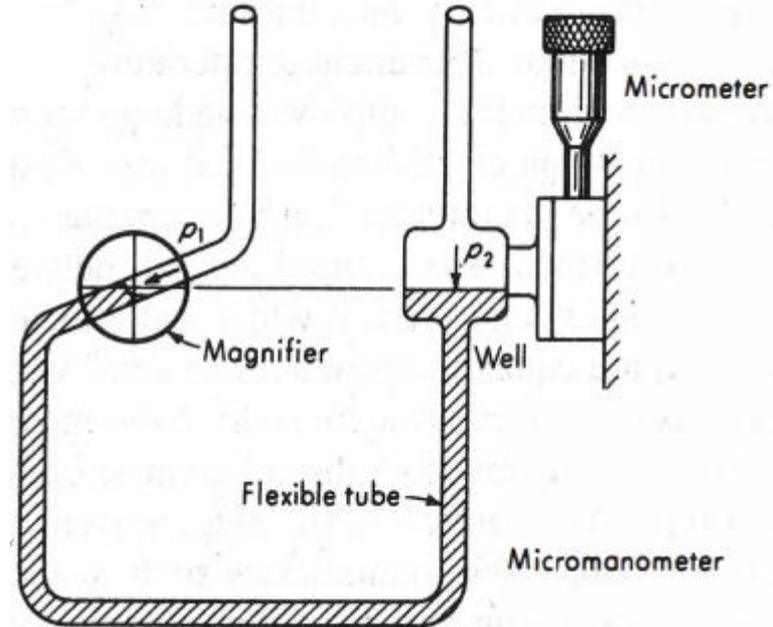
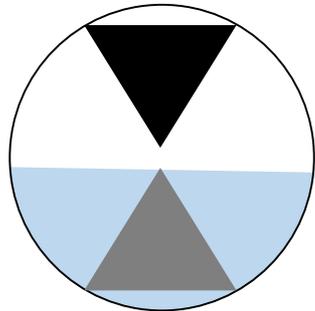
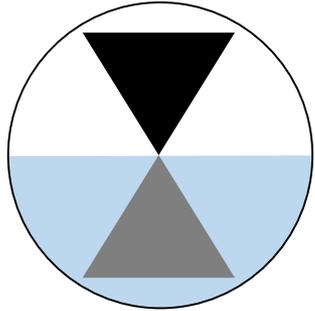
Il manometro a tubo inclinato permette di aumentare la sensibilità dello strumento di misura; il ramo dove si esegue la lettura è inclinato rispetto alla verticale, e di conseguenza produce un maggior spostamento del fluido manometrico a parità di variazione di quota nella direzione verticale.

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

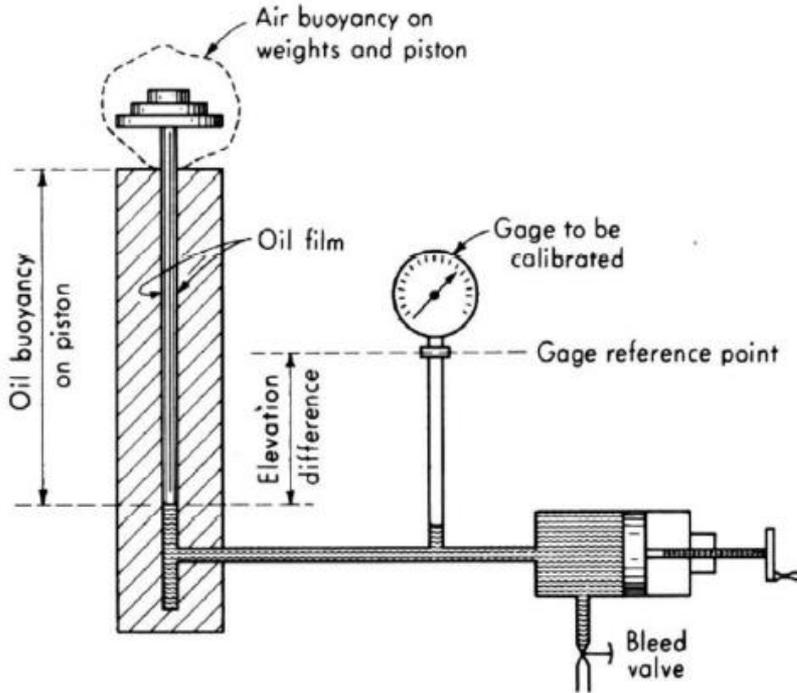


Inclined manometer

Micro-manometri differenziali



La sonda a pesi diretti



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.

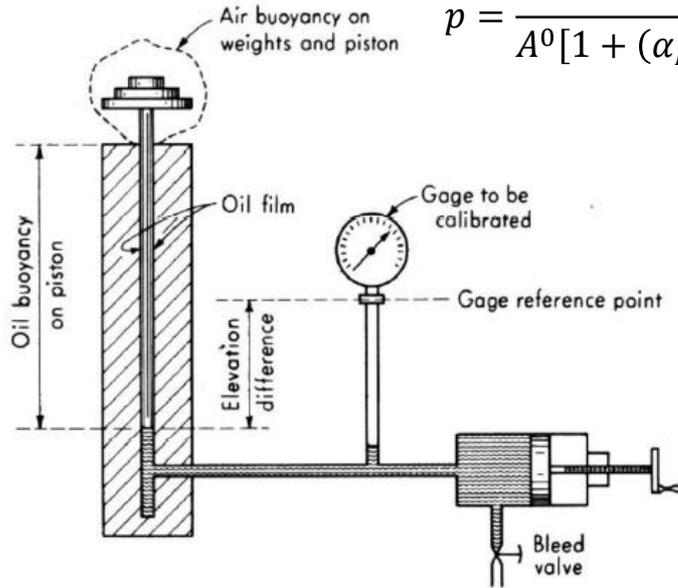
Tale sistema di misura permette di tarare sonde fino al migliaio di bar; il limite inferiore è definito dalla massa del peso proprio del pistone.

Sonde a pesi diretti

Alcune sonde a pesi diretti sono progettate per impiegare gas inerti come fluidi operativi.

L'apparato di misura può essere raffinato permettendo di considerare l'influenza di svariati parametri ambientali:

$$p = \frac{Mg \left(1 - \frac{\rho_{aria}}{\rho_{massa}} \right) + \pi D \tau}{A^0 [1 + (\alpha_p + \alpha_c)(T - 20)] (1 + \lambda P) - (\rho_{fluido} - \rho_{aria}) gh}$$



M – massa complessiva del carico

g – accelerazione gravitazionale

ρ – densità

D – diametro del pistone

A^0 – area effettiva pistone/cilindro a 20°C e P^0

α_x – coefficienti di espansione termica di pistone e cilindro

τ – tensione superficiale del fluido

T – temperatura

λ – coefficiente di deformazione elastica pistone/cilindro

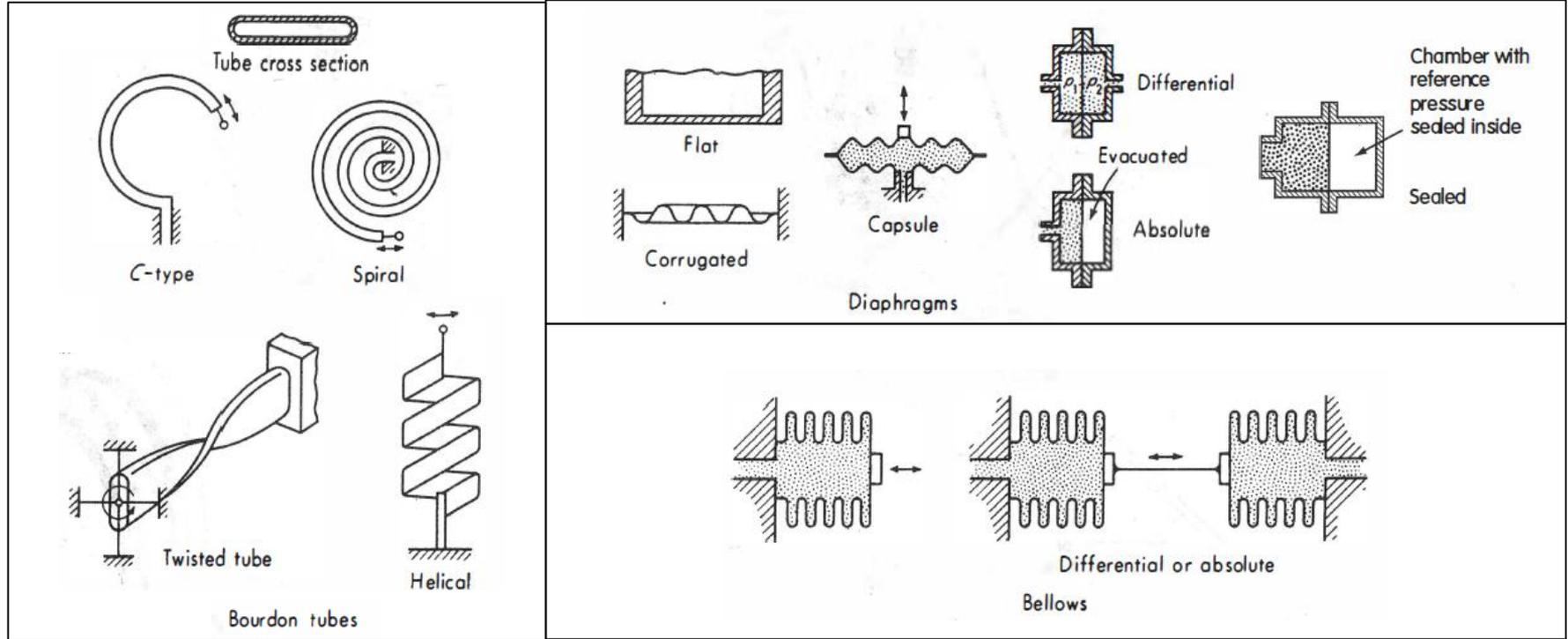
h – differenza di altezza



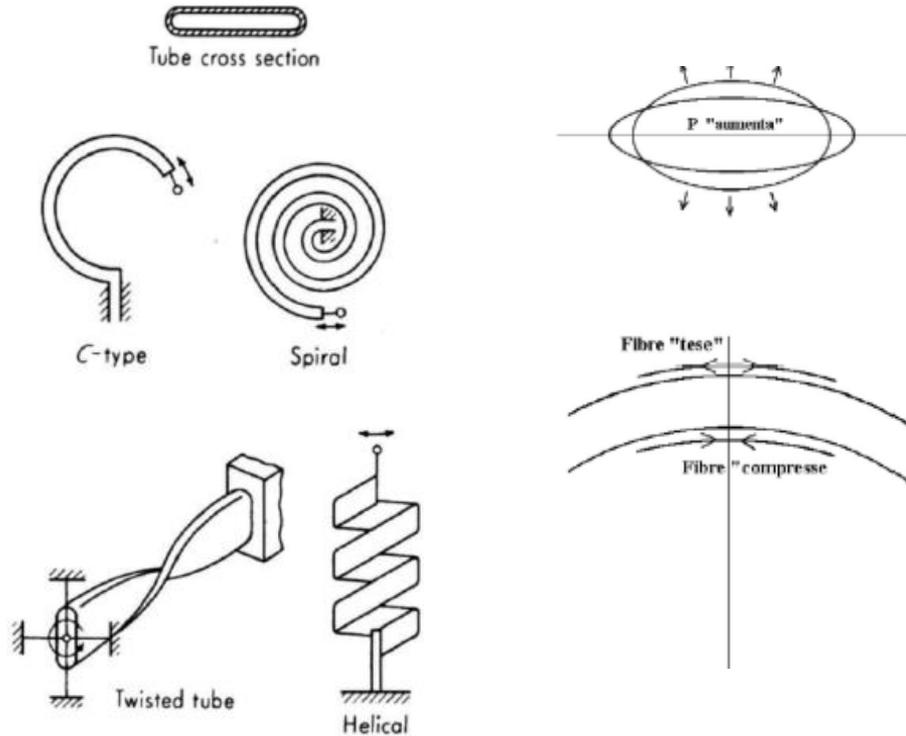
Trasduttori a deformazione elastica

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.

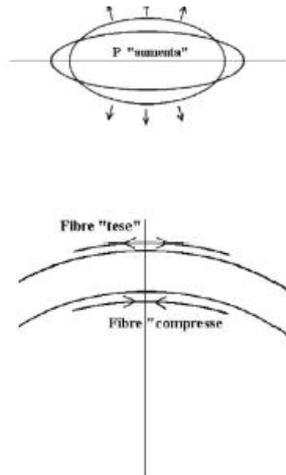
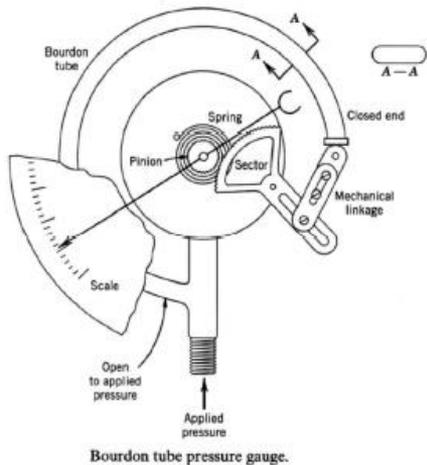
Diverse configurazioni permettono di operare in diversi campi di lavoro (ad esempio le geometrie ad elica o a spirale permettono di operare su intervalli di misura più estesi) e presentano diversi tempi di vita.

Il tubo di Bourdon

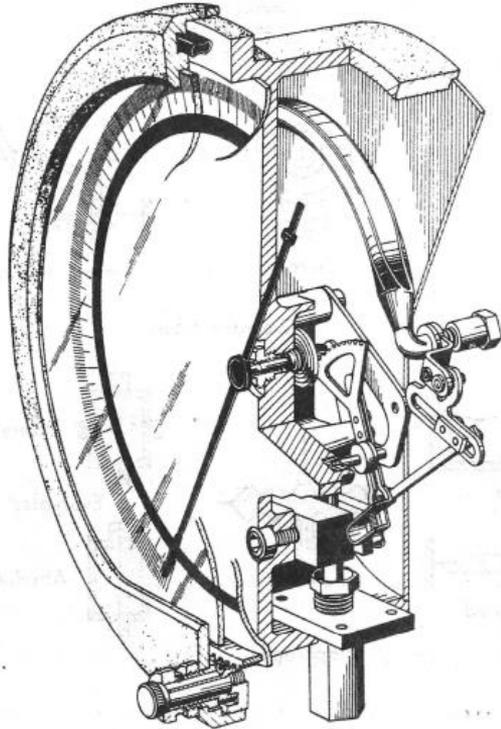
Indipendentemente dalla geometria, la deformazione del corpo sensibile viene codificata in una variazione di posizione. Ad esempio, nella geometria a C, la deformazione induce una traslazione secondo una traiettoria curvilinea dell'estremità libera. Tale spostamento (di natura elastica, in quanto non eccede il limite di elasticità del materiale strutturale) viene convertito da un meccanismo nello spostamento di un ago su un quadrante graduato.

Parti mobili vincolate ad un potenziometro permettono invece l'elaborazione elettronica diretta della misura.

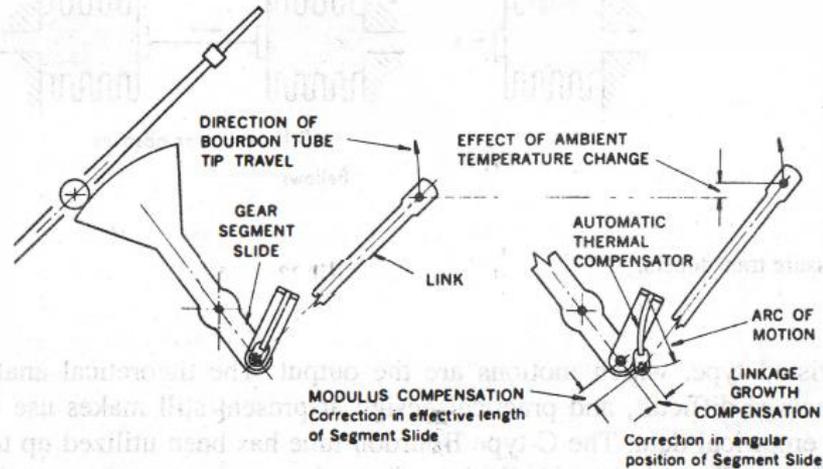
Il campo di applicazioni è di norma attorno ai 7 kPa, ma alcuni tubi di Bourdon possono arrivare fino a 700 MPa.



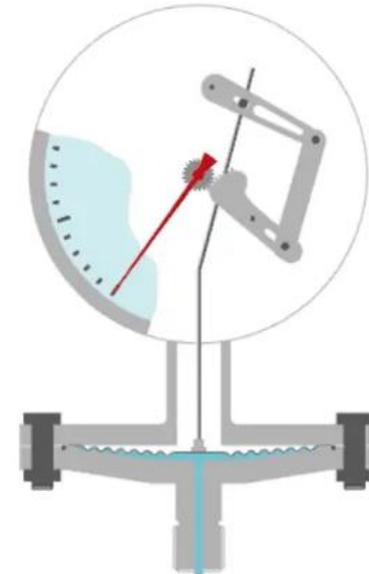
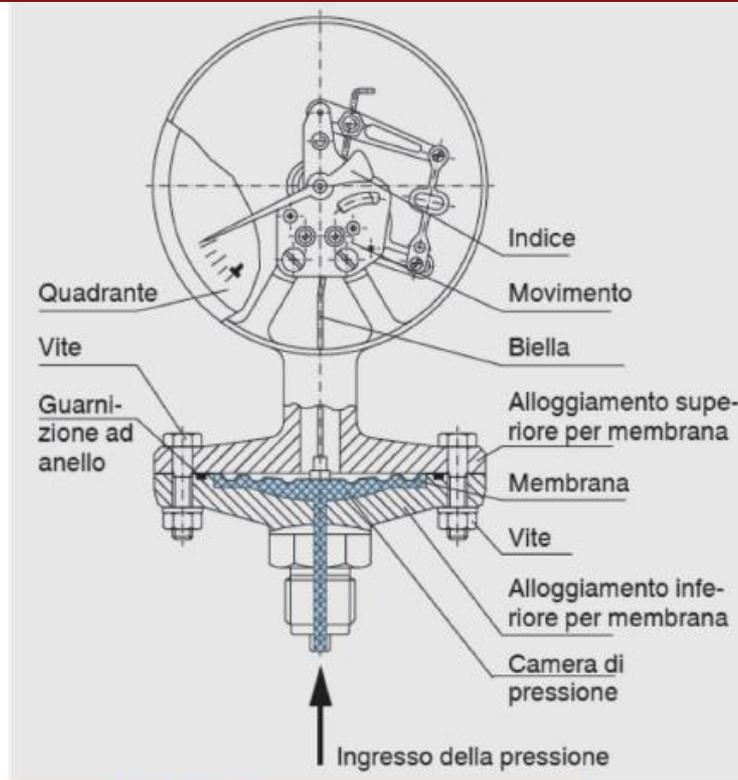
Il tubo di Bourdon



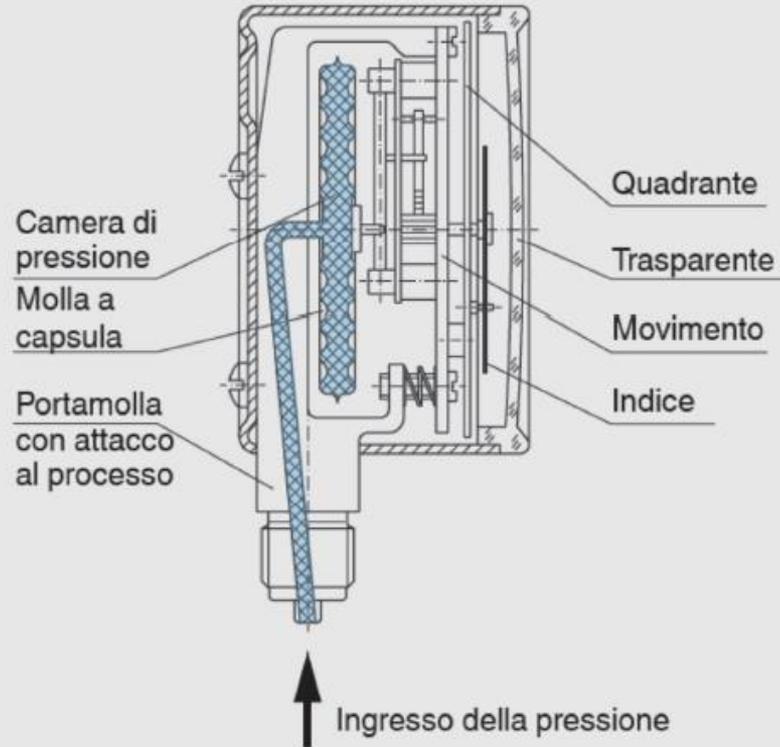
L'architettura del tubo di Bourdon può essere inoltre raffinata introducendo meccanismi in grado compensare meccanicamente eventuali errori dovuti alla variazione di temperatura.



Manometri a membrana



Manometri a capsula

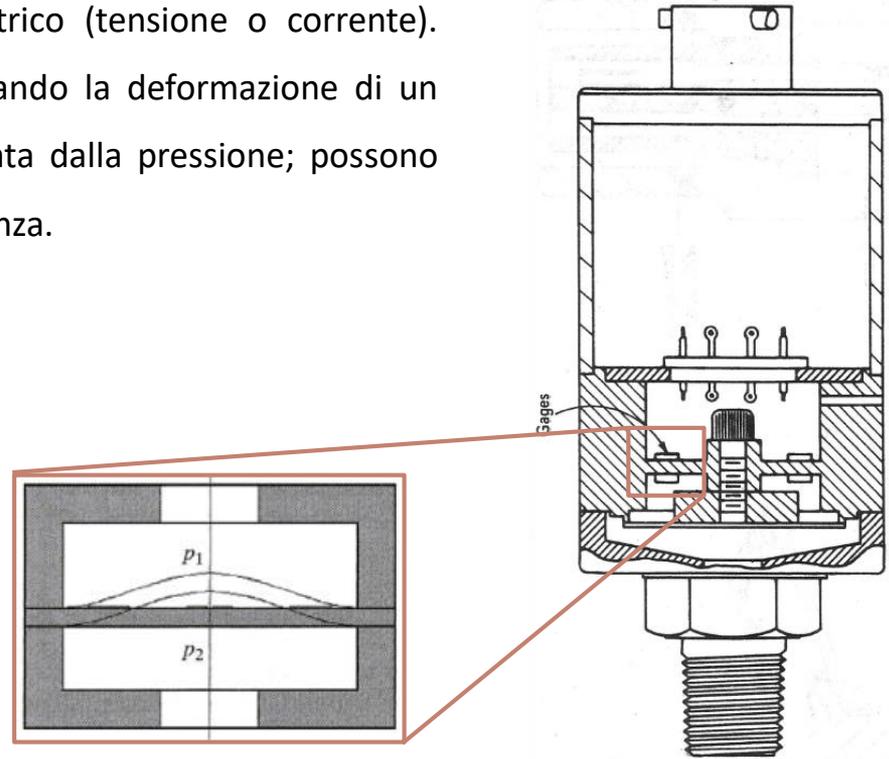




Trasduttori di pressione elettrici

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.



Trasduttori di pressione elettrici

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.

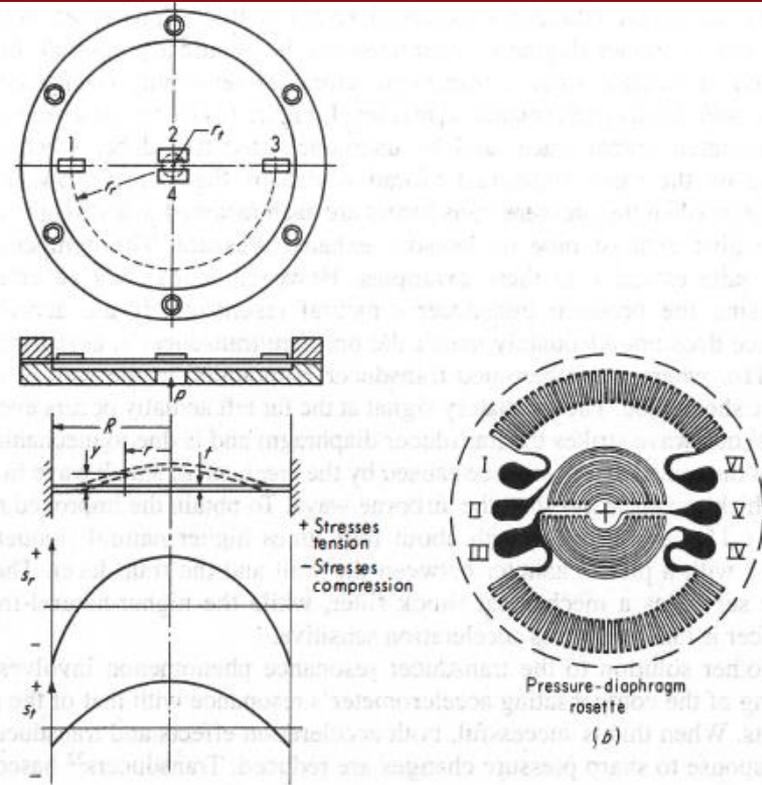


Trasduttori a membrana o diaframma

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:

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

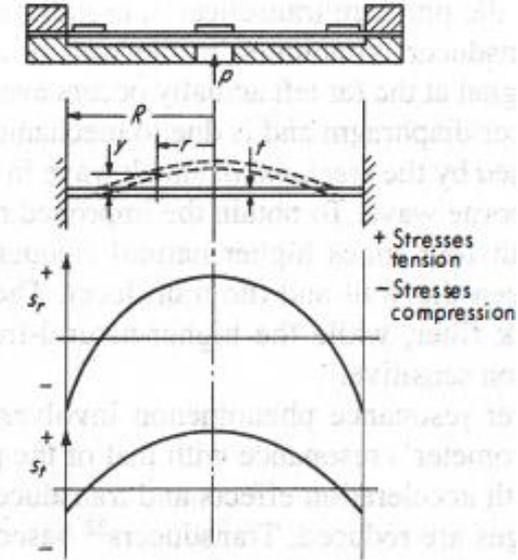
Progettare la membrana in modo tale che la deformazione indotta sia piccola, consente di linearizzare:

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:

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

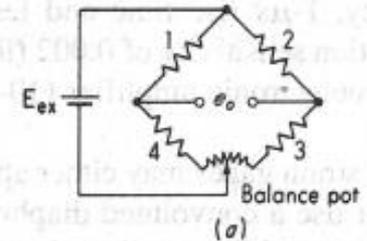
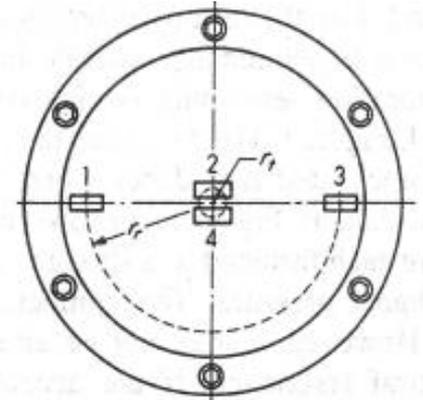


Trasduttori a membrana o diaframma

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 a membrana o diaframma

Per misure dinamiche è infine necessario conoscere la più bassa frequenza propria (anche detta fondamentale) della membrana; per una membrana vincolata ai bordi, la più bassa pulsazione propria è data da:

$$\omega_n = \frac{10.21}{CR^2} \sqrt{\frac{Et^2}{12\rho_d(1-\nu^2)}}$$

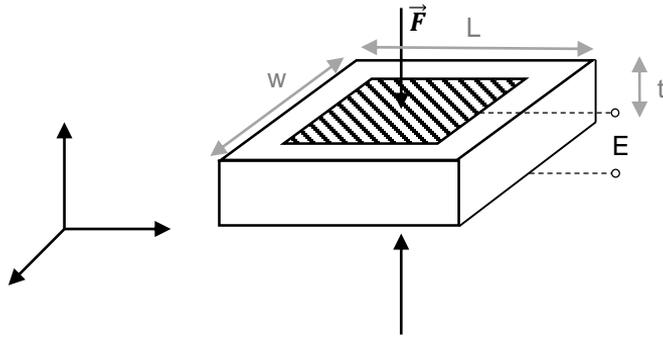
Dove

$$C = \sqrt{1 + 0,669 \frac{\rho_f R}{\rho_d t}}$$

Dove ρ_f e ρ_d sono rispettivamente le densità di fluido e membrana. In condizioni reali la pulsazione propria può deviare dal valore teorico a causa di diversi fattori, quali vincoli ai bordi non perfettamente rigidi, l'impiego del sensore con fluidi che introducono un'inerzia nella vibrazione.

I trasduttori basati sull'uso di estensimetri sono infine altamente integrabili in sistemi MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems)

Trasduttori piezoelettrici



Nei trasduttori piezoelettrici, la polarizzazione indotta dalla modifica del dipolo di polarizzazione, porta alla conseguente migrazione di

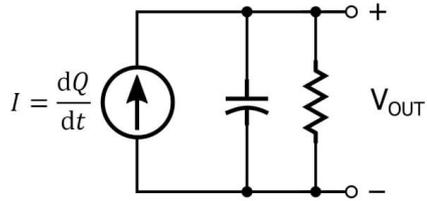
carica che induce a sua volta una differenza di potenziale: $E = \frac{Q}{C}$.

Questo effetto è sensibile alla direzione.

Come visto in precedenza, gli elementi piezoelettrici sono caratterizzati dai parametri g (campo elettrico / stress applicato) e d (carica generata / forza applicata); si ricorda che:

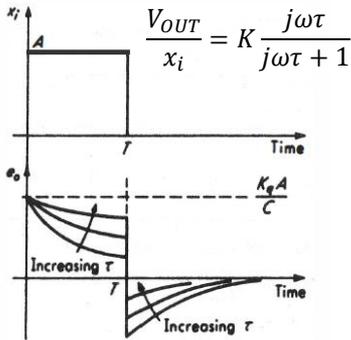
$$g_{i,j} = \frac{E/t}{F/wL} = \frac{EC}{F\varepsilon} = \frac{Q}{F\varepsilon} = \frac{d_{i,j}}{\varepsilon}$$

Trasduttori piezoelettrici



$$K_q \left(\frac{dx_i}{dt} \right) = \frac{dQ}{dt} = i = i_C + i_R$$

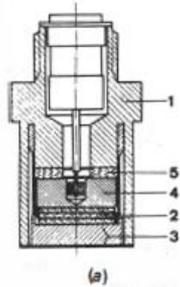
$$C \left(\frac{dV_C}{dt} \right) = I - i_R = K_q \left(\frac{dx_i}{dt} \right) - \frac{V_{OUT}}{R}$$



Ricordando poi che l'elemento sensibile può essere modellato dal circuito elettrico composto da un generatore di corrente e un circuito RC parallelo e che la risposta è evanescente nel tempo: il condensatore si carica con la corrente generata dallo spostamento di carica all'interno del materiale e si scarica sulla resistenza del circuito nel tempo definito dalla costante tempo $\tau = RC$.

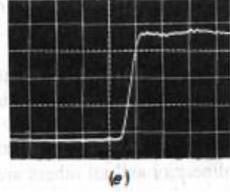
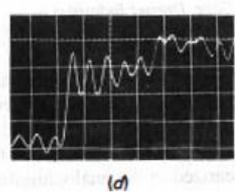
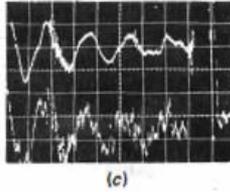
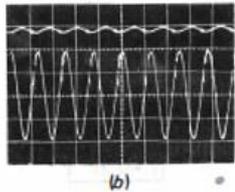
Questo fatto implica che tale tipologia di sensore non possa essere impiegato per misure statiche.

Trasduttori piezoelettrici



- 1- involucro
- 2- dischi di quarzo sensibili alla pressione
- 3- membrana
- 4- masse di compensazione
- 5- dischi di quarzo di compensazione

La frequenza propria dei sensori piezoelettrici va opportunamente scelta in base all'ambiente di misura. Difatti, si prenda a titolo di esempio un trasduttore di pressione installato su un dispositivo soggetto a forti vibrazioni e dotato di un accelerometro in grado di compensare le vibrazioni stesse. Il sistema di compensazione interno non è infatti in grado di compensare le vibrazioni trasversali (b, c). Disaccoppiare il sistema di compensazione non può sempre aiutare causa il manifestarsi di eventuali effetti di risonanza (d), che possono essere rimossi solo utilizzando un trasduttore con frequenza propria superiore (e, 4τ).



Trasduttori piezoelettrici

Vantaggi

- Non richiedono alimentazione supplementare
- Buona risposta in frequenza ($\tau = RC$), le cui caratteristiche vanno bilanciate in base alle specifiche di sensibilità ($K = K_q/\tau$)
- Compatti, di facile integrazione (differenti architetture progettuali possono essere impiegate)

Svantaggi

- Non possono essere impiegati per misure statiche
- Le prestazioni possono essere influenzate da elevate escursioni termiche
- Richiedono un circuito di amplificazione esterno

Applicazioni

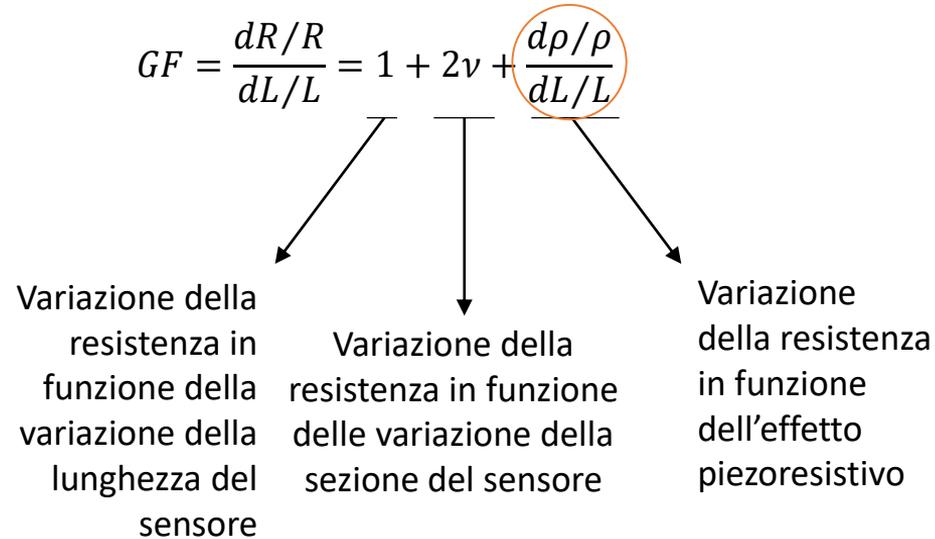
- Microfoni / auricolari
- *Imaging* ad ultrasuoni nelle apparecchiature ospedaliere
- Sismografi
- Analisi di vibrazioni
- Misure di pressione dinamiche



www.pcb.com

Trasduttori piezoresistivi

Abbiamo visto come la variazione della resistenza di un materiale conduttore soggetto a deformazione sia dipendente:



Mentre le variazioni della resistenza in funzione delle deformazioni meccaniche sono sfruttate nella realizzazione di estensimetri, i trasduttori piezoresistivi basano il loro principio di funzionamento sulla variazione della resistività elettrica.

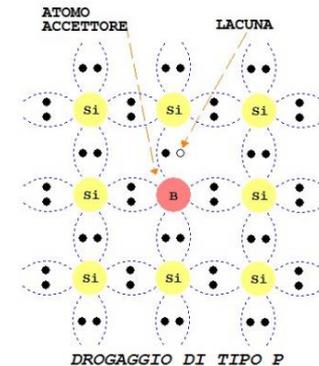
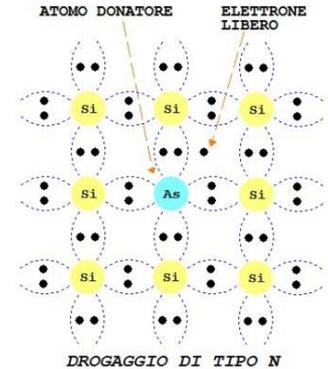
Trasduttori piezoresistivi

La variazione di resistività si esprime solitamente tramite il coefficiente di piezoresistività longitudinale:

$$\pi_1 = \frac{d\rho/\rho}{dL/L} = \frac{d\rho/\rho}{\varepsilon}$$

Per questa classe di sensori si utilizzano solitamente materiali semiconduttori opportunamente drogati in modo da avere una variazione positiva (drogaggio di tipo p) o negativa (drogaggio di tipo n) della resistività.

Il drogaggio della struttura cristallina del semiconduttore consiste nell'aggiunta di elementi con numero atomico inferiore (drogaggio di tipo p) o superiore (tipo n) a quello del semiconduttore intrinseco. Tale modifica comporta una variazione nella distribuzione delle bande di conduzione e di valenza (variando il livello ed il grado di sovrapposizione degli orbitali atomici).



Trasduttori piezoresistivi

In questo modo è regolare la quantità di carica coinvolta nella conduzione elettronica; si ricorda infatti come, per i semiconduttori:

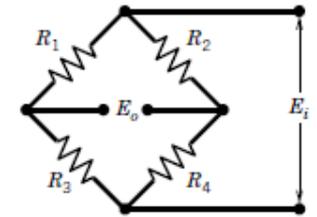
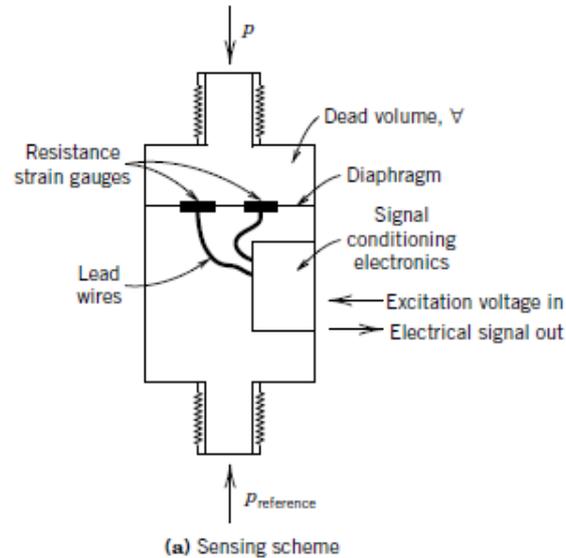
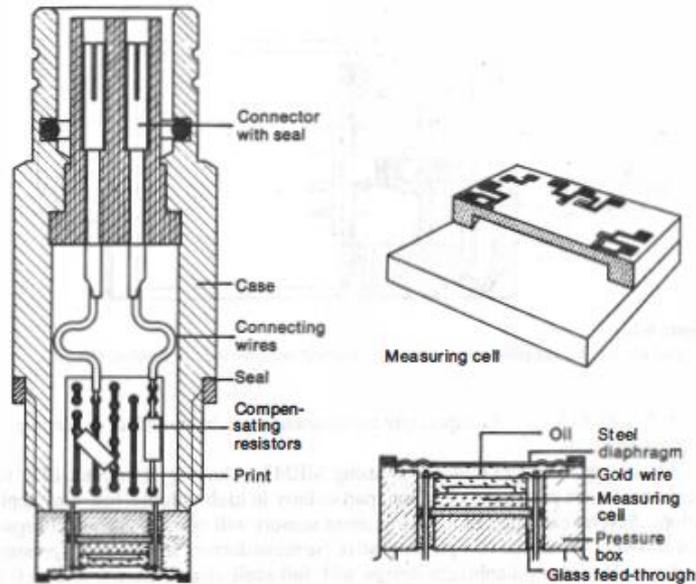
$$\rho = \frac{1}{e \cdot N_i \cdot \mu_m}$$

e: carica dell'elettrone, N_i : numero di portatori, μ_m : mobilità del portatore di carica

Anche per questa classe di trasduttori la linearità è più semplice da mantenere per bassi valori di resistività e per piccole pressioni.

Trasduttori piezoresistivi

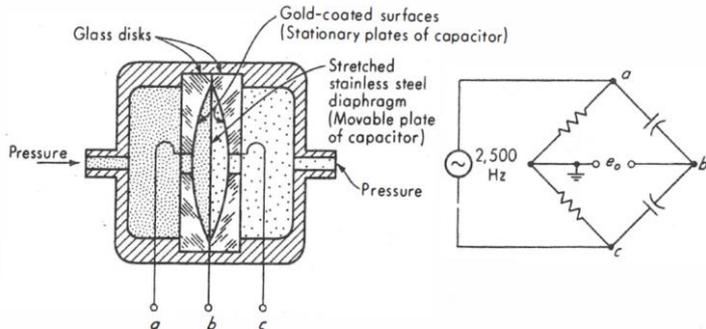
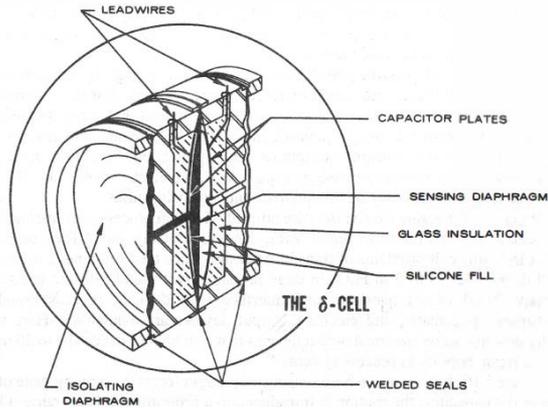
I trasduttori piezoresistivi (anche detti estensimetri a semiconduttore) sono caratterizzati da elevati *gage factor* e sono facilmente integrabili in circuiti integrati. L'acquisizione con circuiti a ponte permette di introdurre degli elementi di compensazione già all'interno del sensore



(b) Bridge-strain gauge circuit for pressure diaphragms.

Figure 9.12 Diaphragm pressure transducer.

Altre metodologie di trasduzione della pressione



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 ($C = \varepsilon A/x$).

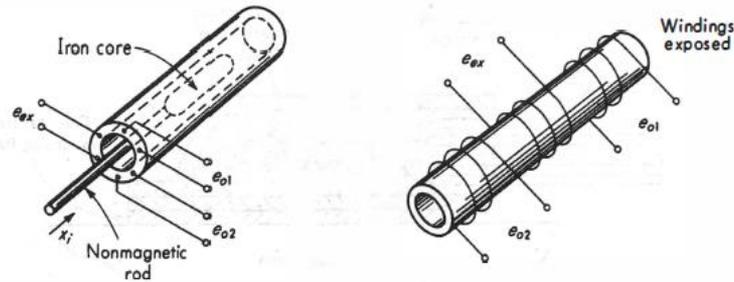
Il movimento della membrana mobile viene trasdotto in una variazione di un parametro elettrico (corrente o tensione). La trasduzione viene fatta per mezzo di un circuito a ponte alimentato in corrente alternata.

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

Altre metodologie di trasduzione della pressione

Trasduttori induttivi

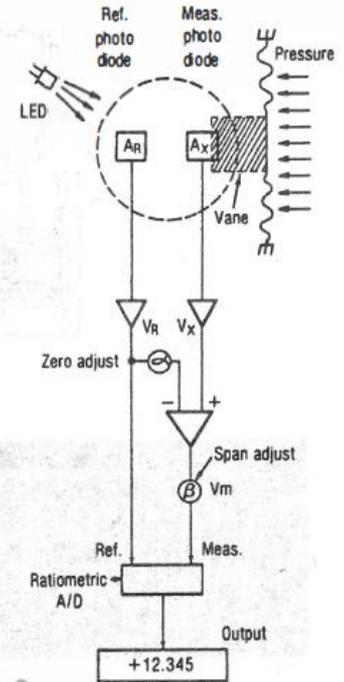
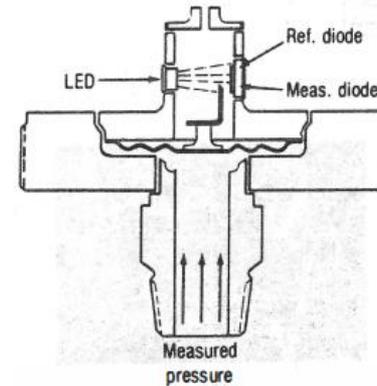
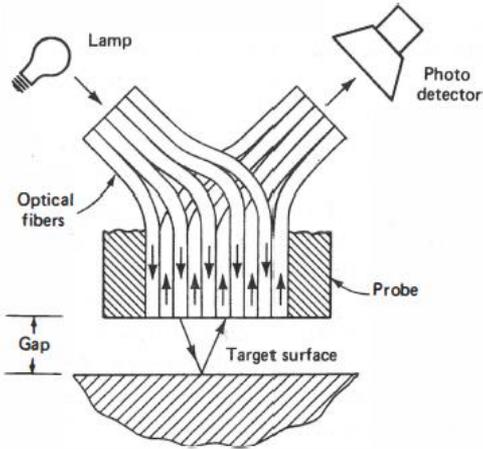
La misura di pressione, rilevata tramite misura di spostamento può anche far uso di sensori a induttanza variabile ($L = \mu N^2 A/L$) per trasdurre la pressione in variazione di parametri elettrici ($v(t) = L di(t)/dt$).



Altre metodologie di trasduzione della pressione

Trasduttori ottici ed elettroottici

Se opportunamente progettati costituiscono delle soluzioni ottimali per la realizzazione di sensori che devono operare per periodi di tempo prolungato in ambienti ostili





Misure di pressione di fluidi in movimento

Misure di pressione nei 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.

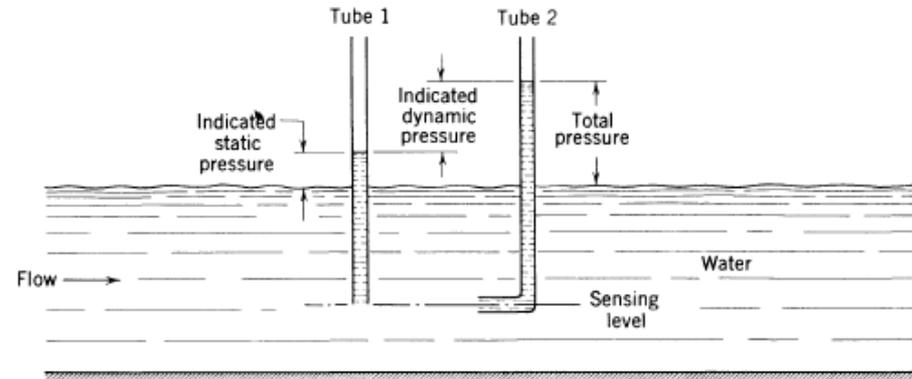


FIGURE 17.23 Basic Pitot-tube method of sensing static, dynamic, and total pressures.

Misure di pressione nei fluidi in movimento

Tale contributo è funzione delle pressioni statica e dinamica:

$$p_0 = p \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right)$$

Dove $k = c_p/c_v$ è il rapporto dei calori specifici del fluido, $M = v/a$ è il numero di Mach (dato dal rapporto tra la velocità caratteristica adiabatica, $a = \sqrt{kRT}$ e v è la velocità del flusso.

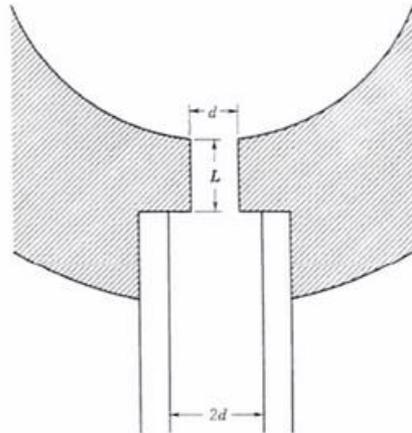
Nel caso di fluidi incomprimibili (e per numeri di Mach < 0.3), l'equazione si può semplificare:

$$p_0 = p + \frac{\rho v^2}{2}$$

Misura di pressione statica

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

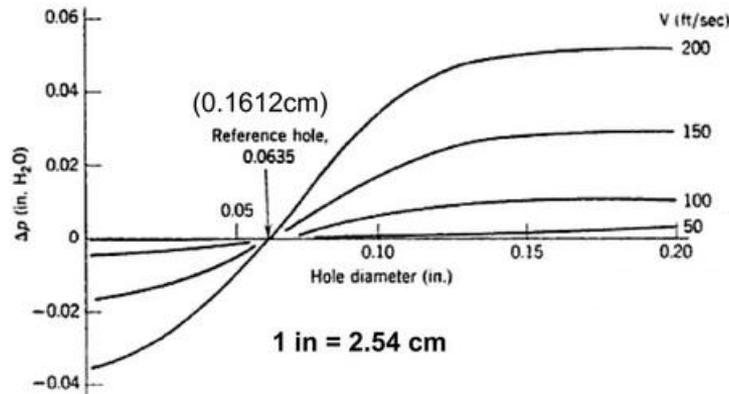
In condizioni statiche, la pressione viene rilevata tramite la connessione di un sensore di pressione con il fluido, che avviene per mezzo di fori (*wall taps*) perpendicolari alla sezione della condotta.



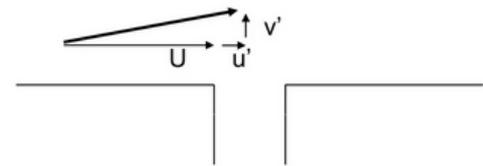
A recommended static pressure wall-tap geometry $1.5 < L/d < 6$

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.

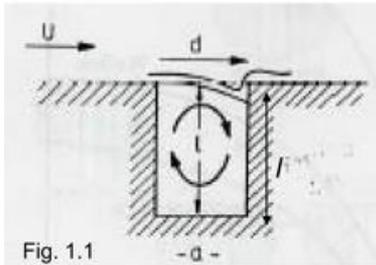
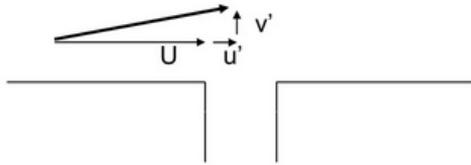


$$\frac{v'^2}{U^2} = 0.25\% - 0.5\% \text{ of dynamic pressure}$$



Misura di pressione statica

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

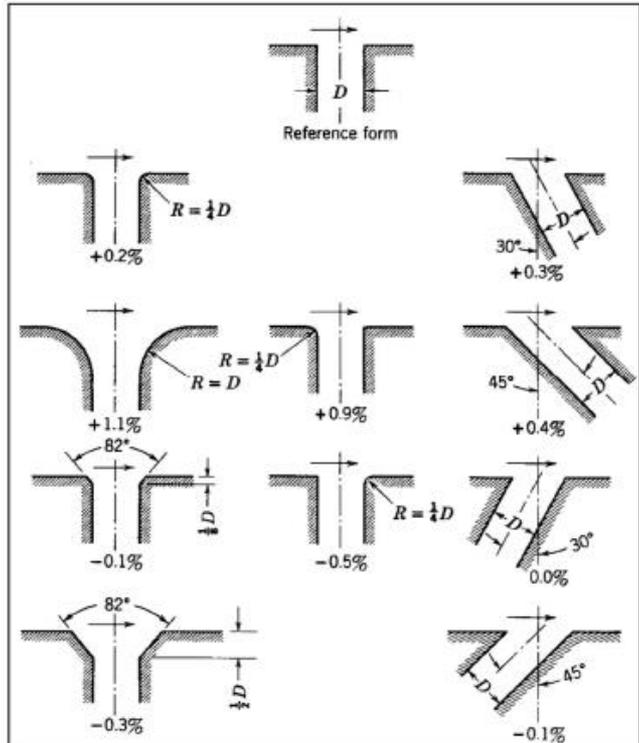


L'errore di misura è infatti dovuto alla sollecitazione di taglio (τ) del fluido che passa sopra il foro dedicato alla misura della pressione statica. Tale sollecitazione induce la formazione di micro vortici all'interno della cavità di misura che producono un aumento della pressione statica misurata.

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

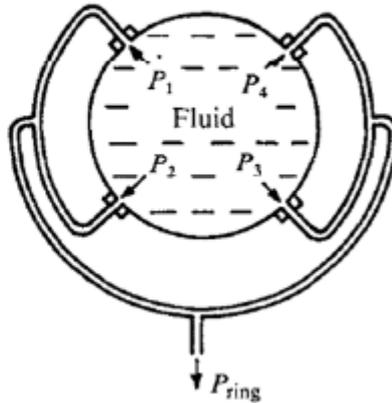
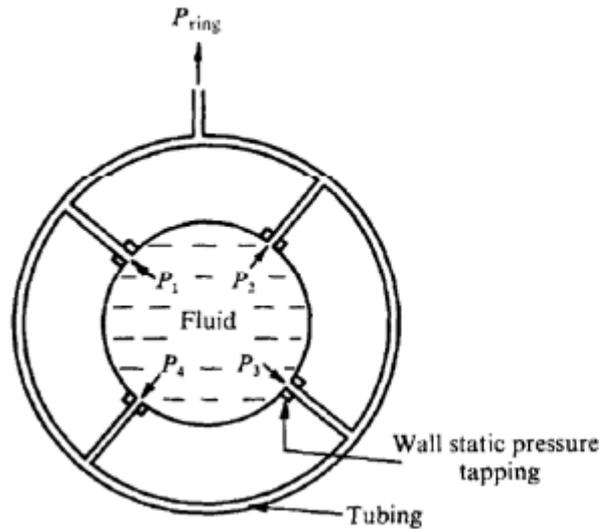
L'errore generato è dipendente dalla geometria della presa di pressione e dal numero di Reynolds.

Misure di pressione statica nei flussi



L'errore di misura è infine dipendente dall'inclinazione e dal grado di smussatura dello spigolo del foro. Mentre si è detto che le dimensioni del foro possono introdurre un errore nelle misure di pressione statica, la presenza di bordi più o meno svasati introducono un errore nella misura della pressione dinamica

Misure di pressione statica nei flussi



L'accuratezza di una misura statica dipende principalmente dalla posizione dei punti di misura.

Un corretto posizionamento permette di compensare le differenze di pressione che si possono verificare tra l'ingresso della presa di pressione e quelle dopo ai lati della condotta

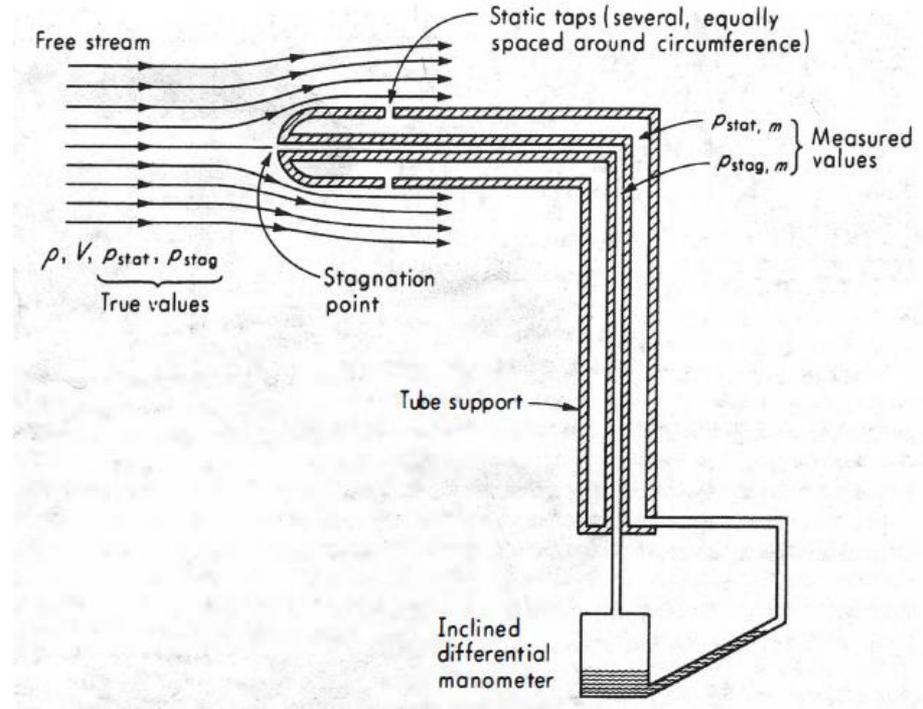
Normativa ISO 5167-1

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.

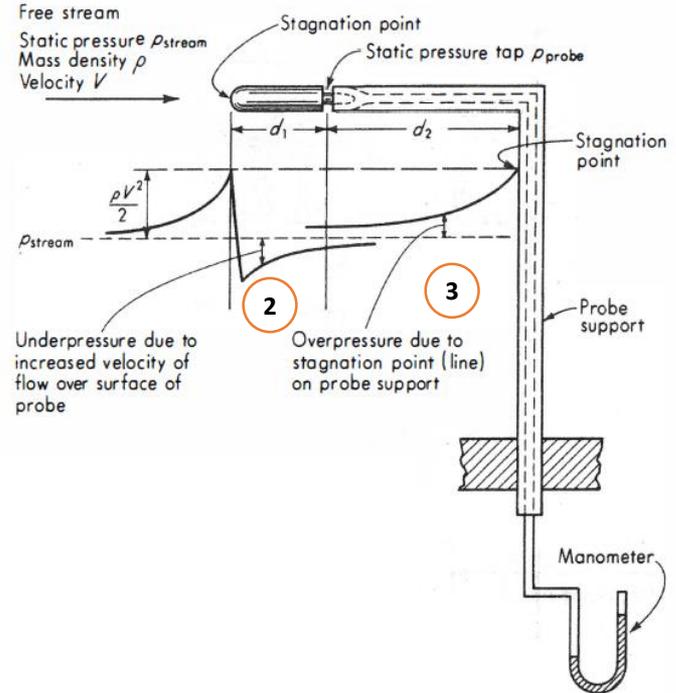
Possibili fonti d'errore per la misura di pressione statica sono date da:

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)

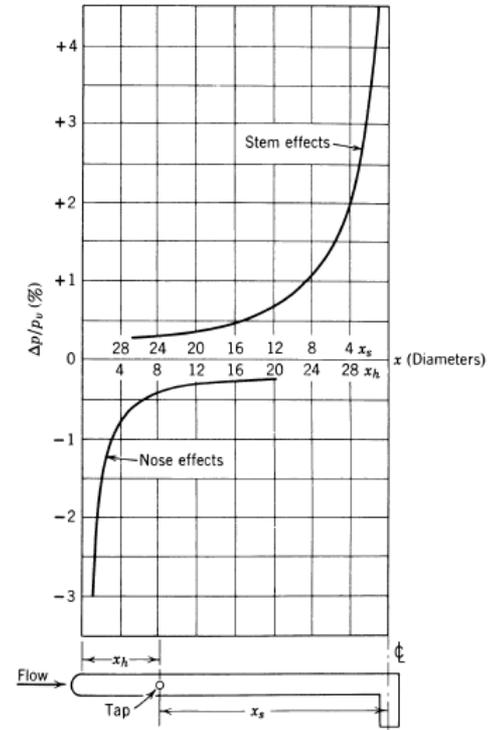
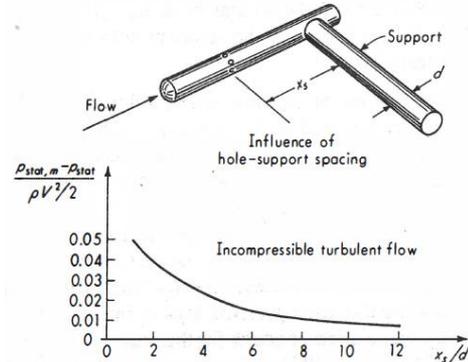
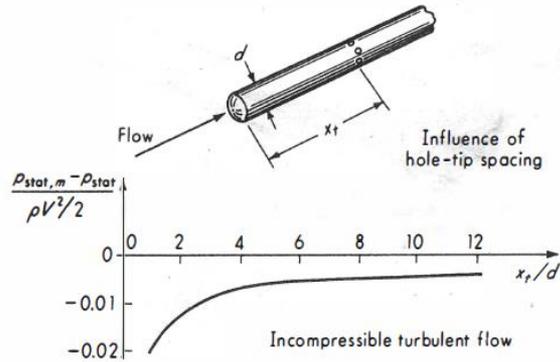


FIGURE 17.12 Static tube characteristics. x_t —position of taps from centerline of stem; x_h —position of taps from base of nose. (Source: From Dean et al. [41].)

Misure di pressione totale

La misura della pressione nel punto di ristagno permette quindi di misurare la pressione totale di fluidi in movimento. Il concetto alla base del funzionamento del tubo di Pitot può così essere esteso a corpi con profilo aerodinamico noto. Il profilo può così essere ottimizzato in modo tale da considerare trascurabili sia gli effetti d'attrito che di trasferimento di calore.

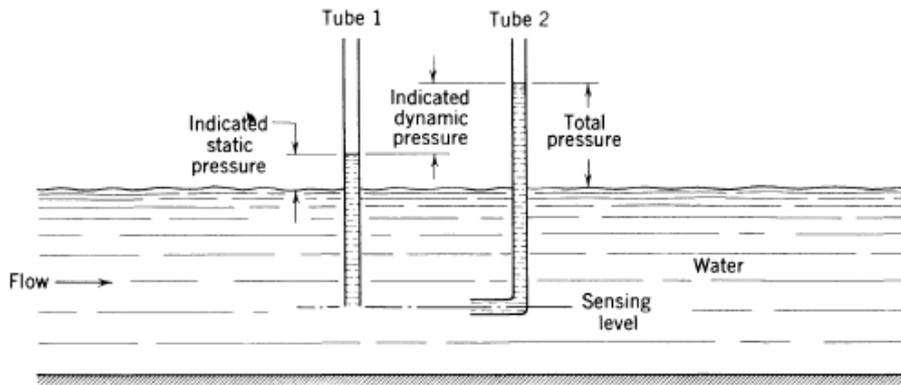


FIGURE 17.23 Basic Pitot-tube method of sensing static, dynamic, and total pressures.

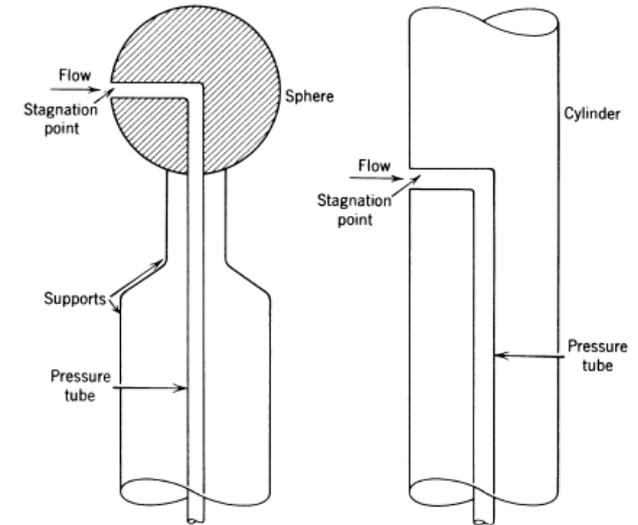
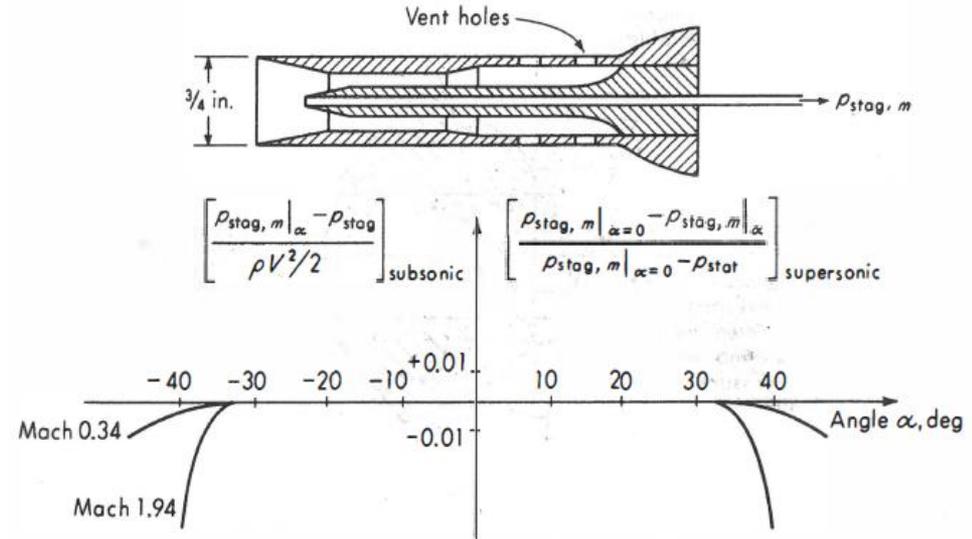
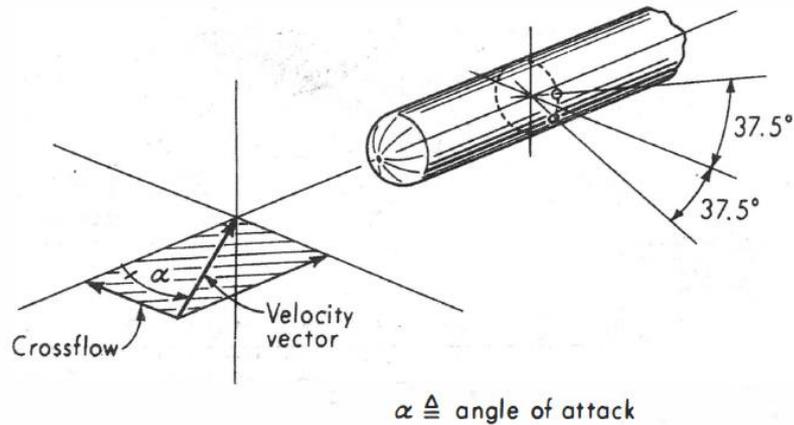


FIGURE 17.24 Aerodynamic total pressure probes.

Misure di pressione totale

Adottando opportune soluzioni progettuali, nel tempo si è pertanto sviluppata una notevole varietà di sonde, capaci di operare anche in condizioni di forte disallineamento, come rappresentato dall'esempio in figura



Misure di pressione totale

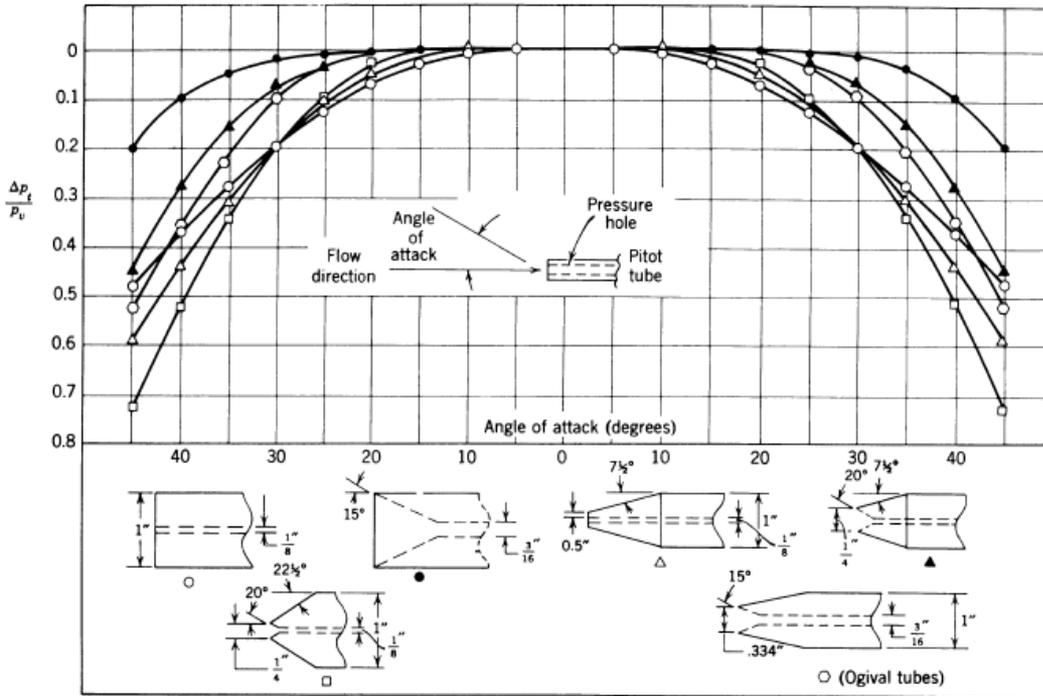


FIGURE 17.25 Characteristics of several Pitot tubes in regard to flow alignment. (Source: After Gracey et al. [29].)

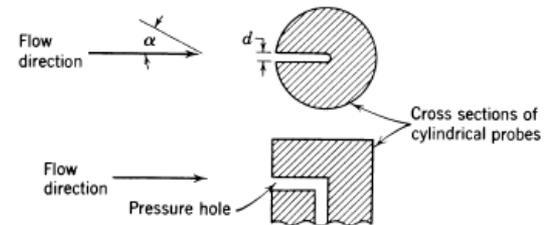
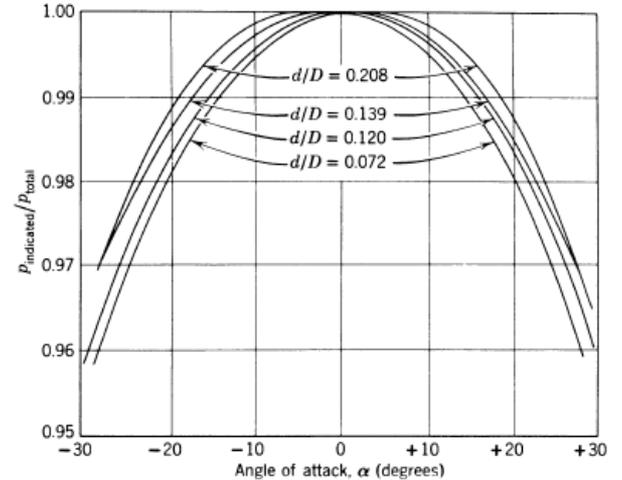


FIGURE 17.26 Variation of total pressure indication with angle of attack and hole size for cylindrical probes perpendicular to flow.

Misure di pressione totale

A margine di ciò si sottolinea come, in aggiunta al disallineamento, fonti di errore sono legate alla presenza di campi di velocità bidimensionali e tridimensionali (nei quali la velocità non è uniforme), che portano alla misura di un valore di pressione legato al valor medio di velocità associato al profilo di velocità stesso. Infine, l'errore può anche essere indotto dalla viscosità del fluido.

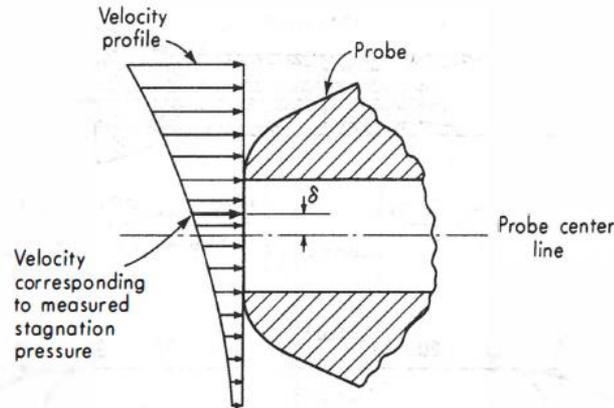
La viscosità può essere valutata inserendo il fattore di correzione:

$$C = 1 + \frac{4}{N_R} = 1 + \frac{4\mu}{\rho r v}$$

(legato al numero di Reynolds, con $10 < N_R < 100$; r : raggio della sonda)
all'interno della relazione che descrive la forma della pressione totale:

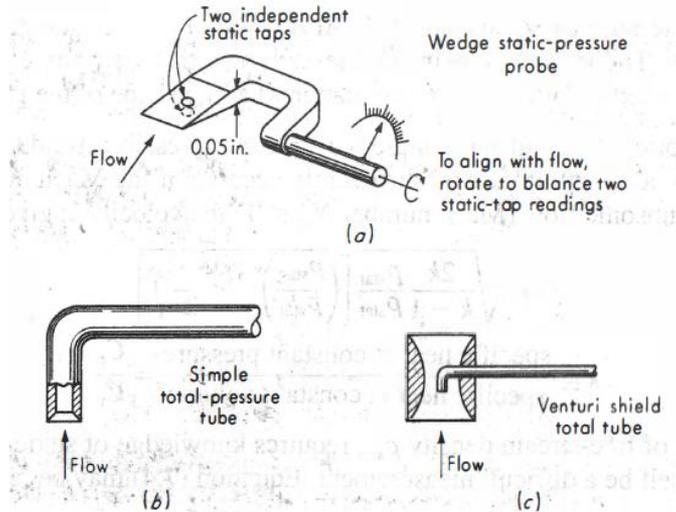
$$p_{stag} = p_{stat} + C \frac{\rho v^2}{2}$$

Mentre l'effetto del N_R sulla pressione totale è pari al 40% (4%) per N_R pari a 10 (100), tale valore diventa trascurabile per $N_R > 500$

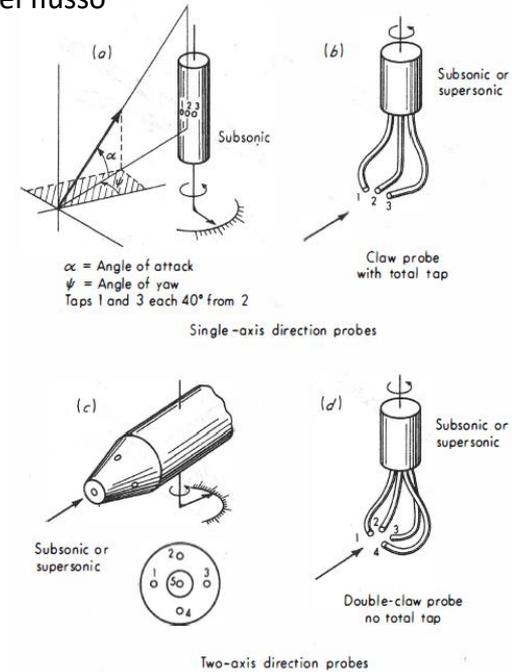


Misure di pressione totale

Le pressioni statica e totale possono essere sia misurate con la stessa sonda (tubo di Pitot) che con sonde indipendenti.



Soluzioni progettuali più articolate permettono la misura della direzione del flusso



Sonde direzionali

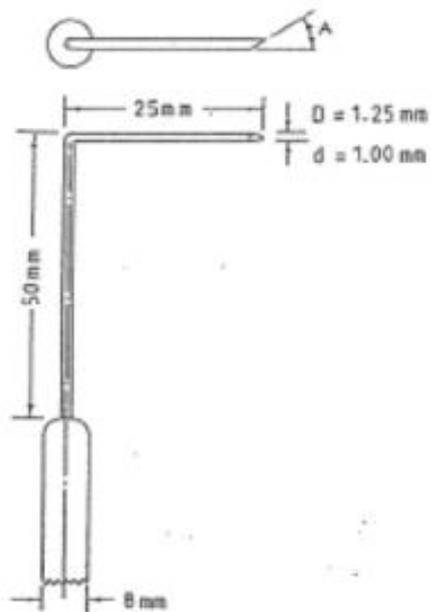


Fig. III.32 - Slanted tube geometry for yaw angle measurement

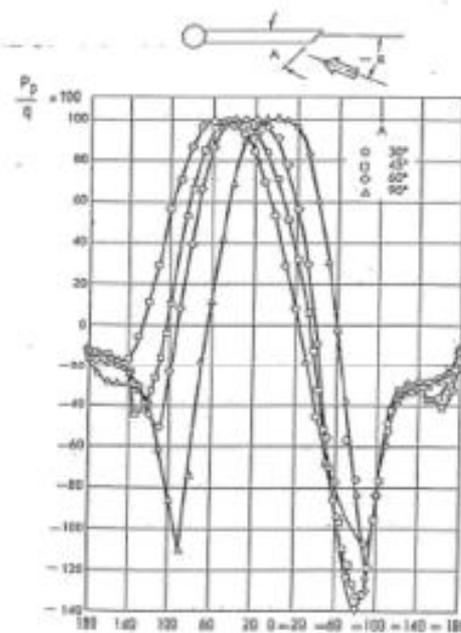
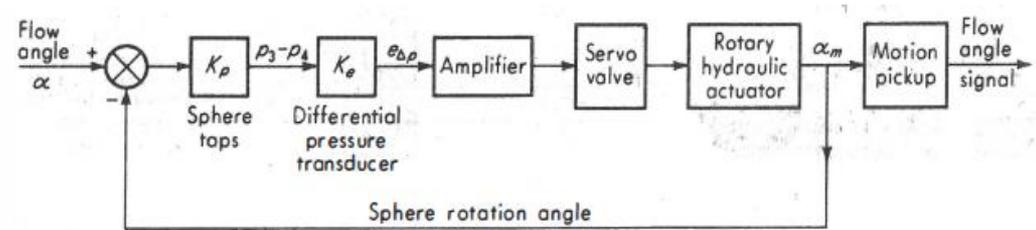
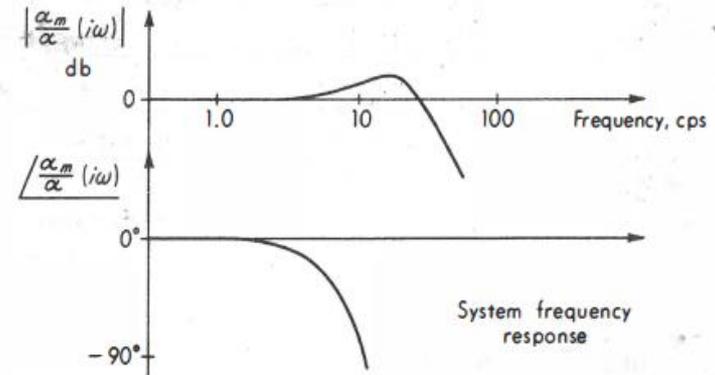


Fig. III.33 - Indicated pressure versus yaw angle of different slanted tube probes [9]

Sonde direzionali



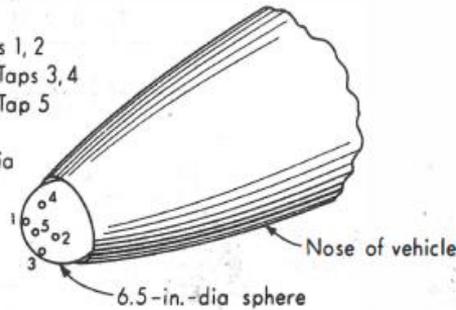
Angle-of-attack servo system
(Angle-of-sideslip system functionally identical)



Angle of sideslip → Taps 1, 2
 α = Angle of attack → Taps 3, 4
 Stagnation pressure → Tap 5

Taps 1, 2, 3, 4 → 0.188 in. dia
 each 42° from
 stagnation point

Tap 5 → 0.5 in. dia



Sonde direzionali – coefficienti caratteristici

Le sonde sono caratterizzate attraverso un'operazione di taratura, durante la quale la sonda è immersa in un flusso noto in termini di velocità, direzione, pressione statica e totale. Ruotando la sonda sul suo asse caratteristico e rilevando le pressioni si definiscono le **curve di calibrazione** utilizzando dei coefficienti caratteristici.

Per la riduzione dei dati delle sonde tre fori si possono utilizzare due seguenti serie di coefficienti da utilizzare uno con procedura iterativa e l'altro con procedura di riduzione diretta.

Siano

- P_d pressione del foro destro della sonda
- P_s pressione del foro sinistro della sonda
- P_C pressione del foro centrale della sonda
- P_t pressione totale
- P pressione statica

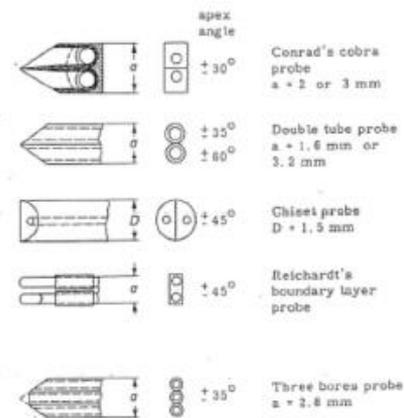
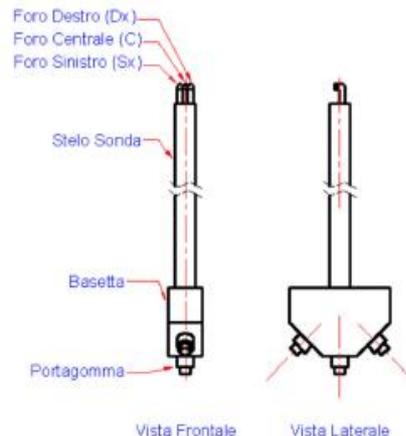


Fig. III.34 - Two dimensional flow directional probes [4]



Coefficienti per procedura iterativa

$$C_b = \frac{P_d - P_s}{P_t - P} \quad C_{ps} = \frac{P_d + P_s - P}{P_t - P} \quad C_{pt} = \frac{P_C - P_t}{P_t - P}$$

Coefficienti per procedura diretta

$$C_{bt} = \frac{P_d - P_s}{P_C - \frac{P_s + P_d}{2}} \quad C_{ps1} = \frac{P_C - P_t}{P_t - P} \quad C_{pt1} = \frac{P_C - \frac{P_s - P_d}{2}}{P_t - P}$$

Sonde direzionali 3D

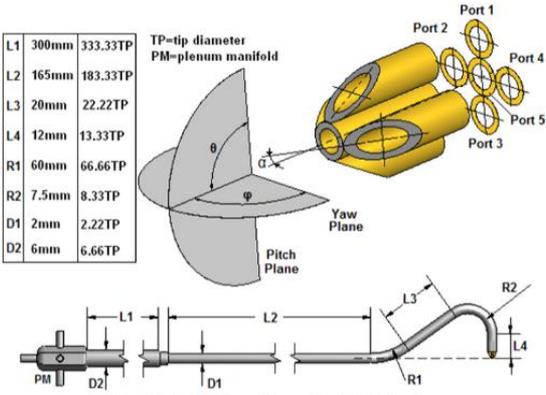


Fig. 1. Exterior dimensions and characteristics of the 5-hole probe.

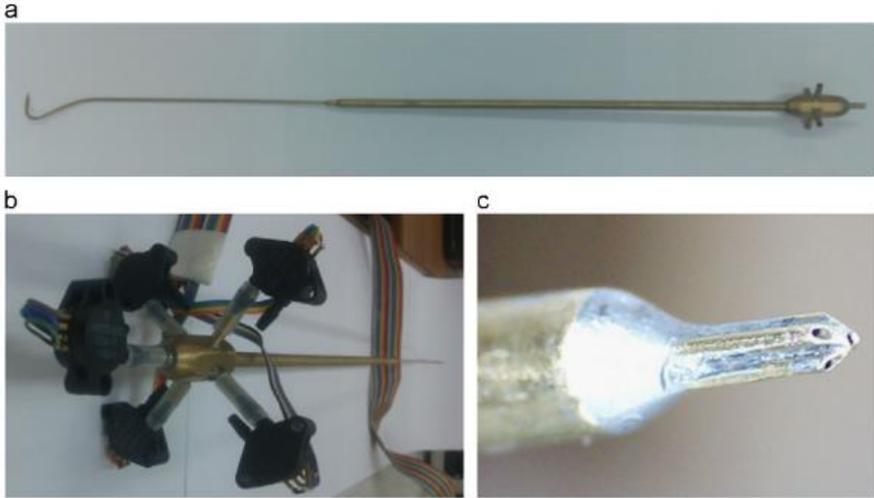


Fig. 2. (a) The fabricated 5-hole probe, (b) close view of the plenum manifold equipped with the pressure sensors, and (c) close up microscope view of the probe's tip.

Sonde direzionali 3D

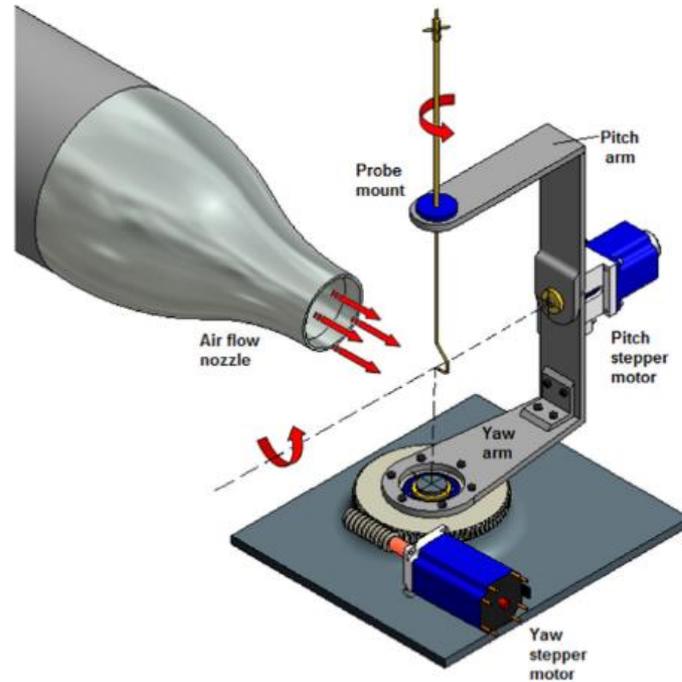


Fig. 4. The yaw-pitch traversing mechanism and air flow nozzle (i.e. the calibration rig).

Sonde direzionali 3D

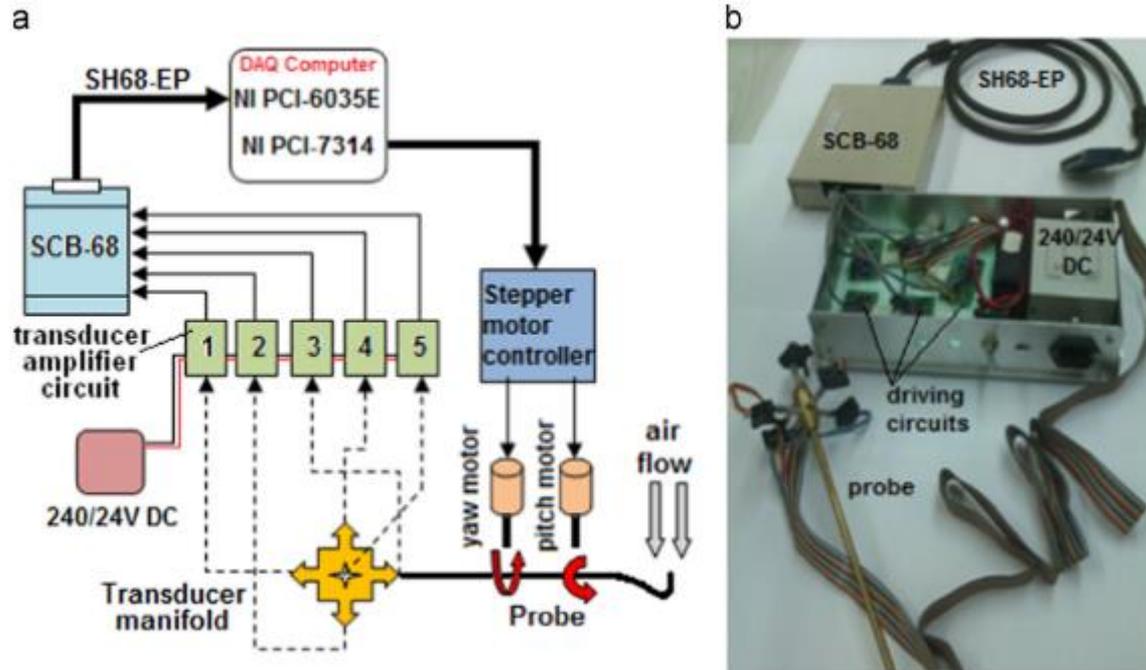


Fig. 3. (a) Components diagram for the data acquisition system and yaw-pitch traversing system and (b) actual view of the probe and its electronic components.

Sonde direzionali 3D

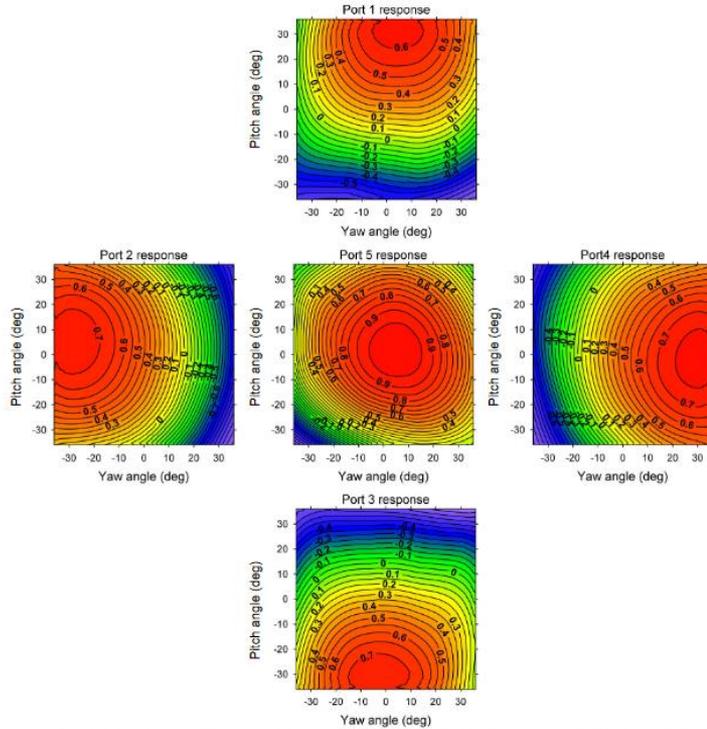


Fig. 6. Non-dimensional calibration coefficient iso-lines from the 5 port data recorded by the probe with respect to the yaw and pitch angles.

$$\text{Pitch angle coefficient : } CP_p = \frac{P_1 - P_3}{P_5 - \bar{P}_{ave}} \quad (1)$$

$$\text{Yaw angle coefficient : } CP_y = \frac{P_4 - P_2}{P_5 - \bar{P}_{ave}} \quad (2)$$

$$\text{Static pressure coefficient : } CP_s = \frac{\bar{P}_{ave} - P_s}{P_5 - \bar{P}_{ave}} \quad (3)$$

$$\text{Total pressure coefficient : } CP_t = \frac{P_5 - P_t}{P_5 - \bar{P}_{ave}} \quad (4)$$

where

$$\bar{P}_{ave} = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4}{4}$$

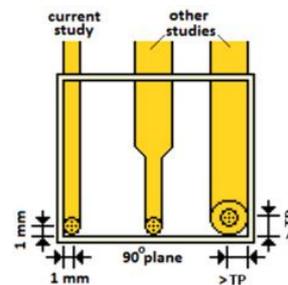


Fig. 11. Illustration of probes attached on the exit 90° plane of the bend duct: left: current study probe position, right: other studies probe position (dimensions not to scale).

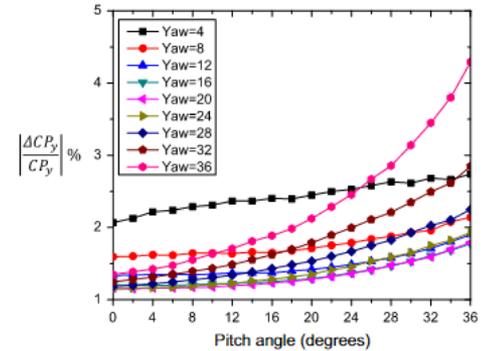


Fig. 9. The percentage error for various yaw (ϕ) and pitch (θ) angles.



Misure di vuoto

Misure 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 (*rough vacuum*, RV) $10^5 \text{ Pa} \div 3 \times 10^3 \text{ Pa}$
- medio vuoto (*medium vacuum*, MV) $3 \times 10^3 \text{ Pa} \div 10^{-1} \text{ Pa}$
- alto vuoto (*high vacuum*, HV) $10^{-1} \text{ Pa} \div 10^{-3} \text{ Pa}$
- alto vuoto spinto (*very high vacuum*, VHV) $10^{-3} \text{ Pa} \div 10^{-7} \text{ Pa}$
- ultra alto vuoto (*ultra high vacuum*, UHV) $10^{-7} \text{ Pa} \div 10^{-10} \text{ Pa}$
- vuoto estremamente alto (*extremely high vacuum*, 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.

Misure di basse pressioni (vuoto) – manometri a diaframma

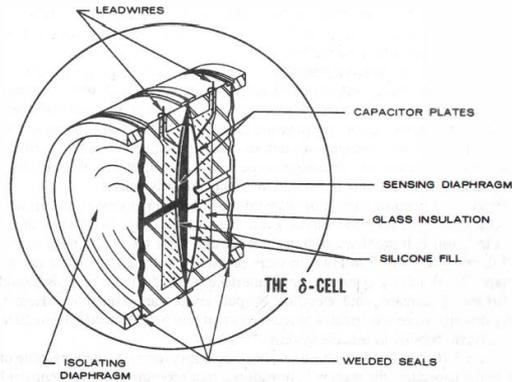


Figure 6.16

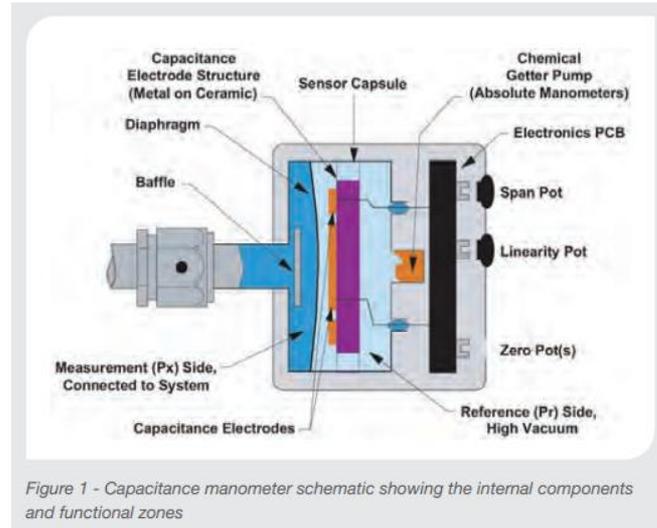
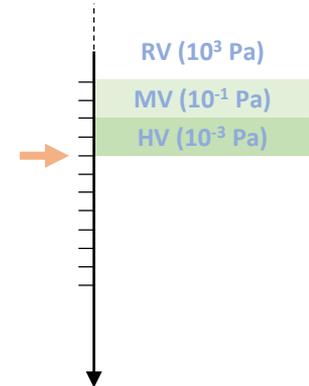


Figure 1 - Capacitance manometer schematic showing the internal components and functional zones

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



Risoluzione: 10^{-5} Pa

Misure di basse pressioni (vuoto) – manometri di McLeod

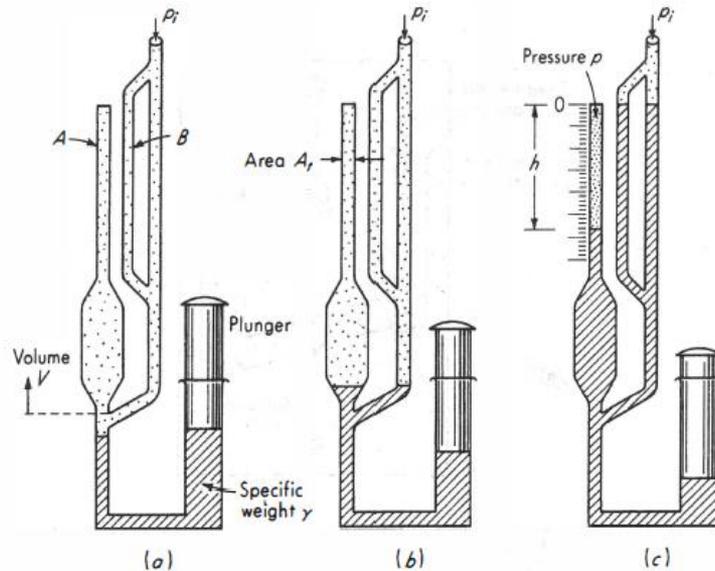


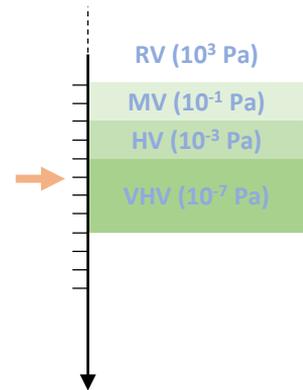
Figure 6.30

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:

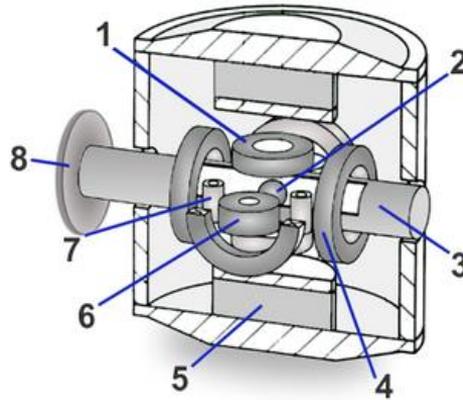
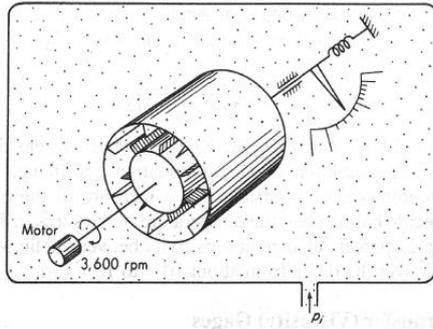
$$p_i V = p A_t h$$

$$p = p_i + h\gamma$$

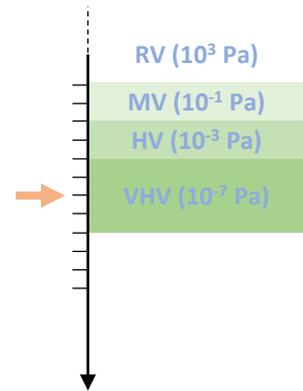
$$p_i = \frac{h\gamma^2}{V - A_t h} \cong \frac{h\gamma^2}{V}; V \gg A_t h$$



Misure 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.

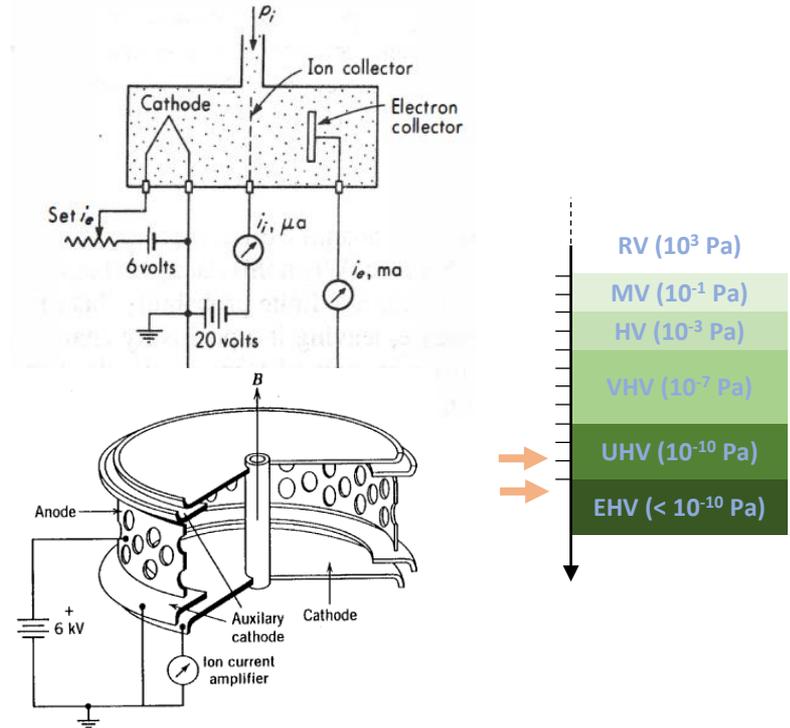
Misure di basse pressioni (vuoto) – manometri a ionizzazione

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

La sensibilità 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



Dipartimento di
**Ingegneria
e Architettura**