



Misura della pressione

PROF. M. De Lucia

- **Versione:** 2.00.00
- **Ultimo aggiornamento:** SETT. 2019
- **Realizzato da:** C.P. Mengoni – De Lucia
- **Originale** “Misure di pressione “ C.Cinelli- Mengoni
- **Riferimenti**
 - “Theory and design for mechanical measurements”, R.S. Figliola, D.E. Beasley, John Wiley & Sons, 1991
 - “Fundamentals of temperature, pressure and flow measurements”, R.P. Benedict, A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons, 1984
 - “Fluid Mechanics Measurements”, R.J. Goldstein, Hemisphere publishing corporation, 1983
 - “Strumenti e metodi di misura”, E. O. Doebelin, Mc GRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS
 - “Measurment System - Application and design”, E. O. Doebelin, Mc GRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS
 - “Measurements techniques in fluid dynamics – An Introduction”, Annual Lecture series, Von Karman Institute for Fluid Dynamics
- **Riferimenti:**
 - **Maurizio De Lucia**
 - **Email** delucia@unifi.it
 - **Tel.** **055 2758781**

Pressione: non è una grandezza fondamentale, si ricava da forza ed area che sono grandezze derivate da massa, lunghezza e tempo.

- **Pressione assoluta (absolute pressure):** la misura di pressione è fatta rispetto ad uno zero (in pratica realizzato mediante una camera ad alto vuoto).
- **Pressione relativa (gauge pressure):** la pressione è misurata rispetto all'ambiente (per avere la pressione assoluta è necessario quindi sommare la pressione barometrica).
- **Pressione differenziale:** si misura una differenza tra due pressioni qualunque.

Manometri: dispositivi adatti per fornire una misura fisica della pressione, che viene convertita in genere in uno spostamento che viene misurato su di una scala opportuna.

Manometri differenziale: per la misura di piccole differenze di pressione si utilizzano molto i *manometri ad U* a colonna liquida.

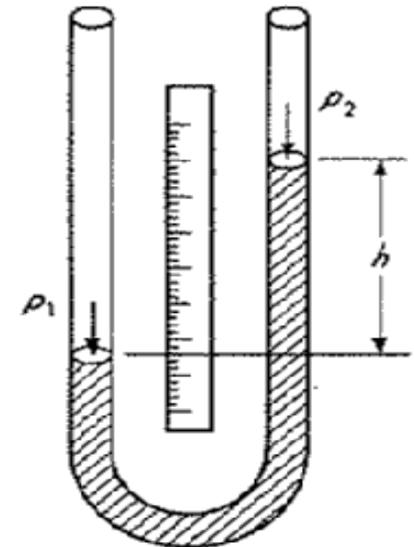
In tali strumenti, la pressione, convertita in una forza agendo su di una opportuna superficie, determina lo scostamento tra i peli liberi del liquido contenuto nei due vasi comunicanti.

$$h = \frac{p_1 - p_2}{\rho g}$$

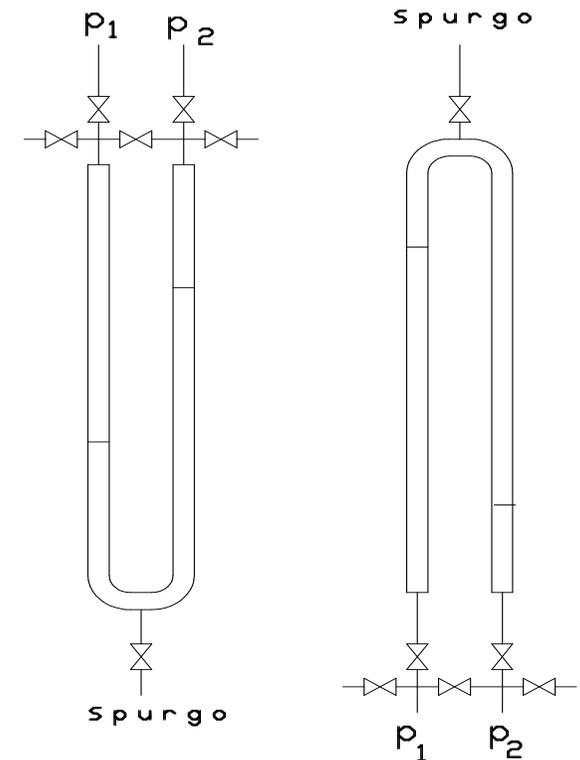
g: accelerazione di gravità
 ρ : densità del flusso



NON dipende dall'area della sezione trasversale del tubo



- In figura è mostrato il manometro a U usato per flussi di gas (diretto), e quello usato per flussi di liquidi (invertito).
- Fluidi comunemente usati sono **acqua**, **alcol** e **mercurio**.
- L'utilizzo di acqua è raccomandabile nel campo da 100 Pa (circa 10 mm di colonna d'acqua) a 20000 Pa (circa 2 m di colonna d'acqua). Il ricorso al mercurio - ad esempio - consente di moltiplicare tali limiti per 13.6 circa, corrispondente al rapporto delle densità del mercurio e dell'acqua.



Man. a U per flussi di gas Man. a U per flussi di liquidi

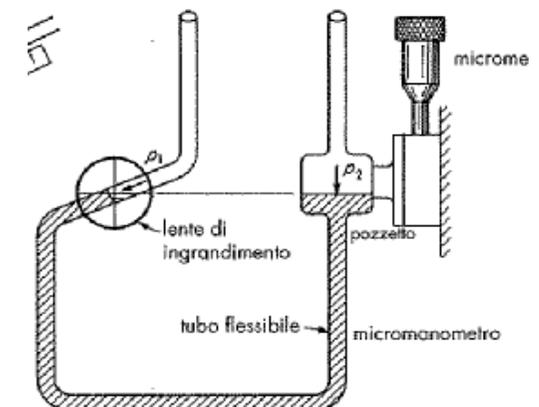
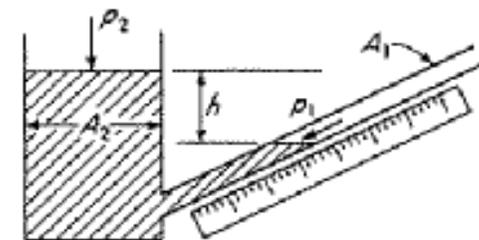
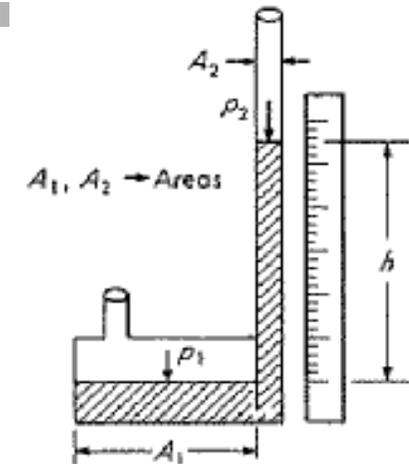
Errori

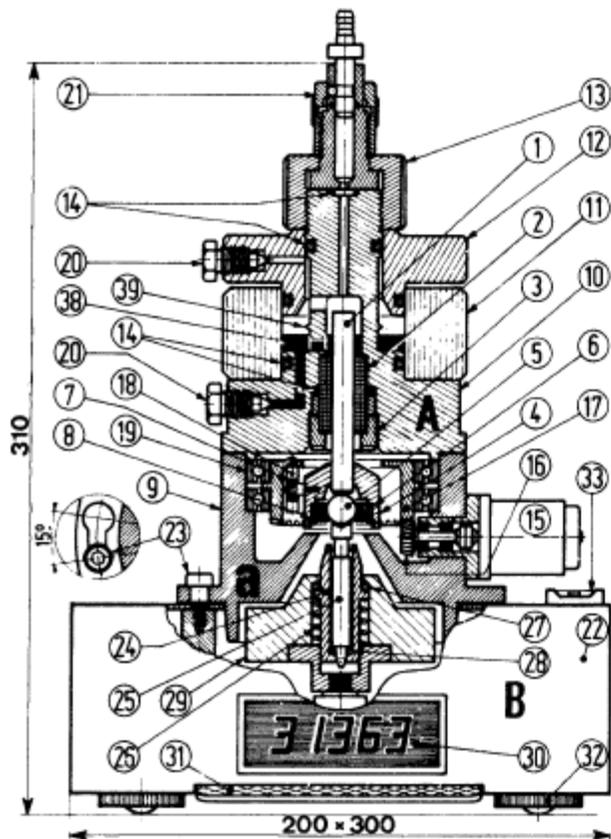
- Variazioni tra le gradazioni della scala per effetto della variazione di temperatura
- Variazione di ρ del fluido manometrico per effetto della variazione di temperatura
- Non perfetta verticalità dei tubi
- Difficoltà nella lettura di h dovuta al menisco.

Il manometro a pozzetto, viene largamente utilizzato per la sua semplicità d'uso che richiede la lettura di un solo dato. L'area della sezione del pozzetto è resa molto ampia a confronto con quella del tubo; in questo modo il suo livello zero si sposta pochissimo quando viene applicata la pressione. Questo errore viene compensato con opportune distorsioni della lunghezza della scala.

Con il manometro a tubo inclinato aumenta la sensibilità dello strumento; 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 in direzione verticale.

Per una misura accurata di differenze di pressione molto piccole si usa il micromanometro. Lo strumento è regolato in modo che quando $p_1 = p_2$ il menisco del tubo inclinato risulti in un punto di riferimento. L'applicazione della differenza di pressione causa lo spostamento del menisco dalla linea di riferimento; il menisco può essere riportato sulla linea di partenza alzando o abbassando il serbatoio con il micrometro. La differenza tra la lettura iniziale e finale fornisce la variazione di h e quindi la pressione.



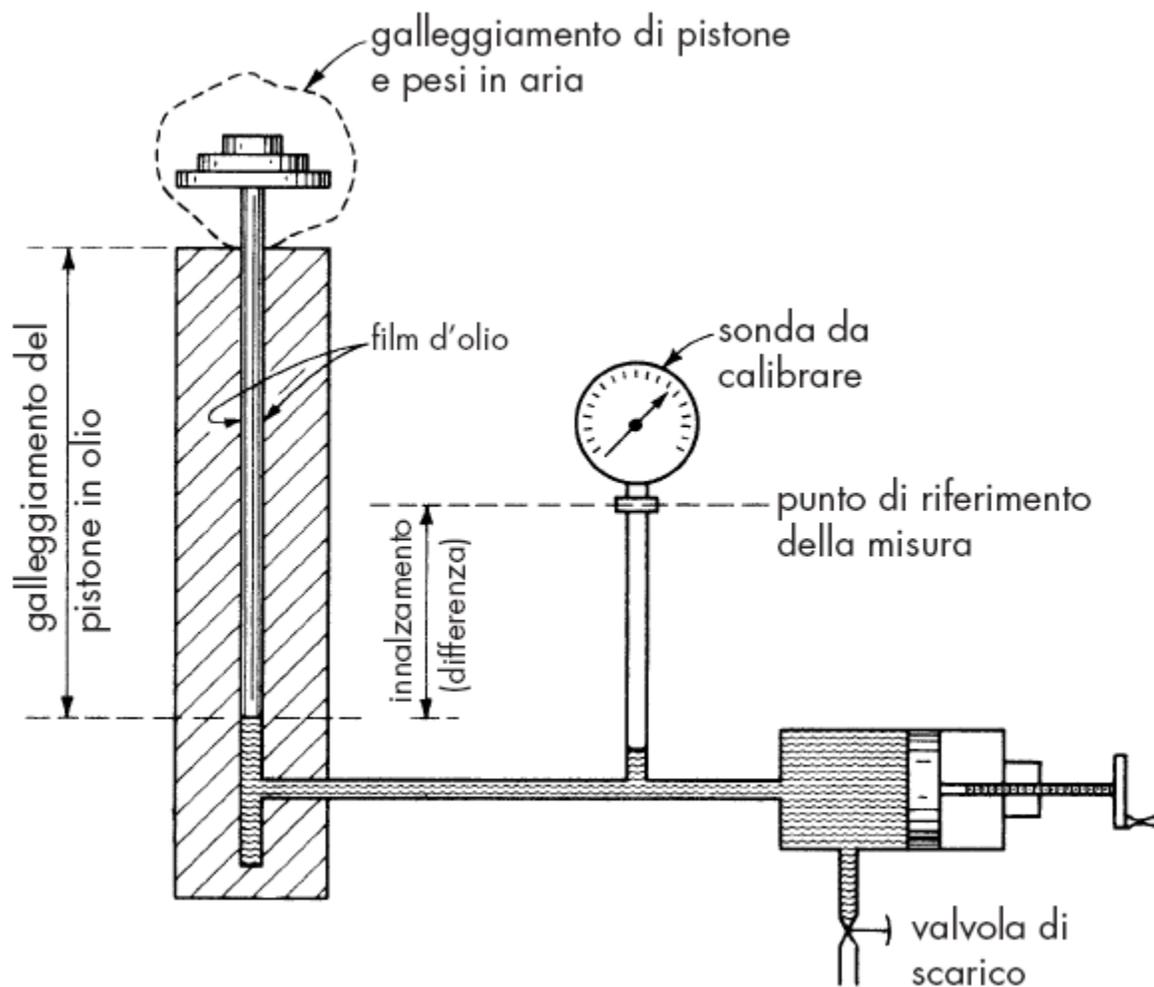


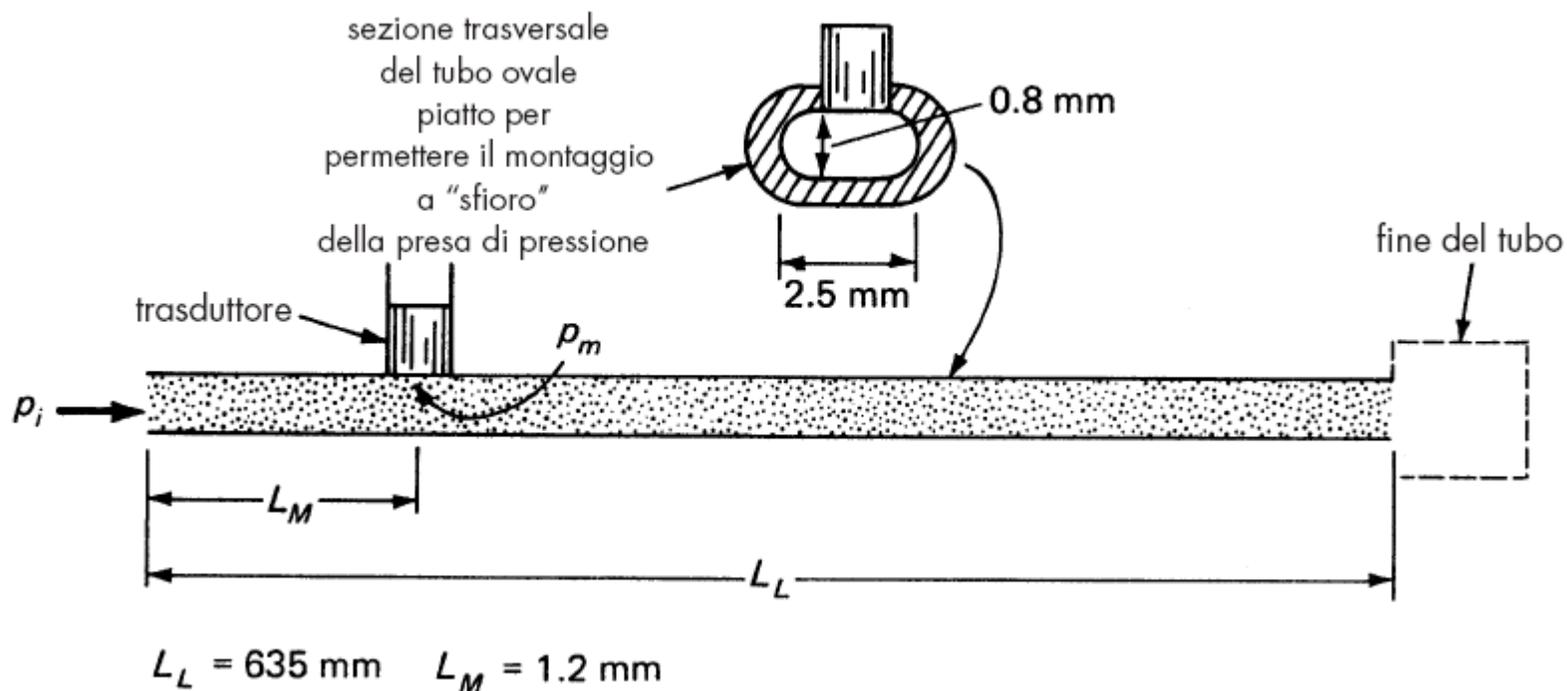
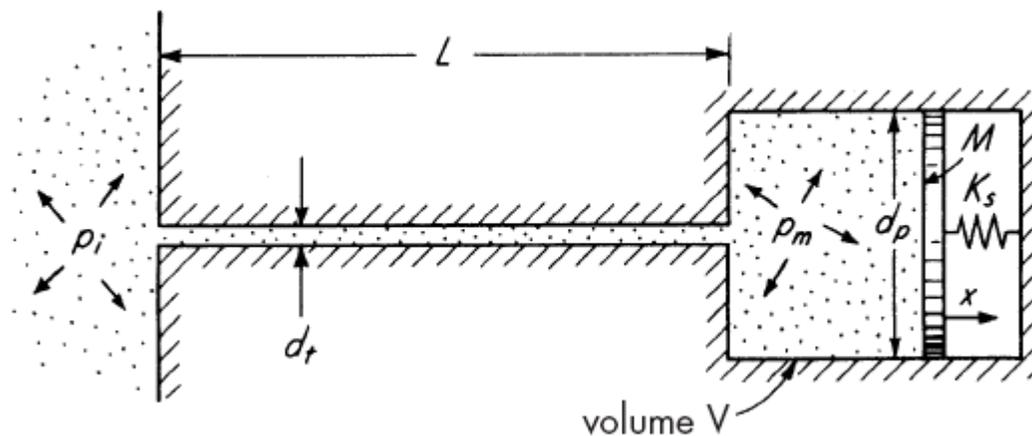
Sensore (measuring element) (A+a)

1. pistone in carburo di tungsteno
2. cilindro in carburo di tungsteno
3. dado di fissaggio
4. testa del pistone
5. sfera in carburo di tungsteno
6. cuscinetto a sfere di centraggio (5)
7. cuscinetto guida
8. anello di tenuta della sfera (5)
9. sede del meccanismo rotante
10. sede pistone/cilindro
11. indicatore di livello in materiale acrilico trasparente
12. copertura
13. dado di fissaggio
14. guarnizione O-ring
15. motore elettrico
16. pignone
17. ruota dentata
18. cuscinetto del perno
19. cuscinetti della ruota dentata
20. viti di scarico
21. sistema di collegamento veloce (disponibile con filettature standard)

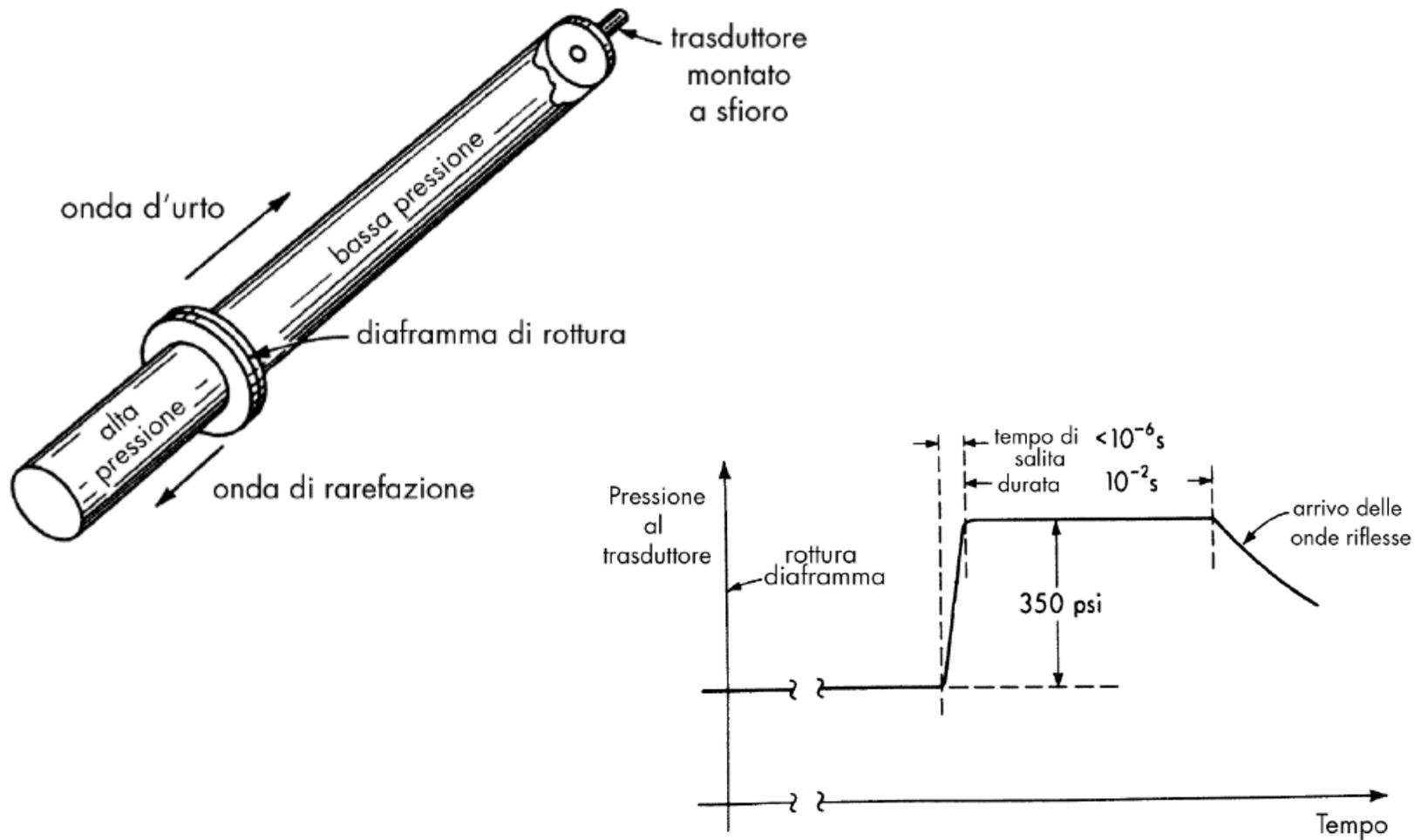
Dinamometro elettronico B

22. involucro esterno
23. 3 perni che permettono un rapido sgancio/fissaggio del sistema di misura (A + a). (Con una rotazione di 15° un sistema di bloccaggio assicura il sistema di misura al dinamometro)
24. guida del sistema di limitazione della forza
25. asta di collegamento
26. sistema di limitazione della forza a molla
- 27-28. 2 smorzatori di vibrazioni
29. piano su cui agisce la forza da misurare
30. display a 5 cifre (40 000 punti)
31. dispositivo di autoazzeramento
32. piedini regolabili
33. inclinometro a bolla





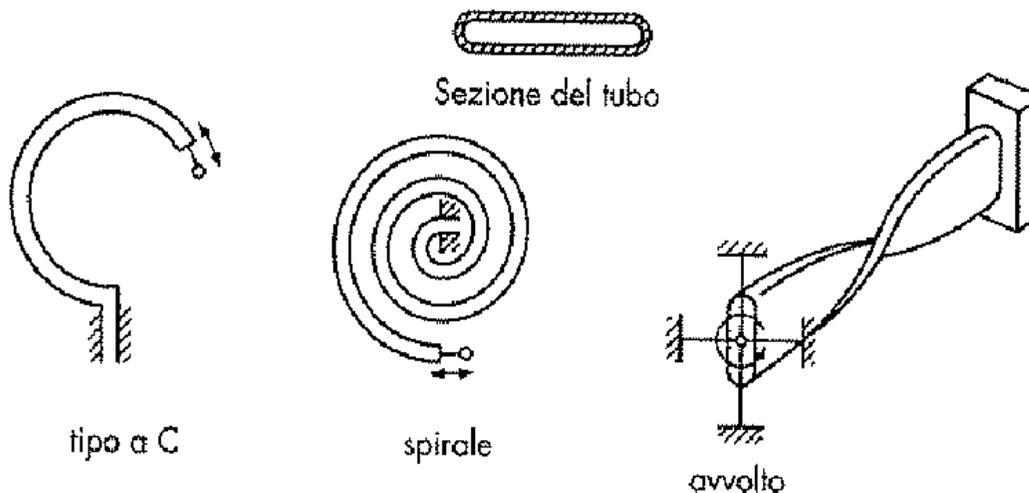
Shock tube (tubo a onda d'urto)



Tubo di Bourdon:

l'elemento base in tutte le sue varianti è un tubo a sezione non circolare.

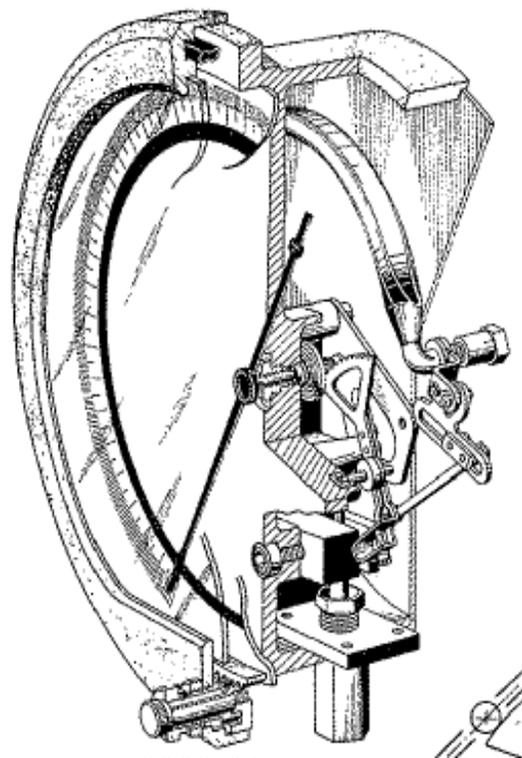
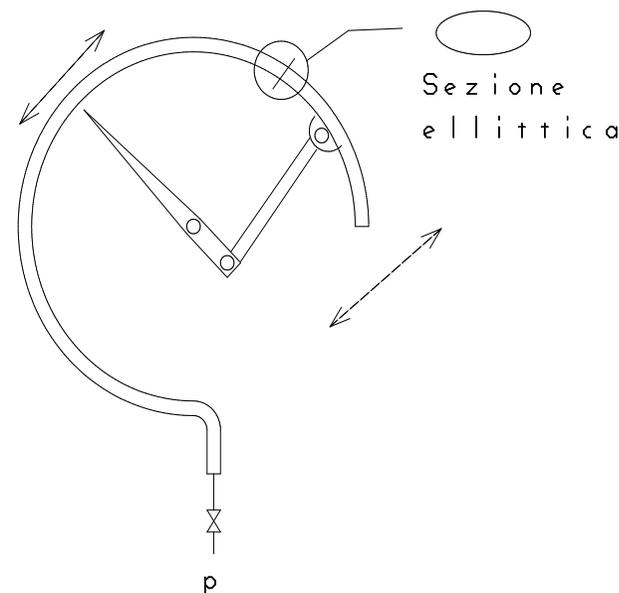
Una differenza di pressione fra l'interno e l'esterno del tubo fa sì che il tubo tenda ad assumere una sezione circolare.



Questo comporta delle deformazioni che portano ad una traslazione secondo una traiettoria curvilinea dell'estremità libera della forma C.

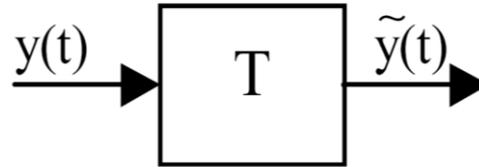
Tale spostamento - di tipo elastico, in quanto non eccede il limite di elasticità del materiale strutturale - viene convertito da un meccanismo nello spostamento di un ago su di un quadrante graduato.

Tubi di Bourdon



Trasduttori di pressione

- Sono strumenti capaci di convertire la pressione applicata in un segnale elettrico, in tensione o in corrente, facilmente registrabile, trasmissibile ed elaborabile.



- In genere, la pressione viene fatta agire su di una superficie opportuna, generando una forza che a sua volta produce la deformazione di un elemento elastico: questa risulta essere la variabile misurata.
- Per la misura della deformazione o dello spostamento sono possibili vari metodi (trasduttori estensimetrici, capacitivi, induttivi, a trasformatore differenziale, ad effetto piezoelettrico con quarzo o semiconduttori), che influenzano sia la precisione, sia l'elettronica necessaria per l'alimentazione ed eventuale amplificazione, sia il costo del trasduttore.
- Prescindendo dal principio di misura - che può essere relativamente ininfluenza per molte applicazioni - il costo di un trasduttore é fortemente influenzato dalla qualità esecutiva e dell'elettronica; dall'eventuale compatibilità con liquidi - anche corrosivi - e con flussi carichi di particolato; dal valore di pressione di linea sopportabile nel caso di esecuzioni differenziali; dal grado di miniaturizzazione, fondamentale per ottenere come si é visto buone capacità di risposta dinamica.



Pressure Range

Specifications		Model S-10 / S-11										
Pressure ranges	bar	0.1	0.16	0.25	0.4	0.6	1	1.6	2.5	4	6	10
Over pressure safety	bar	1	1.5	2	2	4	5	10	10	17	35	35
Burst pressure	bar	2	2	2.4	2.4	4.8	6	12	12	20.5	42	42
Pressure ranges	bar	16	25	40	60	100	160	250	400	600	1000 ¹⁾	
Over pressure safety	bar	90	50	80	120	200	320	500	900	1200	1500	
Burst pressure	bar	96	96	400	550	800	1000	1200	1700 ²⁾	2400 ²⁾	3000	

Materials

Materials		
Wetted parts		Stainless steel (other materials see WIKA diaphragm seal programm)
Model S-10		Stainless steel
Model S-11		Stainless steel (Hastelloy C4) O-ring: NBR ³⁾ (Viton or EPDM)
Case		Stainless steel
Internal transmission fluid		Synthetic oil, only for pressure ranges up to 0... 25 bar or for Model S-11 (flush diaphragm) units (Halocarbon oil for oxygen applications) ⁴⁾ (Listed by FDA for food industry)

Power supply
Signal output

Power supply U_B	DC V	$10 < U_B \leq 30$ (14 ... 30 with signal output 0 ... 10 V)
Signal output and maximum load R_A		4 ... 20 mA, 2-wire $R_A \leq (U_B - 10 \text{ V}) / 0.02 \text{ A}$ with R_A in Ohm and U_B in Volt 0 ... 20 mA, 3-wire $R_A \leq (U_B - 3 \text{ V}) / 0.02 \text{ A}$ with R_A in Ohm and U_B in Volt (0 ... 5 V, 3-wire) $R_A > 5 \text{ kOhm}$ (0 ... 10 V, 3-wire) $R_A > 10 \text{ kOhm}$ (other signal outputs on request)

Response Time

Adjustability zero span	%	± 10 via potentiometers in the instrument
Response time (10 ... 90 %)	ms	≤ 1 (≤ 10 ms at medium temperatures below $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ for pressure ranges up to 25 bar or with flush diaphragm)

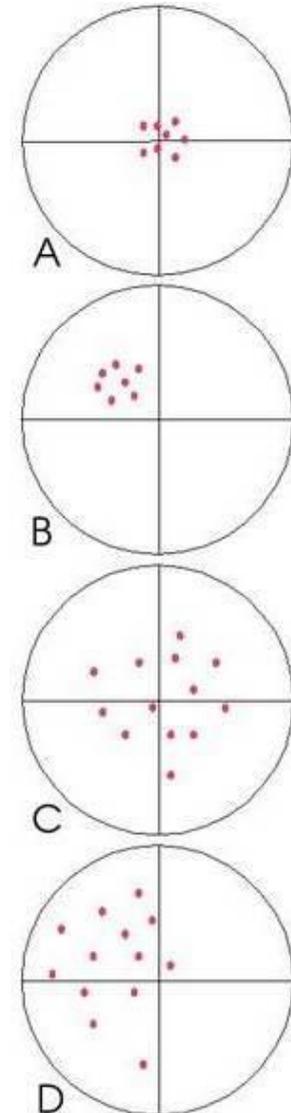
Accuracy
Hysteresis
Repeatability

Accuracy ⁵⁾	% of span	≤ 0.5 (0.25) ⁶⁾ (limit point calibration)
Hysteresis	% of span	≤ 0.25 (0.125) ⁶⁾ (BFSL)
Repeatability	% of span	≤ 0.1
1-year stability	% of span	≤ 0.05
1-year stability	% of span	≤ 0.2 (at reference conditions)

Temperature

Permissible temperature of		
Medium		-90 ... +100 °C [-40 ... +125 °C] -22 ... +212 °F [-40 ... +257 °F]
Ambient		S-11 with cooling element: -20 ... +150 °C S-11 with cooling element: -4 ... +302 °F -20 ... +80 °C -4 ... +176 °F
Storage		S-11 with cooling element: -20 ... +80 °C S-11 with cooling element: -4 ... +176 °F -40 ... +100 °C -40 ... +212 °F
Compensated temp. range		S-11 with cooling element: -20 ... +100 °C S-11 with cooling element: -4 ... +212 °F 0 ... +80 °C 32 ... +176 °F
Temperature coefficients in compensated temp range		
Mean TC of zero	% of span	$\leq 0.2 / 10 \text{ K}$ (≤ 0.4 for pressure range $< 250 \text{ mbar}$)
Mean TC of range	% of span	$\leq 0.2 / 10 \text{ K}$

- I termini *precisione* e *accuratezza* sono messi in relazione con gli errori casuali e sistematici.
- Una misura è tanto più *precisa* quanto più i singoli valori misurati in condizioni di *ripetibilità* si concentrano intorno alla media della serie di misure effettuate. Il concetto di precisione è qualitativo. La variabilità dei risultati viene quantificata, come di consueto, nella deviazione standard. Ma questa di per sé non è atta a quantificare la precisione della misura secondo il significato usuale del termine di “qualità della misura”. Ad esempio una deviazione standard di 1 mm rappresenta ottima o pessima precisione a seconda che si stiano misurando lunghezze della decina di metri o inferiori al centimetro. Si preferisce quantificare la precisione con il modulo del coefficiente di variazione, in genere espresso in percentuale. Una deviazione standard di 1 mm su una misura di 10 cm corrisponde ad una precisione dell'1%. Si presti attenzione al fatto che nell'uso corrente “maggiore” è la precisione “minore” è il numero che la indica.
- L'*accuratezza* esprime invece l'assenza di errori sistematici nella misura: una misura è tanto più accurata quanto più la media delle misure si approssima al valore vero della grandezza. Anche l'accuratezza è spesso espressa come rapporto fra l'errore sistematico e il valore della grandezza.



Parametri caratteristici di un trasduttore

Accuratezza

Esprime la differenza tra il valore ideale (corretto) dell'uscita e il valore reale dell'uscita del trasduttore con riferimento ad uno specifico ingresso.

L'accuratezza può essere espressa nelle tre forme seguenti:

- %FSO: percentuale sull'uscita di fondo scala (Full Scale Output)
- % SULLA LETTURA DI USCITA
- VALORE ASSOLUTO espresso nell'unità di misura dell'ingresso.

Risoluzione

È la più piccola variazione dell'ingresso che provoca una variazione dell'uscita

Ripetibilità

Quantifica l'attitudine del trasduttore a produrre la stessa uscita qualora si effettuino ripetute applicazioni successive di uno stesso ingresso

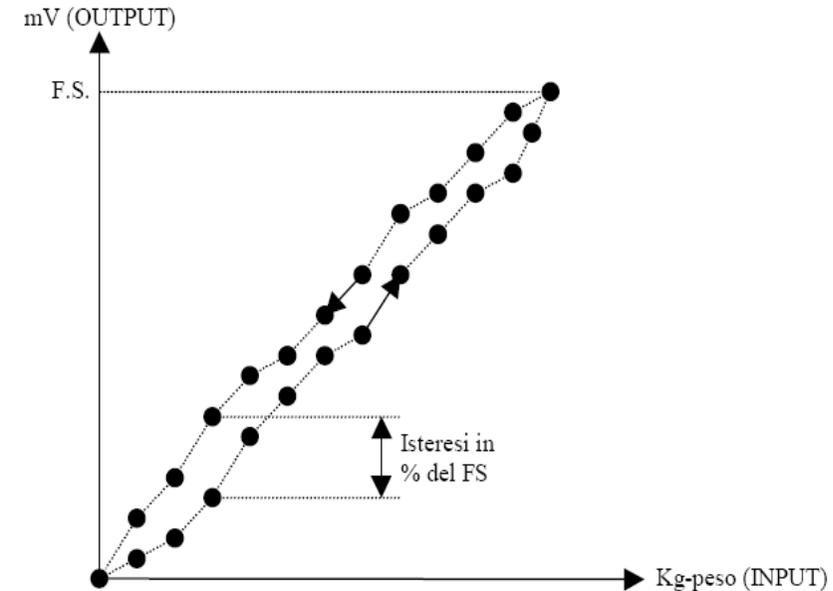
$$Rip_1 = \frac{misura_Max - misura_Min}{F.S.} \% \qquad Rip_2 = \frac{Max_deviaz. - Val_medio}{F.S.} \%$$

Parametri caratteristici di un trasduttore

Isteresi

Fornisce un'indicazione sull'attitudine di un trasduttore a produrre la stessa identica uscita sia nel caso che l'ingresso di riferimento sia raggiunto da valori inferiori sia che venga raggiunto da valori superiori.

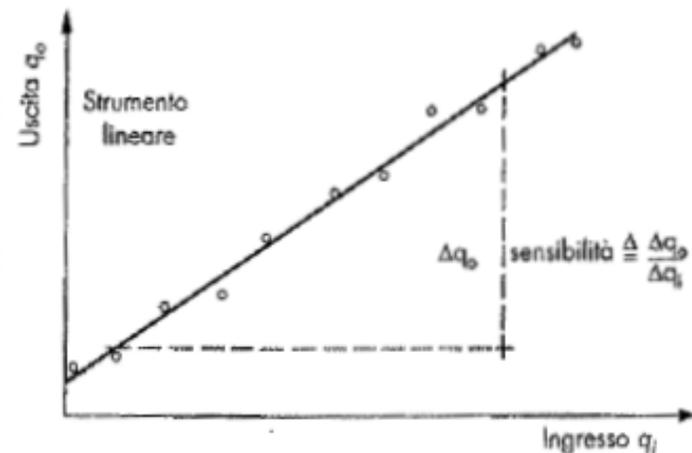
L'isteresi sarà data dal valore max della differenza tra l'uscita assunta nella fase e l'uscita assunta nella fase decrescente in corrispondenza della stessa grandezza in ingresso



Sensibilità

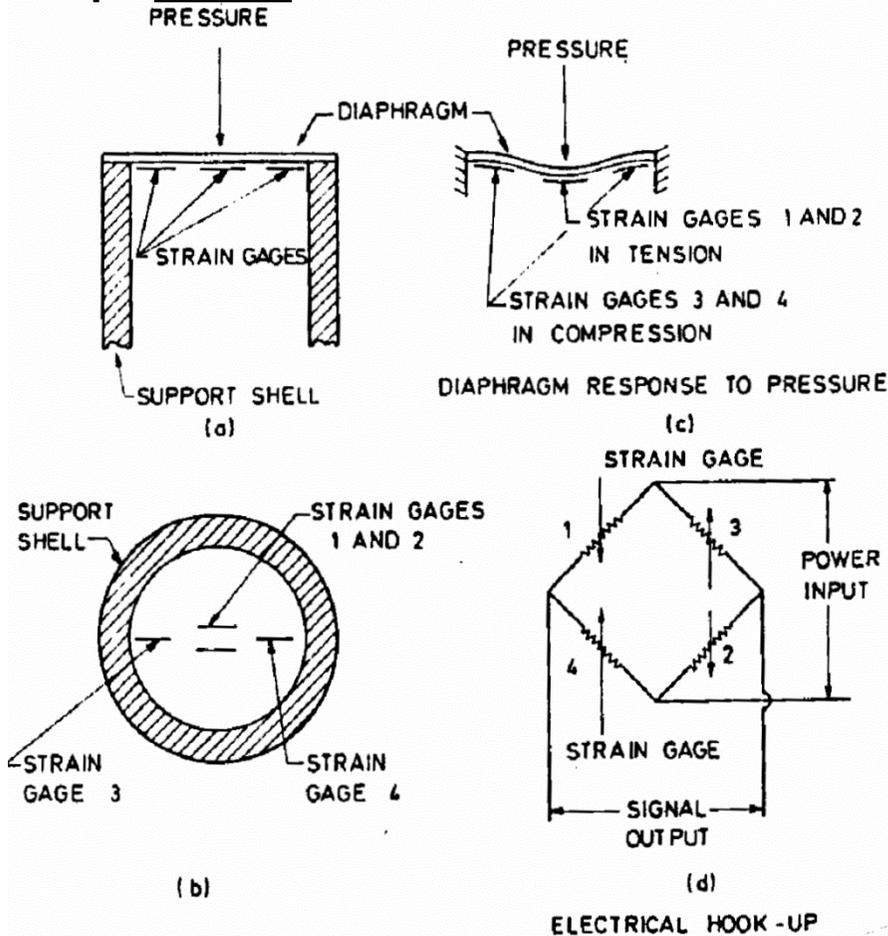
È la derivata della curva di taratura dello strumento.

La sensibilità permette il confronto tra diversi trasduttori riguardo la capacità di sentire le variazioni della grandezza in ingresso.



Trasduttori estensimetrici

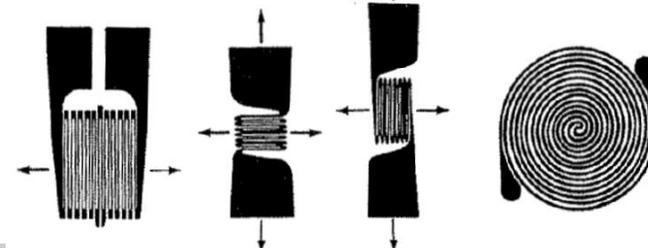
- Gli estensimetri sono applicati direttamente su una membrana liscia di metallo.
- L'uscita del trasduttore è un segnale proporzionale alla pressione applicata.
- La relazione tra la deflessione (e quindi il segnale in uscita) e la pressione applicata è di tipo lineare.



Richiamo estensimetri

- consideriamo un conduttore di sezione trasversale uniforme con resistività ρ , area A e lunghezza L . La resistenza del conduttore risulta: $R = (\rho \cdot L) / A$
- Se il conduttore viene allungato o compresso la sua resistenza cambierà a causa delle variazioni dimensionali (L e A) e per una proprietà detta piezoresistività (dipendenza di r dalla deformazione meccanica).

$$GageFactor = \frac{dR/R}{dL/L} = 1 + 2\nu + \frac{d\rho/\rho}{dL/L}$$



Trasduttori capacitivi

- Un movimento di traslazione può essere impiegato per creare una capacità variabile:

$$C = \frac{kA}{x} c$$

C: capacità, pF

A: area armatura, mm²

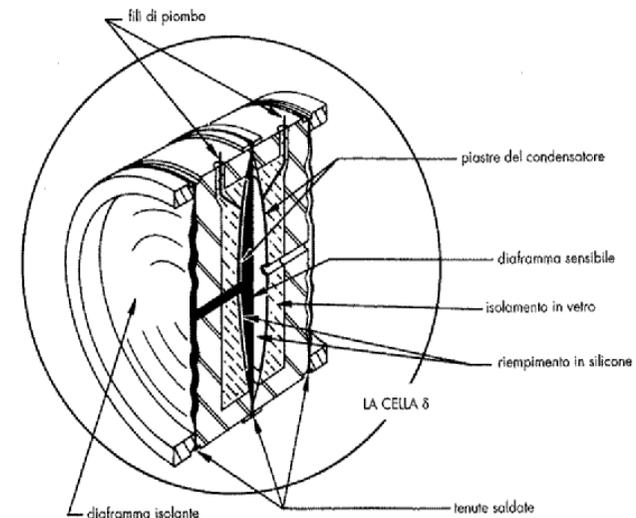
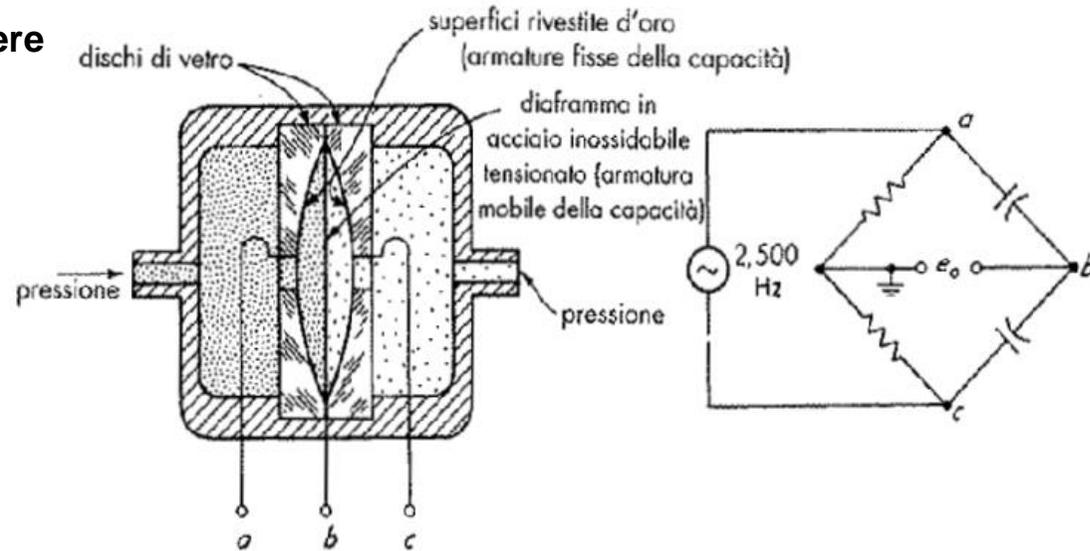
x: distanza tra le armature, mm

K: costante dielettrica del mezzo

c: costante (geometria)

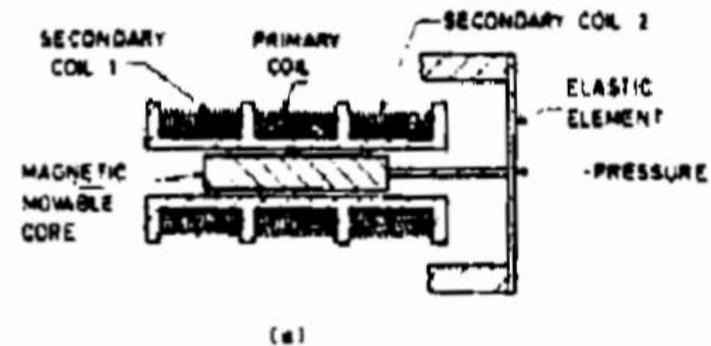
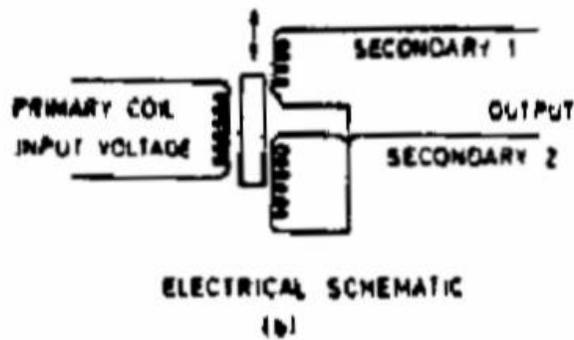
- I traduttori differenziali presentano particolari difficoltà di progetto perché devono essere sensibili a piccole differenze di pressione, spesso con elevate pressioni di linea.

- In figura sopra e a fianco sono mostrati sensori differenziali di tipo capacitivo. La membrana sensibile costituisce l'armatura mobile di una capacità differenziale; il movimento viene convertito in un segnale in corrente continua proporzionale alla sollecitazione.



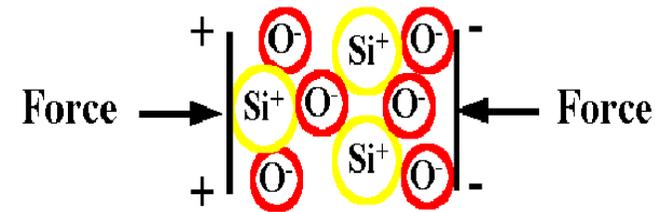
Trasduttori induttivi

- Un nucleo di materiale magnetico si sposta per effetto della pressione applicata. Quando il nucleo è nella posizione di zero l'induttanza nei due avvolgimenti è la stessa, uno spostamento provoca una variazione di induttanza generando una tensione di uscita.

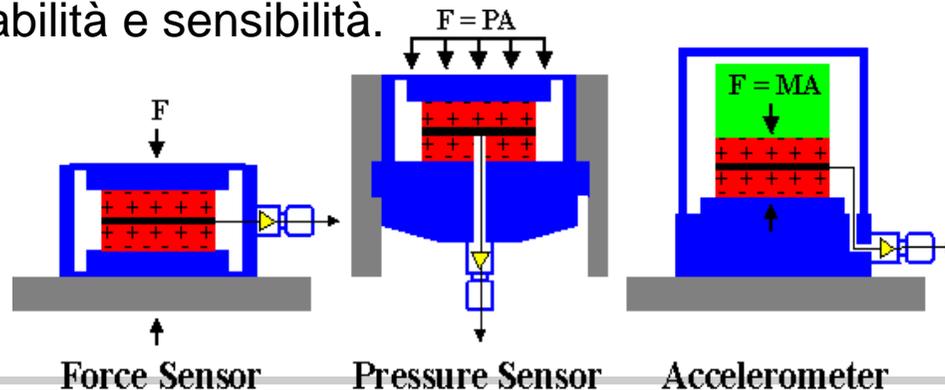


Trasduttori piezoelettrici

- 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.



Possibili strutture di sensori che sfruttano l'effetto piezoelettrico



Trasduttori piezoelettrici

- La rigidità del cristallino è paragonabile a quella dell'acciaio.
- Si può misurare accelerazioni da 0.0001 a 100 m/s².
- Per la maggior parte dei casi l'elemento sensibile del trasduttore è incasellato e precaricato in una struttura rigida; questo conferisce ai sensori la proprietà fondamentale di un tempo di risposta brevissimo (qualche microsecondo) ed una frequenza di risonanza dell'ordine di centinaia di kHz.

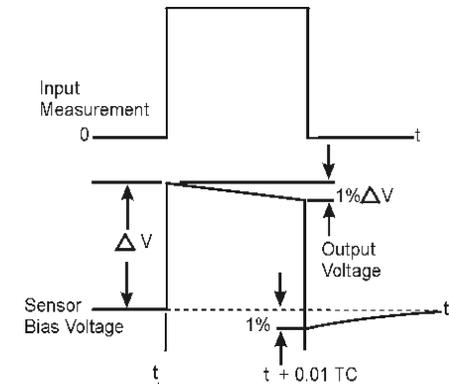
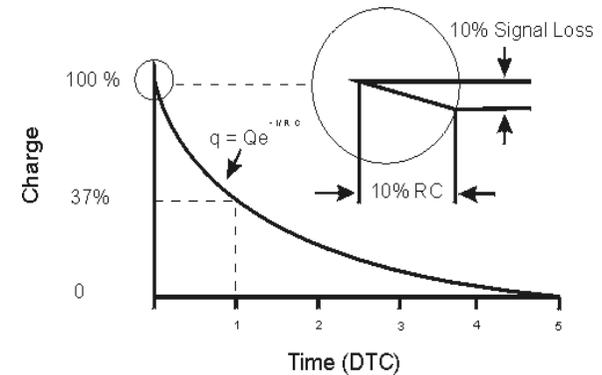
Corrente di scarica

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.



PERFORMANCE	ENGLISH	SI
Measurement Range (for $\pm 5V$ output)	5 kpsi	34,500 kPa
Useful Overrange (for $\pm 10V$ output)	10 kpsi	69,000 kPa [1]
Sensitivity (± 0.1 mV/psi)	1.0 mV/psi	0.145 mV/kPa
Maximum Pressure (static)	15 kpsi	103,000 kPa
Resolution	100 mpsi	0.690 kPa
Resonant Frequency	≥ 400 kHz	≥ 400 kHz
Rise Time	≤ 1.0 μ sec	≤ 1.0 μ sec
Low Frequency Response (-5 %)	0.001 Hz	0.001 Hz
Non-Linearity	≤ 2.0 % FS	≤ 2.0 % FS [2]
ENVIRONMENTAL		
Acceleration Sensitivity	≤ 0.002 psi/g	≤ 0.0014 kPa/(m/s ²)
Temperature Range (Operating)	-100 to +275 °F	-73 to +135 °C
Temperature Coefficient of Sensitivity	≤ 0.03 %/°F	≤ 0.054 %/°C
Maximum Flash Temperature	3000 °F	5400 °C
Maximum Shock	20,000 g pk	196,000 m/s ² pk
ELECTRICAL		
Output Polarity (Positive Pressure)	Positive	Positive
Discharge Time Constant (at room temp)	≥ 500 sec	≥ 500 sec
Excitation Voltage	20 to 30 VDC	20 to 30 VDC
Constant Current Excitation	2 to 20 mA	2 to 20 mA
Output Impedance	<100 ohm	<100 ohm
Output Bias Voltage	8 to 14 VDC	8 to 14 VDC
Electrical Isolation	10^8 ohm	10^8 ohm
PHYSICAL		
Sensing Geometry	Compression	Compression
Sensing Element	Quartz	Quartz
Housing Material	Stainless Steel	Stainless Steel
Diaphragm	Invar	Invar
Sealing	Welded Hermetic	Welded Hermetic
Electrical Connector	10-32 Coaxial Jack	10-32 Coaxial Jack
Weight	0.44 oz	12.5 gm

Misura della pressione Trasduttori piezoelettrici



www.pcb.com

Trasduttori piezoresistivi

- La piezoresistività è la caratteristica che hanno tutti i materiali di variare la propria resistenza elettrica, se sottoposti all'azione di una forza esterna.
- Questo effetto è apprezzabile solo in alcuni di essi (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.
- Per un semiconduttore, la resistività ρ è inversamente proporzionale al prodotto del numero di cariche Ni ed alla mobilità media μ_m , e può essere espressa da:

$$\rho = \frac{1}{e \cdot Ni \cdot \mu_m} \quad \text{dove } e \text{ è la carica elettronica.}$$

- L'effetto di una forza applicata è quello di cambiare sia il numero di cariche che la mobilità media; l'ampiezza ed il segno della variazione dipenderà dallo specifico semiconduttore, dalla sua carica concentrata e dall'orientazione dei cristalli rispetto alla sollecitazione esterna.
- Per una semplice tensione o compressione, la variazione relativa di resistività è data da:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \pi_l \cdot \sigma \quad \text{dove } \pi_l \text{ è il coefficiente di piezoresistività longitudinale e } \sigma \text{ è la tensione.}$$

Trasduttori piezoresistivi

- *Gage Factor* è il termine usato per definire la variazione di resistenza elettrica dovuta alla forza applicata. Maggiore è il G.F. e più elevato sarà la variazione di resistenza e, quindi, il segnale in uscita, la risoluzione, etc..

- La relazione che lo esprime è:
$$G.F. = \frac{\Delta R}{R_0 \cdot \varepsilon} = 1 + 2 \cdot \nu + \pi_l \cdot Y$$

dove ν è il numero di Poisson ed Y è il modulo di Young. I primi due termini rappresentano la variazione di resistenza dovuta alla variazione dimensionale, mentre l'ultimo il cambio di resistività con la forza.

- Per i semiconduttori *Kulite* il G.F. va da 45 a 200.
- I cristalli di semiconduttore con i quali si ottiene l'elemento sensibile di una Kulite, sono spesso accresciuti di una certa quantità di impurità elettricamente attive (la tecnica del *Doping*), a seconda delle caratteristiche che si vuole ottenere. Infatti, le caratteristiche finali di un sensore possono essere modificate cambiando il tipo e la quantità delle impurezze elettricamente attive ed anche dalla modifica del procedimento di drogaggio.
- Per i semiconduttori con un alta concentrazione di cariche (dell'ordine di 10^{20} cariche/cm³), il G.F. è essenzialmente indipendente dalla temperatura e dalla forza, cioè:

$$G.F. = \frac{\Delta R}{R_0 \cdot \varepsilon} = \cos t$$

- Questi sensori (indicati con il codice L nella tabella del livello di dosaggio), quindi, hanno il vantaggio di non necessitare alcun fattore di correzione per ottenere un'elevata precisione.

Trasduttori piezoresistivi

- Riducendo il numero di cariche, il G.F. inizia ad essere dipendente dalle variazioni di temperatura e forza. Nel caso estremo che il semiconduttore contenga meno di 10^{17} cariche/cm³, il *Gage Factor* dipende fortemente da T e F. nella forma:

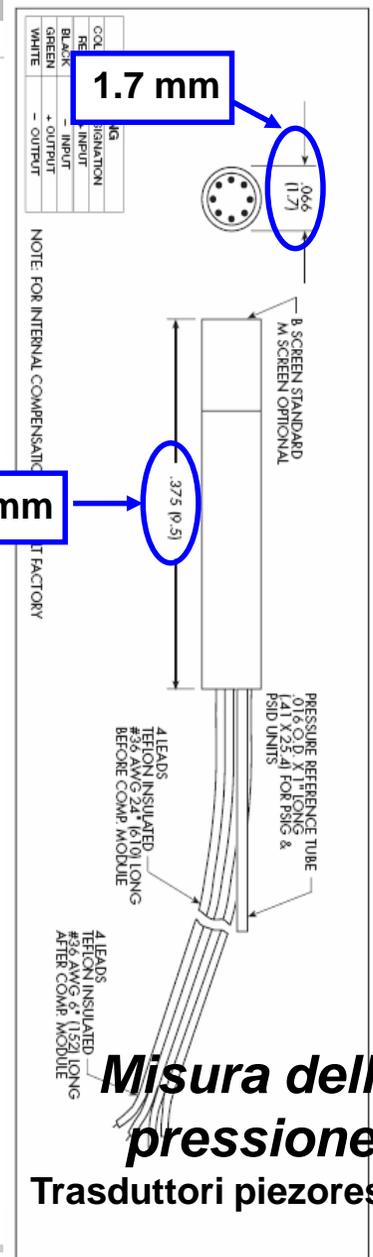
$$G.F. = \frac{T_0}{T} (G.F.)_0 + \frac{T_0}{T} \cdot \varepsilon$$

dove $(G.F.)_0$ è il G.F. corrispondente alla temperatura ambiente e forza nulla.

- La tecnologia dei semiconduttori fa sì che i sensori piezoresistivi possano essere utilizzati in un vasto campo di applicazioni, per via dell'ampia possibilità di variare le loro caratteristiche generali.



KULITE SEMICONDUCTOR PRODUCTS, INC.	
INPUT	
Pressure Range	0.35 0.7 1.7 3.5 7 17 35 70 BAR 5 10 25 50 100 250 500 1000 PSI
Operational Mode	Absolute, Gage, Sealed Gage, Differential Absolute, Sealed Gage
Over Pressure	2 Times Rated Pressure With No Change In Calibration
Burst Pressure	3 Times Rated Pressure
Pressure Media	All Nonconductive, Noncorrosive Liquids or Gases
Rated Electrical Excitation	10 VDC/AC
Maximum Electrical Excitation	15 VDC/AC
Input Impedance	1000 Ohms (Min.)
OUTPUT	
Output Impedance	1000 Ohms (Nom.)
Full Scale Output (FSO)	100 mV (Nom.)
Residual Unbalance	± 5 mV (Typ.)
Combined Non-Linearity, Hysteresis and Repeatability	± 0.1% FSO BFSL (Typ.) ± 0.5% FSO (Max.)
Resolution	Infinite
Natural Frequency (KHz) (Typ.)	150 175 240 300 380 550 700 1000
Acceleration Sensitivity % FS/g Perpendicular	1.5x10 ⁻³ 1.0x10 ⁻⁴ 5.0x10 ⁻⁴ 3.0x10 ⁻⁴ 1.5x10 ⁻⁴ 1.0x10 ⁻⁴ 6.0x10 ⁻⁵ 4.0x10 ⁻⁵
Transverse	2.2x10 ⁻⁴ 1.4x10 ⁻⁵ 6.0x10 ⁻⁵ 4.0x10 ⁻⁵ 2.0x10 ⁻⁵ 9.0x10 ⁻⁵ 6.0x10 ⁻⁶ 3.0x10 ⁻⁶
Insulation Resistance	100 Megohm Min. at 50 VDC
ENVIRONMENTAL	
Operating Temperature Range	-320° F to 250° F (-195.5° C to 120° C)
Compensated Temperature Range	-320° F to 100° F (-195.5° C to 37.5° C)
Thermal Zero Shift	± 5% FS Over the Compensated Temperature Range (Typ.)
Thermal Sensitivity Shift	± 5% FS Over the Compensated Temperature Range (Typ.)
Steady Acceleration	10,000g. (Max.)
Linear Vibration	10-2,000 Hz Sine, 100g. Max.
PHYSICAL	
Electrical Connection	4 Leads 36 AWG 30" Long
Weight	.2 Gram (Nom.) Excluding Module and Leads
Sensing Principle	Fully Active Four Arm Wheatstone Bridge Dielectrically Isolated Silicon on Silicon



<http://www.kulite.com>

Misure di pressione nei fluidi in movimento

- **Pressione statica P** Pressione del fluido in moto o in movimento (si può ottenere da un piccolo foro con asse perpendicolare ad una parete che delimita i confini del flusso – *wall taps* usati da Bernoulli).
- **Pressione totale P_0** La pressione di ristagno si può definire come il valore a cui porterebbe la pressione di un fluido in movimento se a partire dalle condizioni locali fosse portato con un processo isoentropico fino a velocità nulla.

$$\frac{P_0}{P} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right)$$

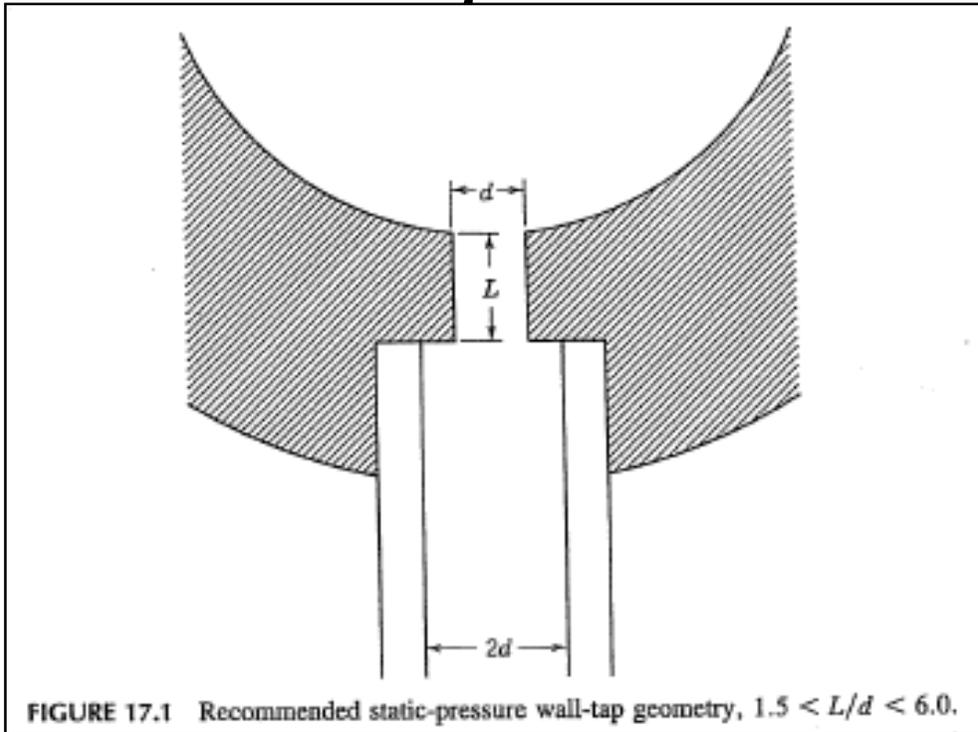
Dove

- $K = c_p/c_v$ rapporto dei calori specifici
- $M = v/a$ numero di Mach
- $a = (k \cdot R \cdot T)^{1/2}$ velocità caratteristica adiabatica
- v velocità del flusso
- T temperatura del flusso
- R costante del gas

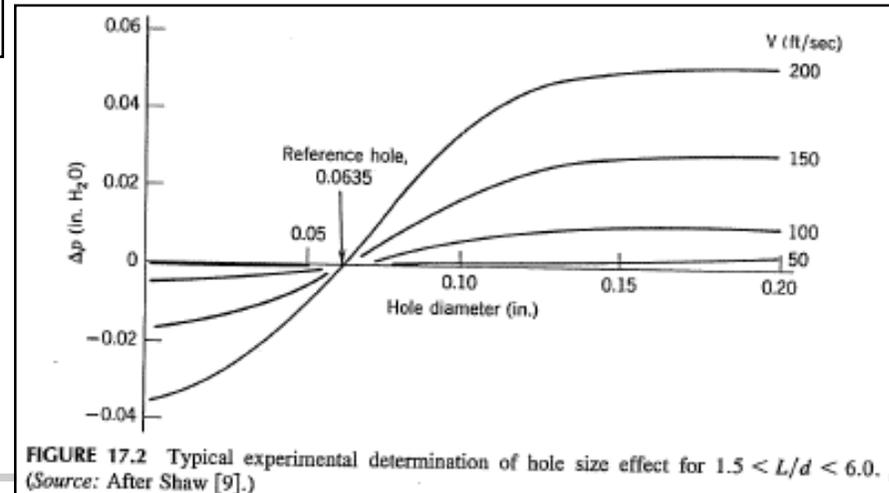
Nel caso di flusso incomprimibile ($M < 0.3$ si può approssimare

$$P_0 = P + \frac{\rho v^2}{2}$$

Misure di pressione statica nei flussi - wall taps



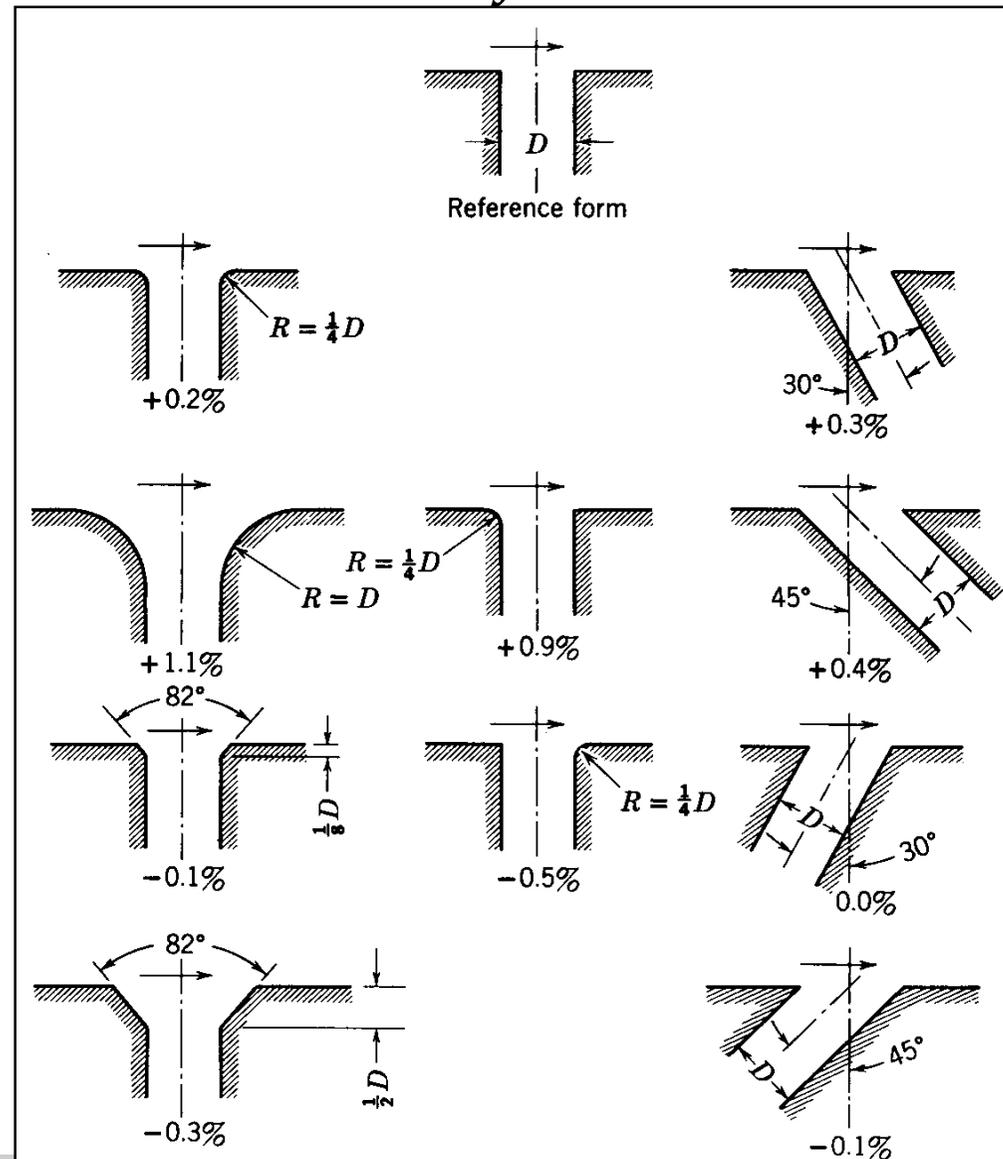
Si assume che la pressione statica corretta si ottiene con un piccolo foro realizzato perpendicolarmente alla parete con gli spigoli vivi.
Difficoltà di realizzare per realizzare perpendicolarità e mantenere vivi gli spigoli



Misure di pressione statica nei flussi

La forma del bordo del foro può influenzare il valore della pressione rilevata.

Il valore percentuale indicato è la variazione di rispetto alla pressione dinamica



Misure di pressione statica nei flussi

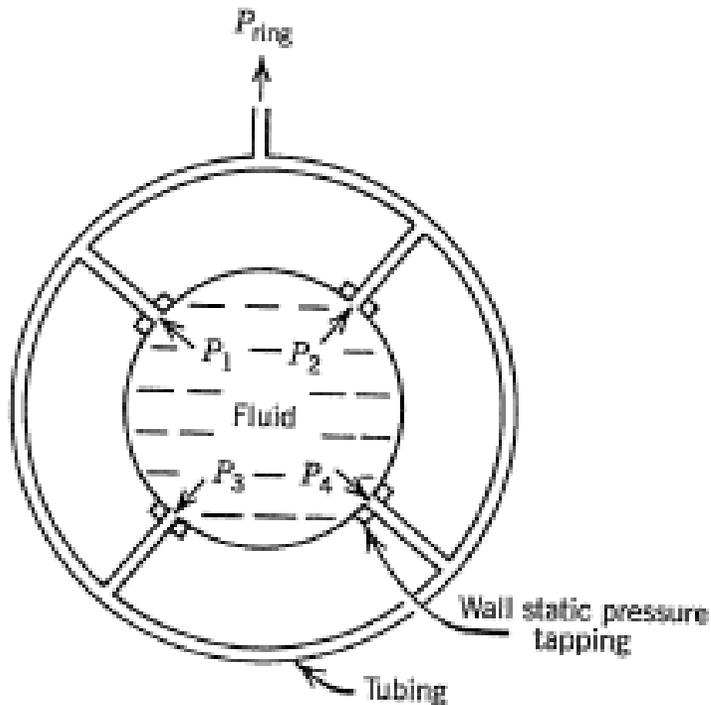


FIGURE 17.10 Conventional piezometer ring.

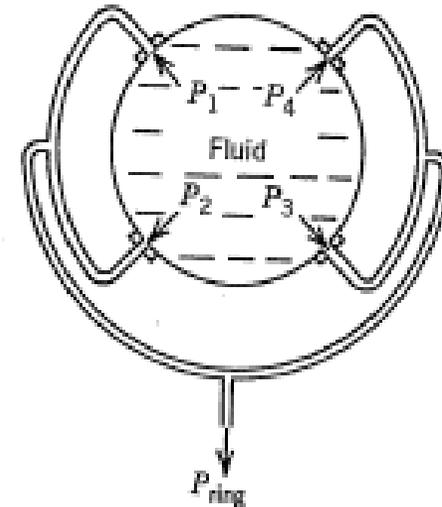


FIGURE 17.11 Triple-T ring. (Source: After Blake [18].)

Piezometer ring – anelli piezometrici

Sono utilizzati per acquisire valori mediati di pressione statica a parete acquisita su più fori

Sonde di pressione statica

Misura della pressione statica all'interno di un flusso

L'accuratezza delle misure di pressione statica utilizzando prese di pressione su corpi aerodinamici (sonde) dipende dall'accuratezza nel posizionamento, dalla dimensione dei fori, dalla direzione del flusso

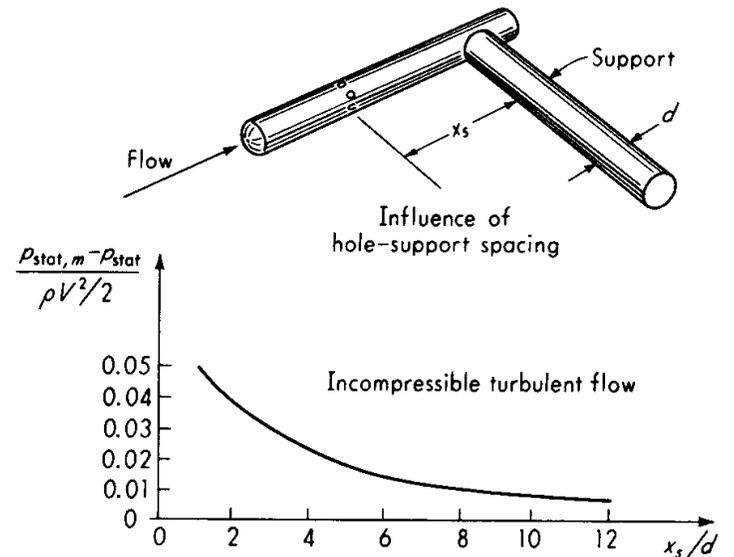
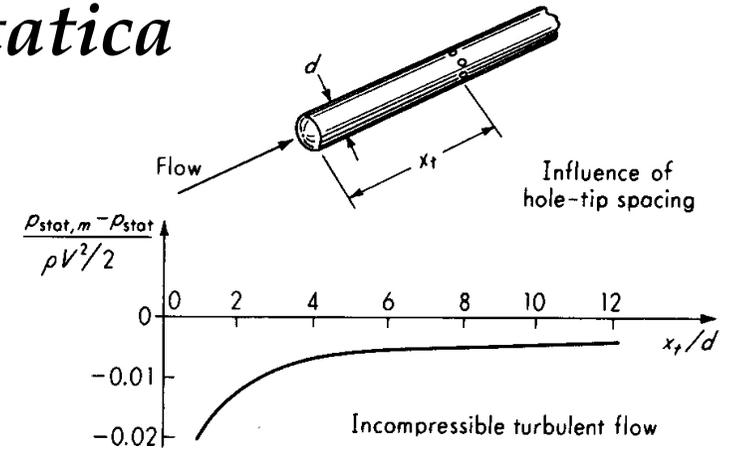
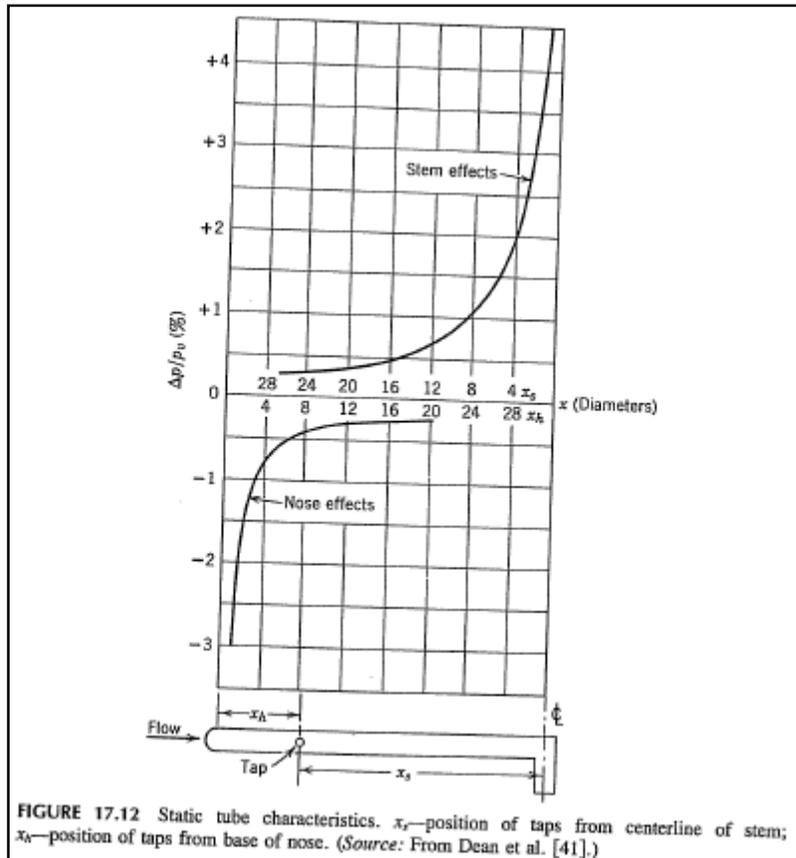
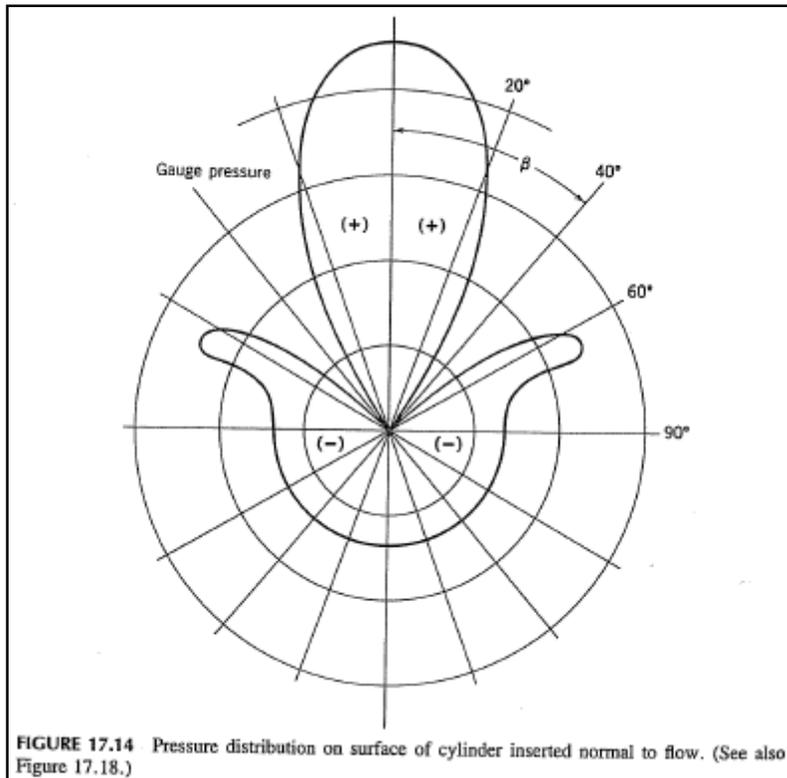


Figure 7.2 Static-pressure errors.

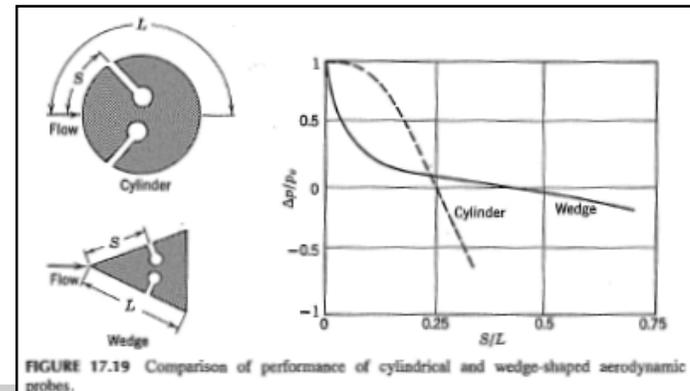
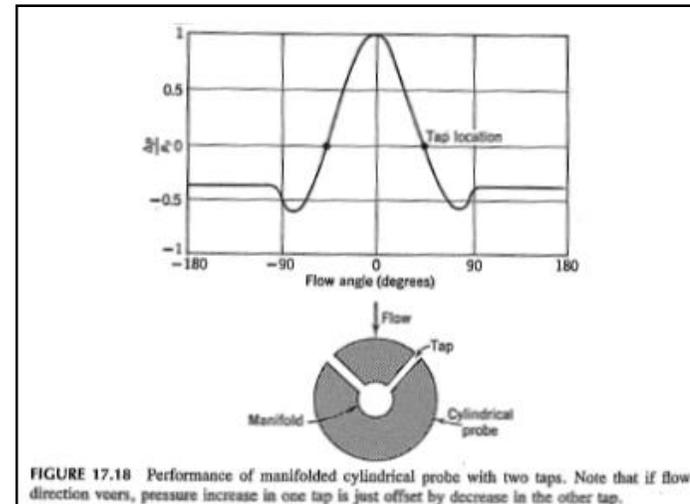
Sonde di pressione statica

Sonda Cilindrica

Nella figura sottostante è riportato l'andamento della pressione sulle pareti di un cilindro immerso in un fluido in moto



Sonde simmetriche con due prese di pressione statica. La sonda viene ruotata fino a che il DP sui due fori è nullo. In tale posizione ogni foro legge la pressione statica.



Misure di pressione totale

Pressione totale P_0 La pressione di ristagno si può definire come il valore a cui si porterebbe la pressione di un fluido in movimento, se a partire dalle condizioni locali fosse portato con un processo isoentropico fino a velocità nulla.

Se si considera un corpo immerso in un fluido la pressione totale si ottiene nel punto di ristagno. Una presa di pressione statica posizionata sul punto di ristagno leggerà la pressione totale

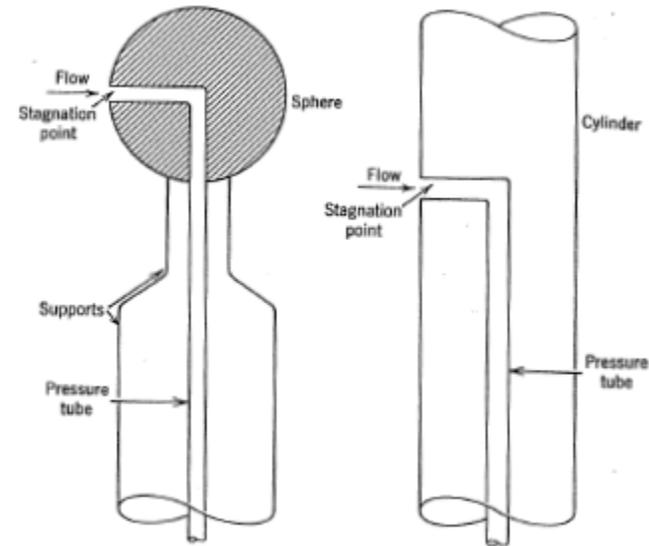


FIGURE 17.24 Aerodynamic total pressure probes.

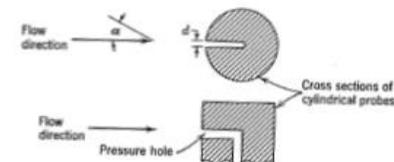
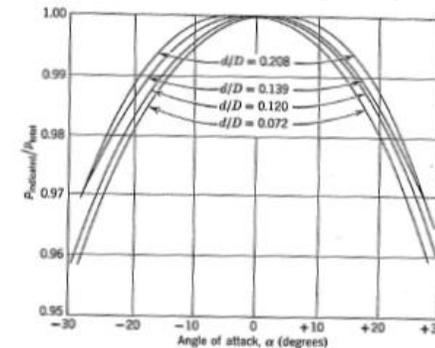


FIGURE 17.26 Variation of total pressure indication with angle of attack and hole size for cylindrical probes perpendicular to flow.

Misure di pressione totale

Influenza dell'allineamento tra sonda e flusso

Il valore letto dalle sonde di pressione totale dipende dall'allineamento della sonda con la direzione del flusso. La sensibilità della sonda dipende dalla sua geometria.

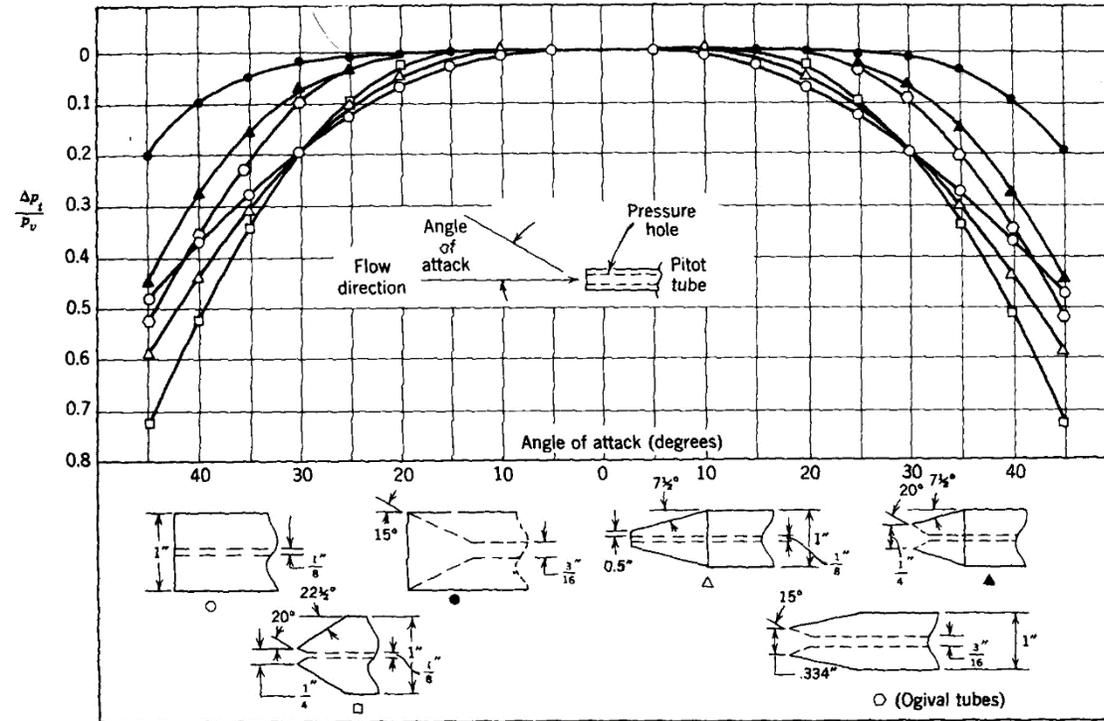
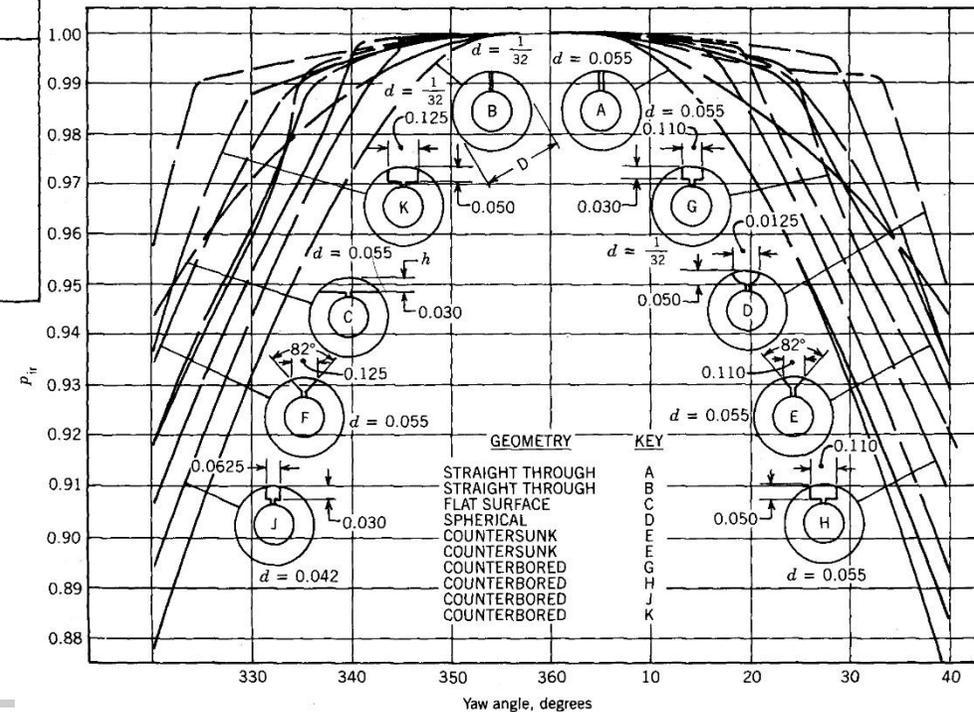
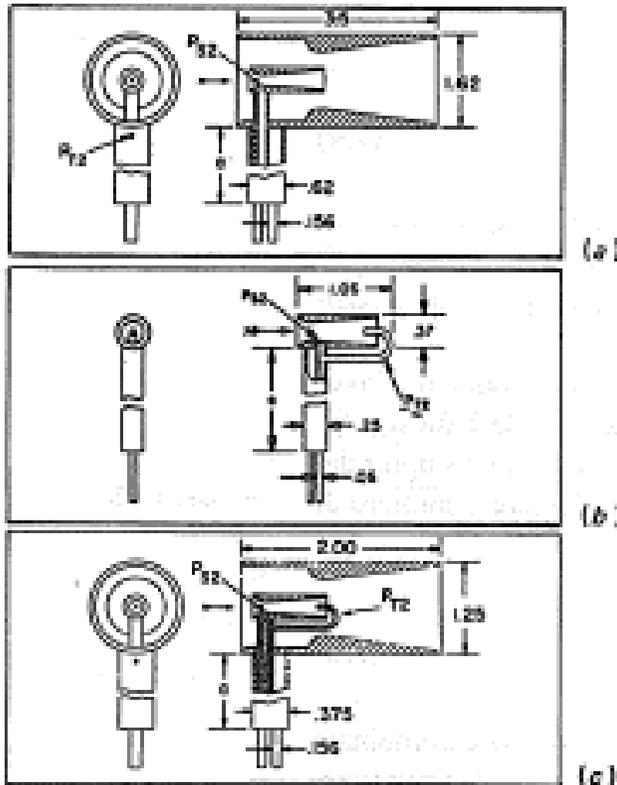


FIGURE 17.25 Characteristics of several Pitot tubes in regard to flow alignment. (Source: After Gracey et al. [29].)



Misure di pressione Totale Sonde schermate - Kiel

Lo schermo aumenta il campo di insensibilità della sonda, questa può essere utilizzata in un flusso variabile senza doverla orientare ogni volta.



Sonda Kiel



Sonda Kiel
e
Rake di Kiel



Tubo di Pitot

Il tubo di Pitot permette di acquisire contemporaneamente la pressione statica e quella totale. In regime di moto incomprimibile:

- $DP = P_0 - P = \rho c^2 / 2$

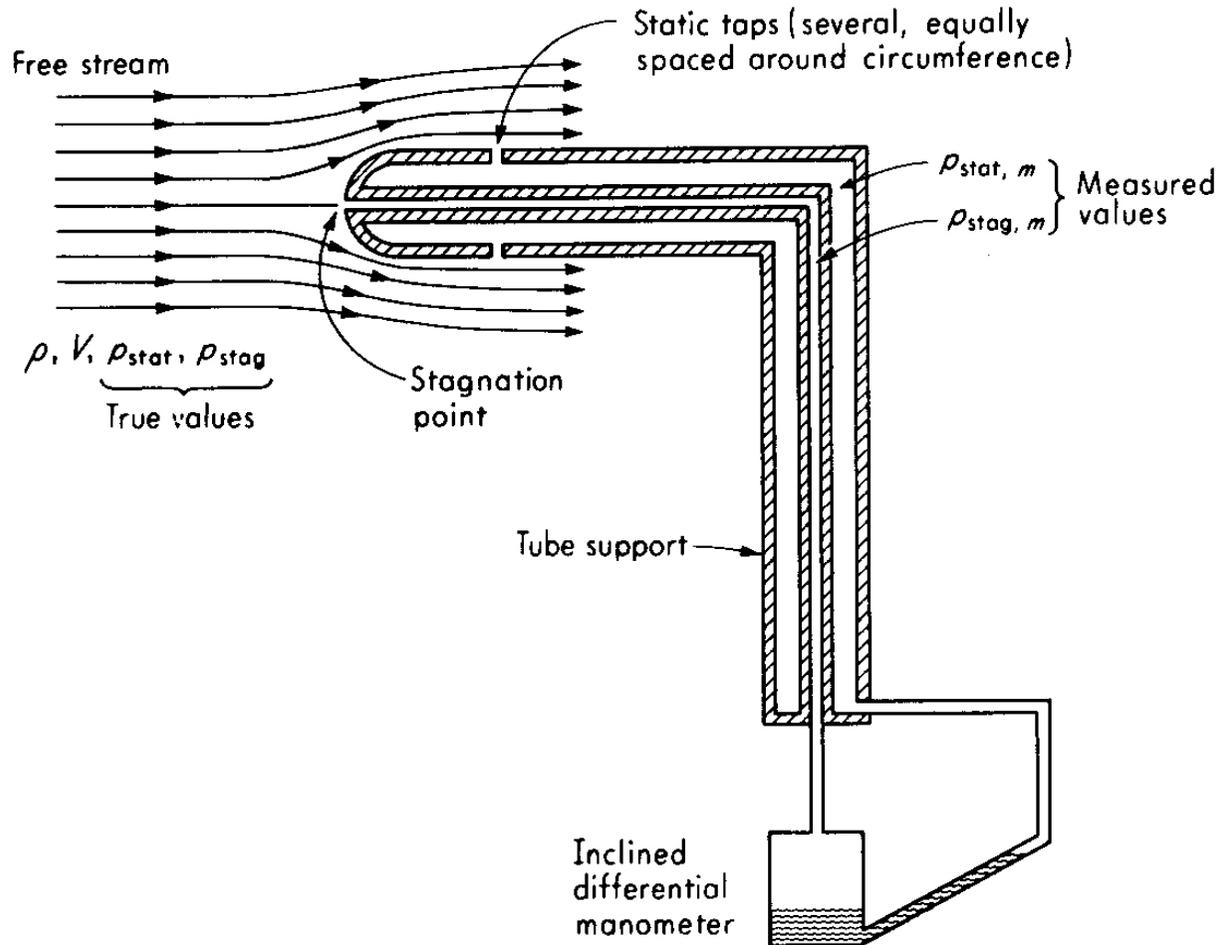


Figure 7.1 Pitot-static tube.

Sonde direzionali

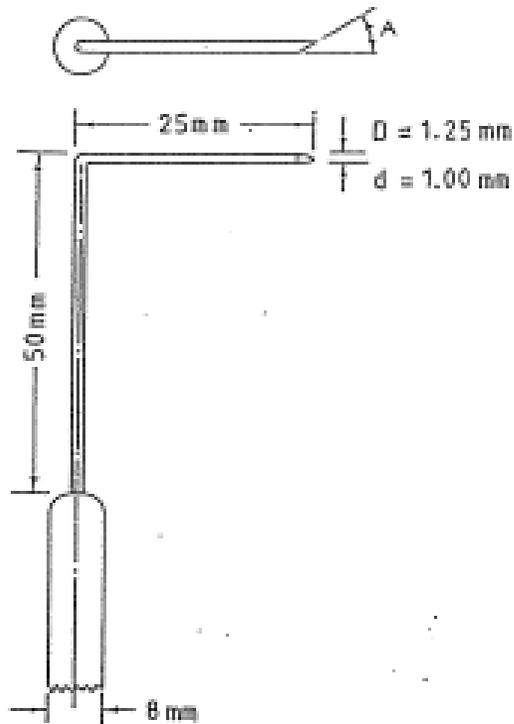


Fig. III.32 - Slanted tube geometry for yaw angle measurement

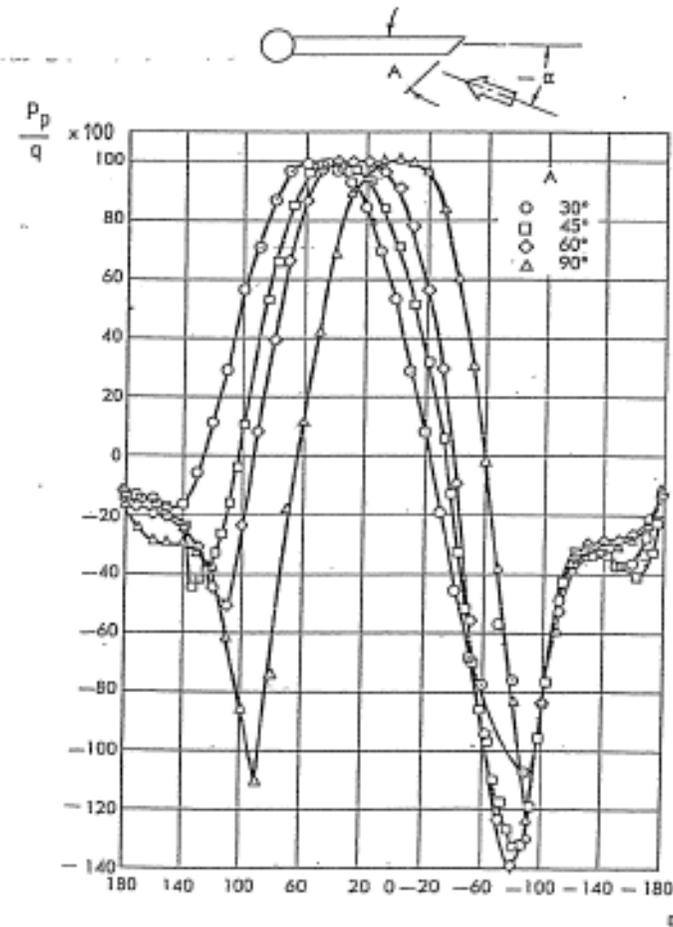


Fig. III.33 - Indicated pressure versus yaw angle of different slanted tube probes

Sonde direzionali

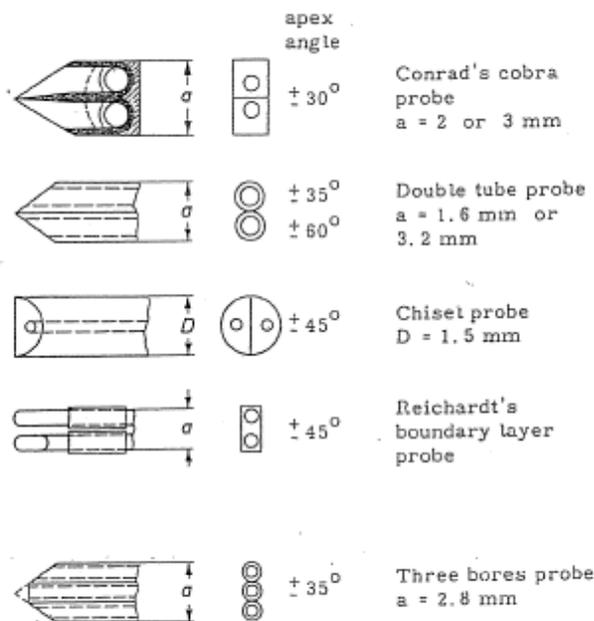
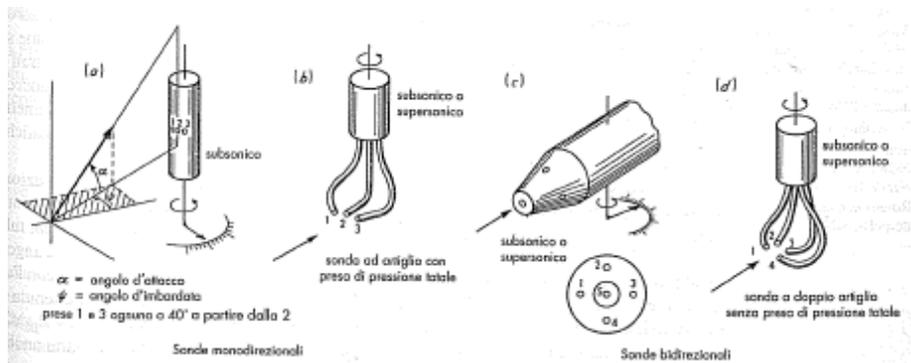


Fig. III.34 - Two dimensional flow directional probes [4]

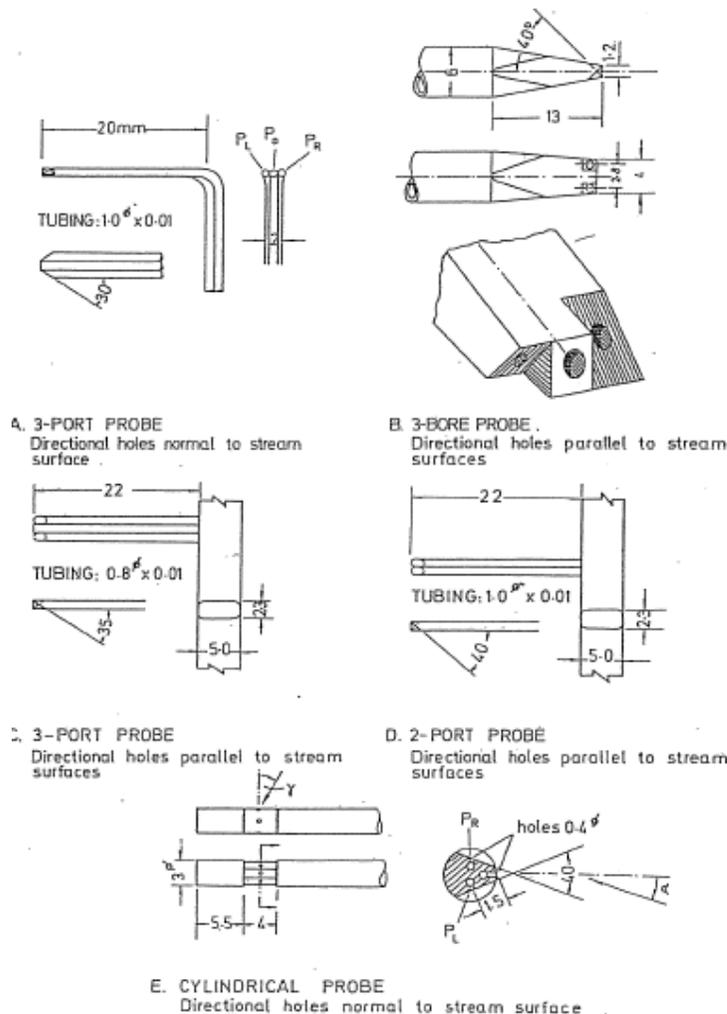


Fig. III.35 - Various types of two dimensional probes [35]

Sonde direzionali

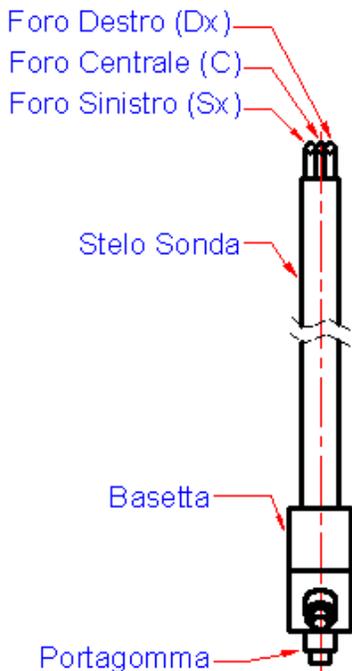
Coefficienti caratteristici

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.

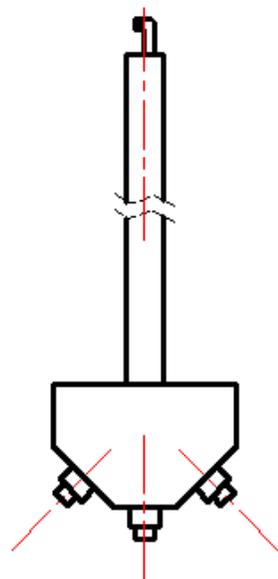
Per la riduzione dei dati delle sonde tre fori si possono utilizzare due seguenti serie di coefficienti da utilizzare uno con procedura iterativa e l'altro con procedura di riduzione diretta.

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



Vista Frontale



Vista Laterale



Coefficienti per procedura iterativa

$$C_b = \frac{P_d - P_s}{P_t - P} \quad C_{ps} = \frac{P_d + P_s - P}{2(P_t - P)} \quad C_{pt} = \frac{P_C - P_t}{P_t - P}$$

Coefficienti per procedura diretta

$$C_{b1} = \frac{P_d - P_s}{P_C - \frac{P_s + P_d}{2}} \quad C_{ps1} = \frac{P_C - P_t}{P_t - P} \quad C_{pt1} = \frac{P_C - \frac{P_s - P_d}{2}}{P_t - P}$$

Sonde direzionali

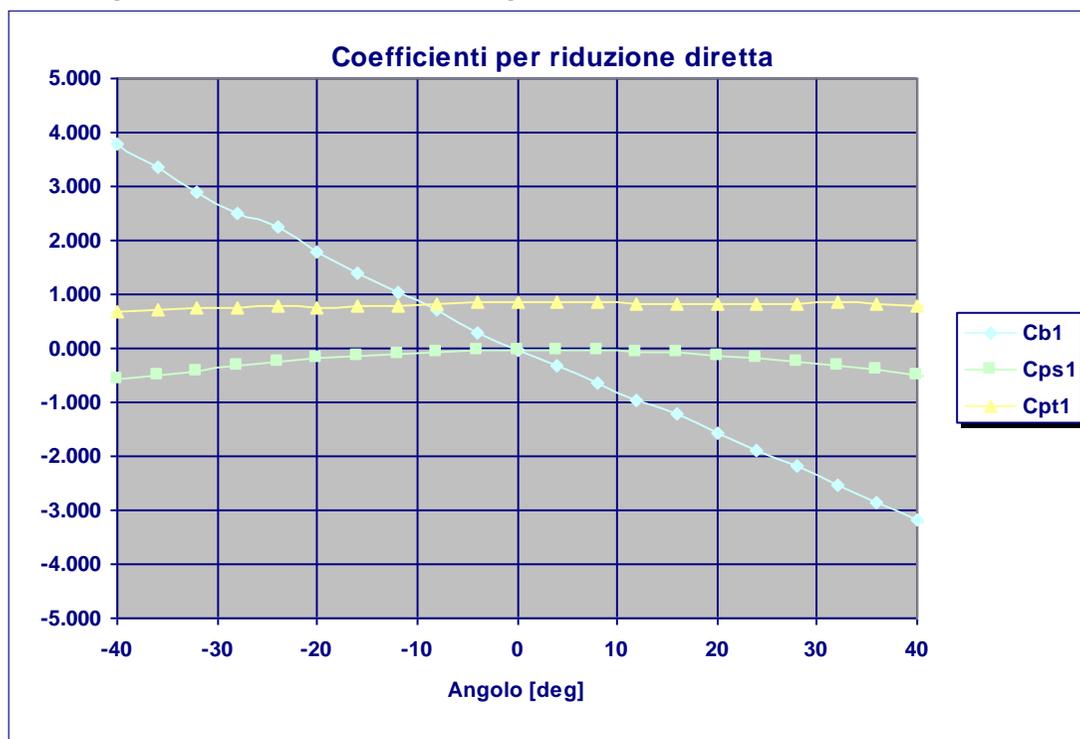
Coefficienti caratteristici

$$C_{b1} = \frac{P_d - P_s}{P_c - \frac{P_s + P_d}{2}} \quad C_{ps1} = \frac{P_c - P_t}{P_t - P} \quad C_{pt1} = \frac{P_c - \frac{P_s - P_d}{2}}{P_t - P}$$



La galleria tarasonde del Dipartimento di Energetica

Esempio di curva caratteristica per sonda direzionale cobra



Sonde direzionali 3D

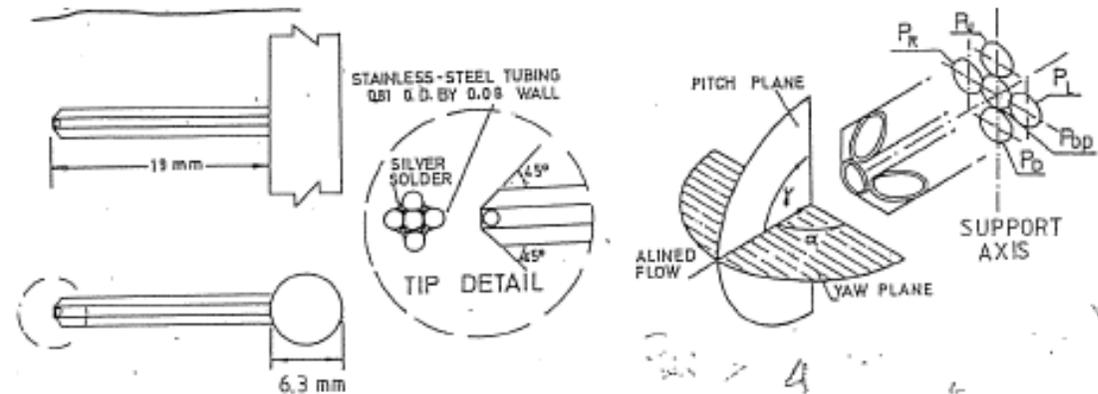


Fig. III.39 - Three dimensional flow direction probe

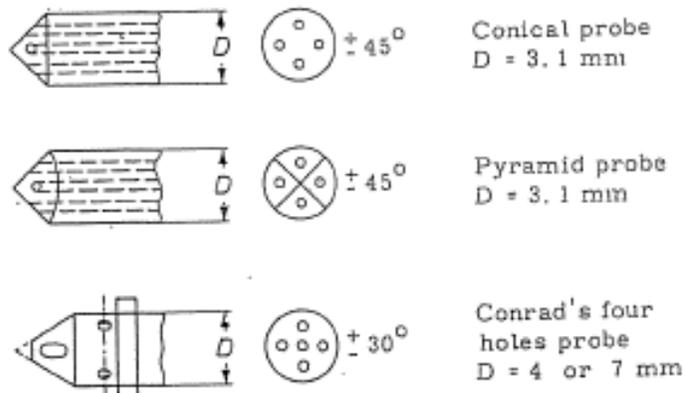


Fig. III.41 - Three dimensional flow direction probes [4]





Sonde direzionali 3D

SET A (intrinsic)

$$C_{yaw} = \frac{p_r - p_l}{p_c - \frac{(p_l + p_r + p_u + p_d)}{4}}$$

$$C_{pitch} = \frac{p_u - p_d}{p_c - \frac{(p_l + p_r + p_u + p_d)}{4}}$$

$$C_{pt} = \frac{p_c - p_t}{p_c - \frac{(p_l + p_r + p_u + p_d)}{4}}$$

$$C_{pd} = \frac{p_t - p_s}{p_c - \frac{(p_l + p_r + p_u + p_d)}{4}}$$

p_c = pressure, central hole

p_l = pressure, left hole

p_d = pressure, down hole

p_t = effective total pressure

SET B (reference)

$$C'_{yaw} = \frac{p_r - p_l}{p_t - p_s}$$

$$C'_{pitch} = \frac{p_u - p_d}{p_t - p_s}$$

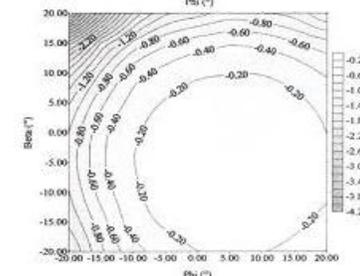
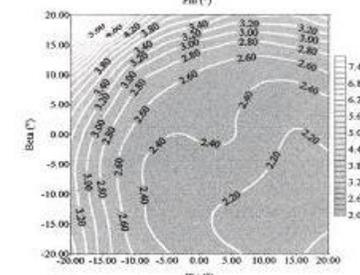
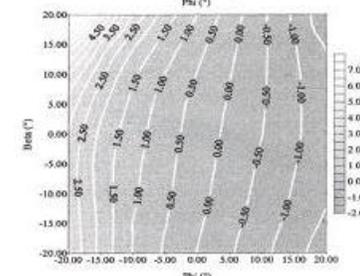
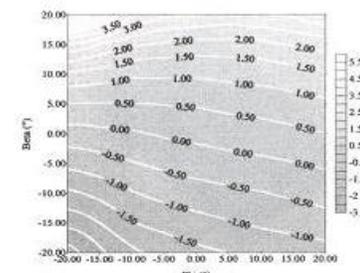
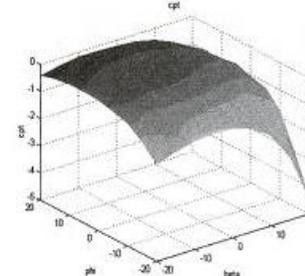
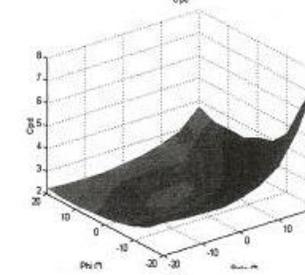
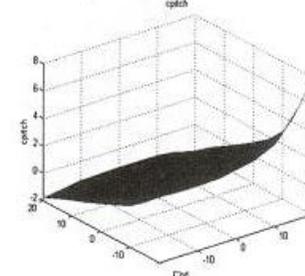
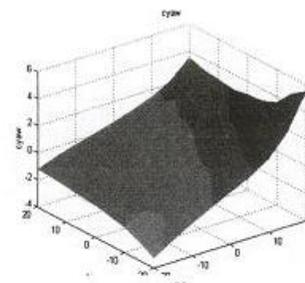
$$C'_{pt} = \frac{p_c - p_t}{p_t - p_s}$$

$$C'_{pd} = \frac{p_c - \frac{(p_l + p_r + p_u + p_d)}{4}}{p_t - p_s}$$

p_r = pressure, right hole

p_u = pressure, up hole

p_s = effective static pressure





GRAZIE
per
L'ATTENZIONE

