

# Corso di misure meccaniche, termiche e collaudi

## Misure di pressione

Prof. Rodolfo Taccani



# Introduzione

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

$$p = \frac{F_{\perp}}{S}$$

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

# Unità di misura della pressione

- pascal (Pa): nel Sistema Internazionale, 1 newton su metro quadro ( $1 \text{ N/m}^2$  o  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ );
- Baria: nel Sistema CGS ( $\text{dina/cm}^2$ );
- Bar: ( $10^5 \text{ Pa} = 1 \text{ daN/cm}^2$ ) (sono molto diffusi alcuni sottomultipli del bar, in particolare il millibar è molto usato in meteorologia ed il microbar in acustica);
- torr: pressione esercitata da una colonna di mercurio alta 1 mm (9.81 Pa);
- atmosfera (atm): approssimativamente pari alla pressione esercitata dall'atmosfera terrestre al livello del mare ( $101325 \text{ Pa} = 760 \text{ mmHg} = 760 \text{ torr}$ );
- atmosfera tecnica (at o ata): pari a  $1 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$  (10.000 mmH<sub>2</sub>O), di poco inferiore all'atmosfera (0,96784 atm). Spesso distinta in ata, intesa come pressione assoluta, e ate, come pressione relativa.

# 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.

Le tipologie principali di manometri sono tre:

- Manometri a liquido;
- Manometri metallici;
- Manometri elettrici.

# Manometri a liquido

**Manometro 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.

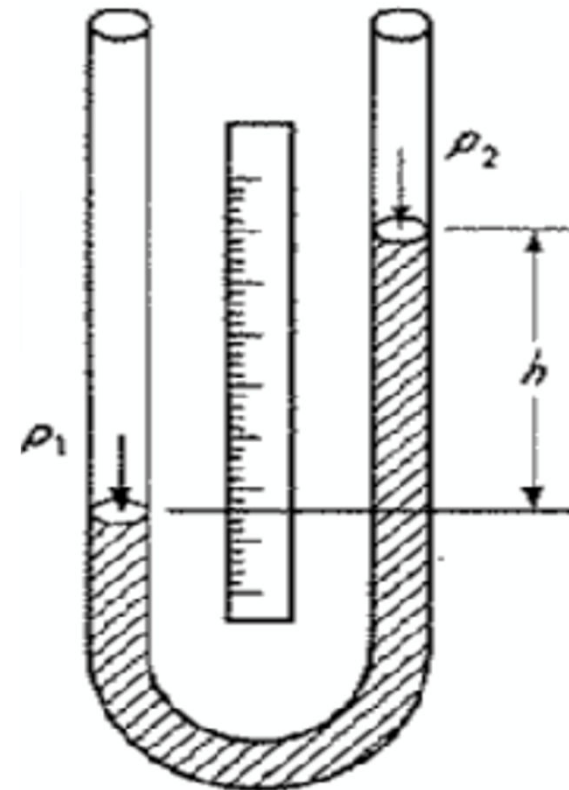
$$h = \frac{p_1 - p_2}{\rho g}$$



NON dipende dall'area della sezione trasversale del tubo

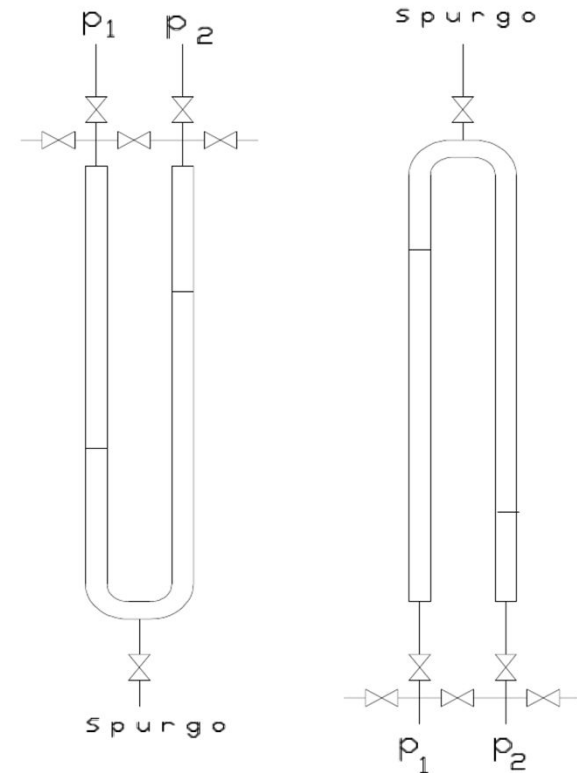
$g$  : accelerazione di gravità;

$\rho$  : densità del fluido.



# Manometri a liquido

- 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, alcool e (mercurio).
- L'utilizzo di acqua é 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 (problemi di sicurezza).



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  $\rho$  del fluido manometrico per effetto della variazione di temperatura;
- Non perfetta verticalità dei tubi;
- Difficoltà nella lettura di  $h$  dovuta al menisco.

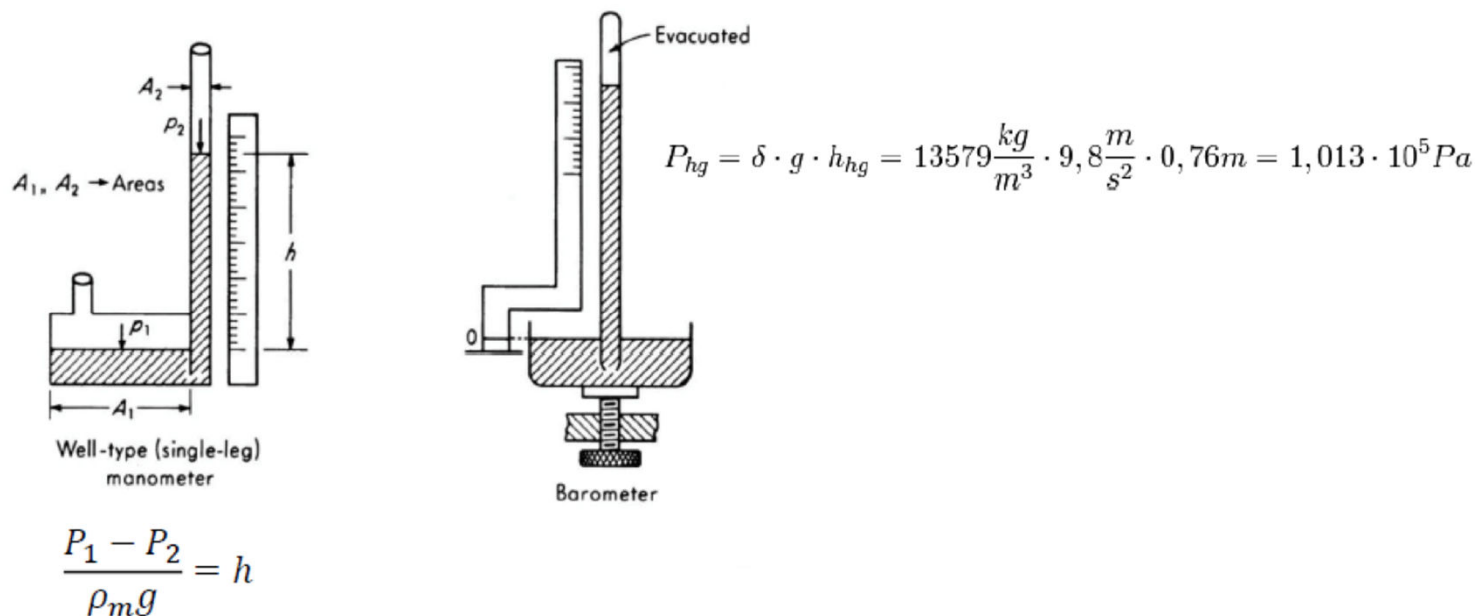
# Manometri a liquido

## 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.

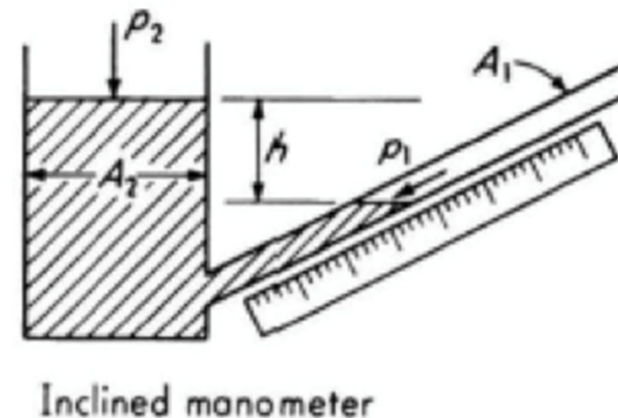


# Manometri a liquido

## Manometro a tubo inclinato

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.

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho_m g} = h = l \cdot \sin \vartheta$$

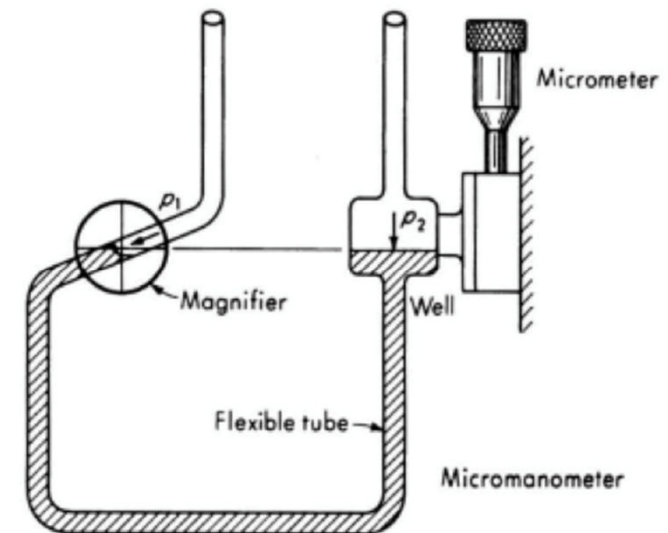




# Manometri a liquido

## Micromanometro

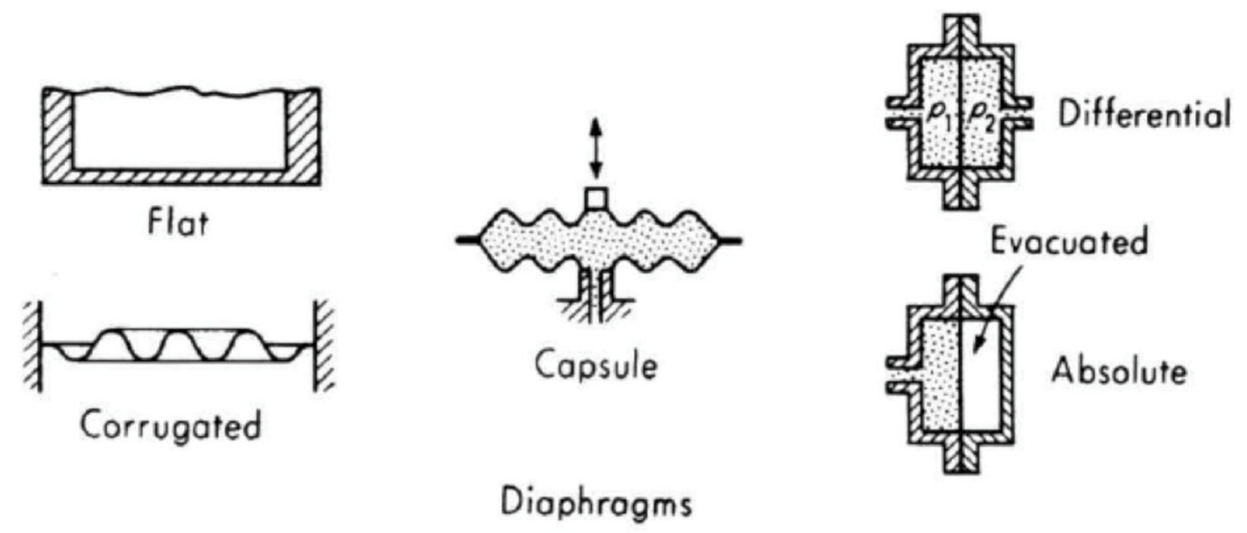
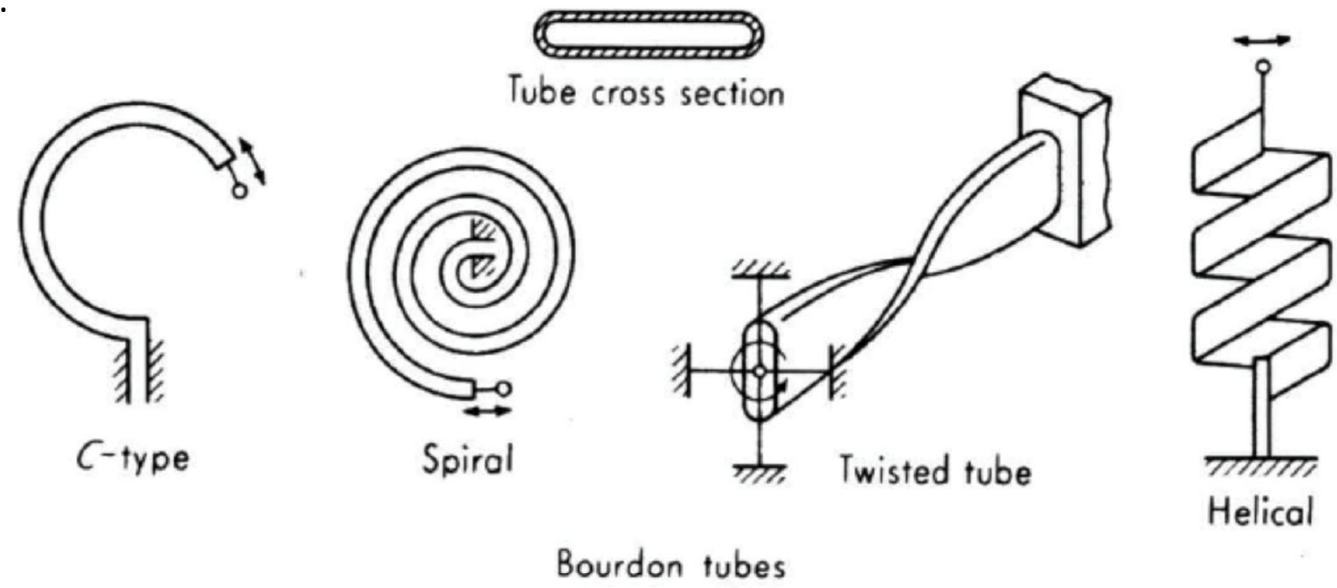
Per una misura accurata di differenze di pressione molto piccole si usa il micromanometro. Lo strumento è regolato in modo che quando  $p_1 = p_2$  il menisco del tubo inclinato risulti in un punto di riferimento. L'applicazione della differenza di pressione causa lo spostamento del menisco dalla linea 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.



Manometro differenziale (di Prandtl) ad azzeramento :

# Manometri metallici

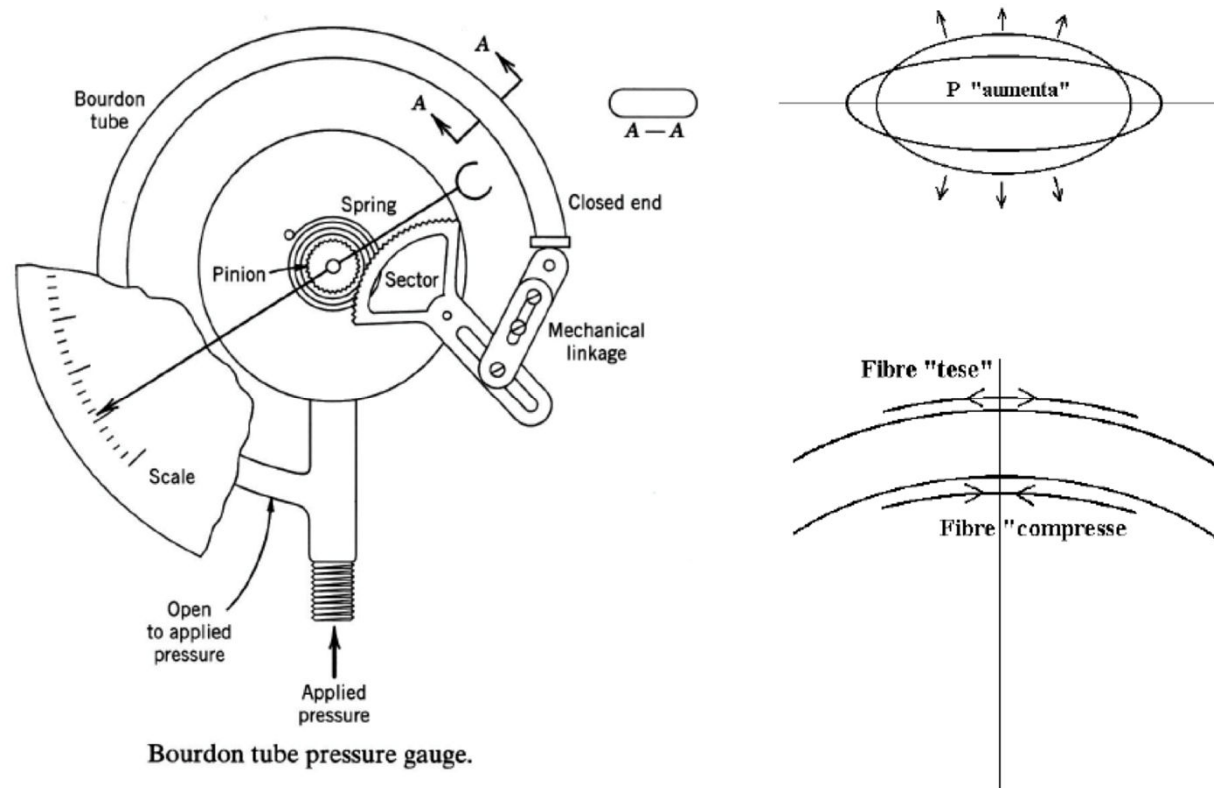
Tutti basati sulla deformazione di un elemento elastico sul quale agiscono le forze di pressione:



# Manometri metallici

## Tubo di Bourdon:

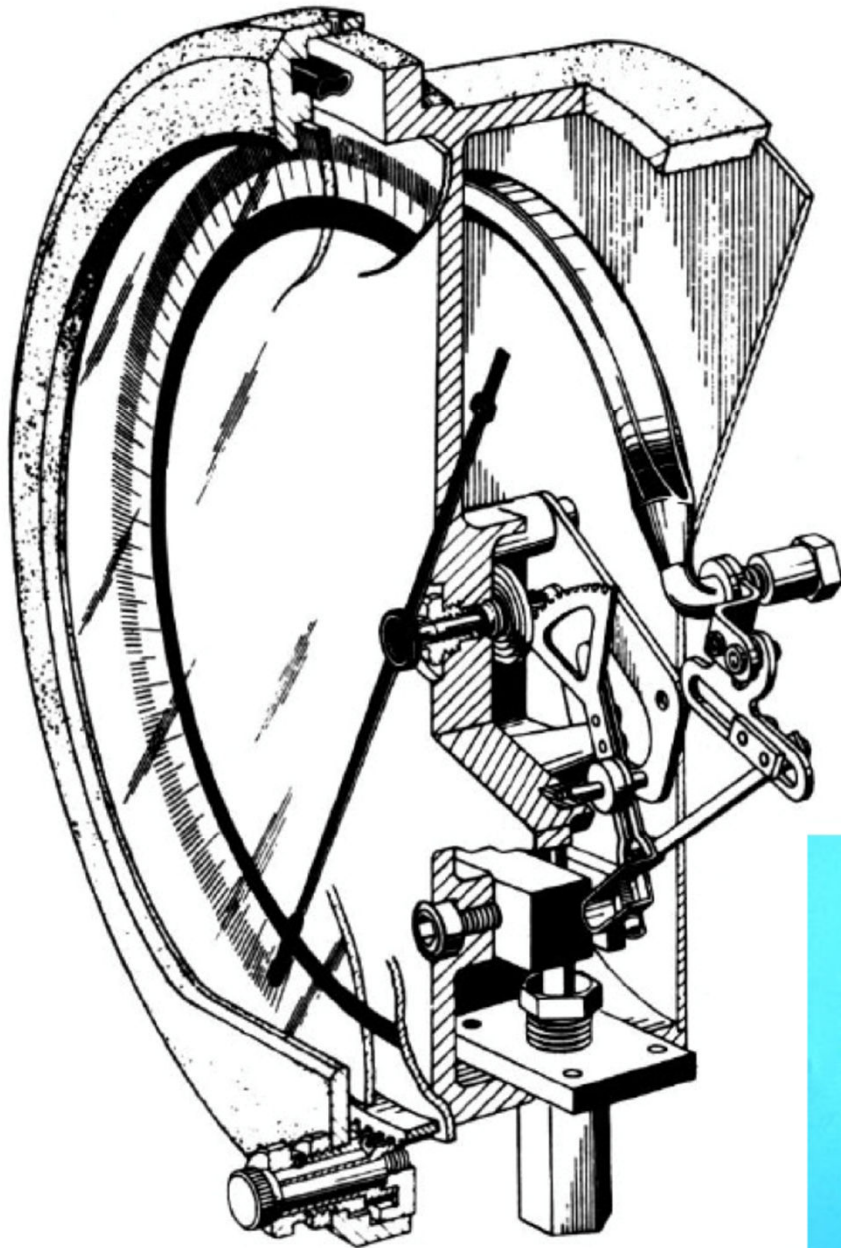
l'elemento base in tutte le sue varianti è un tubo a sezione non circolare. Una differenza di pressione fra l'interno e l'esterno del tubo fa sì che il tubo tenda ad assumere una sezione circolare.



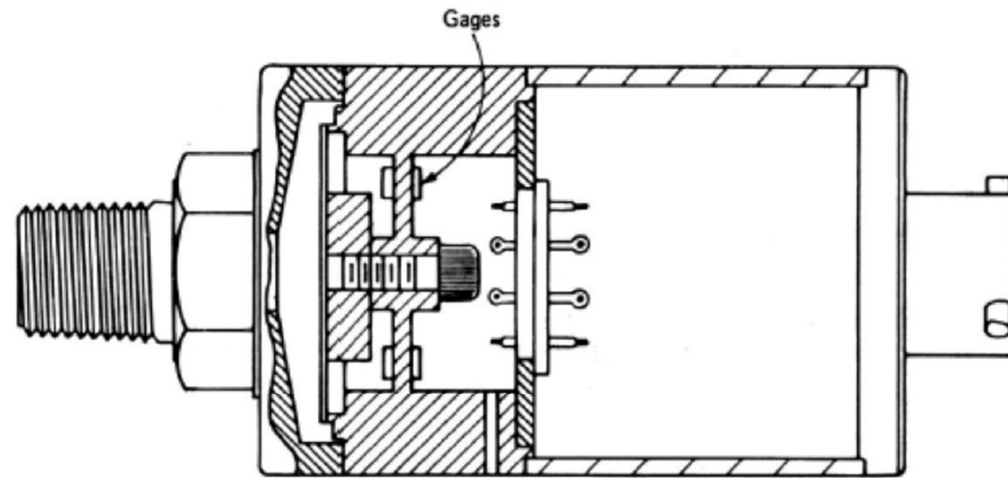
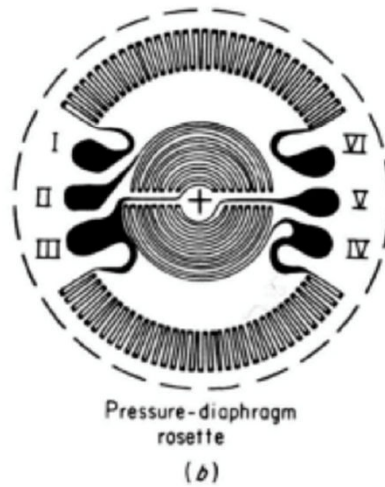
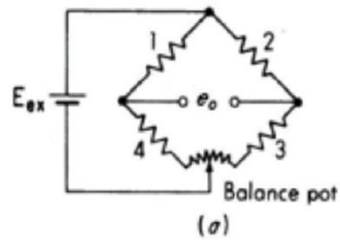
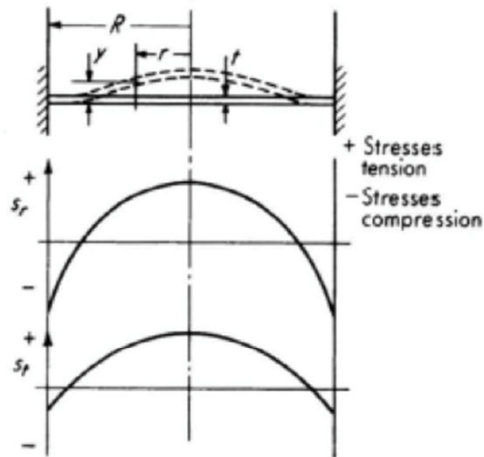
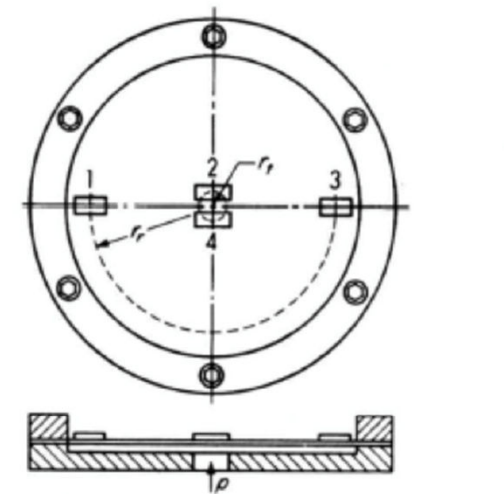
Questo comporta delle deformazioni che portano ad una traslazione secondo una traiettoria curvilinea dell'estremità libera della forma C.

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.

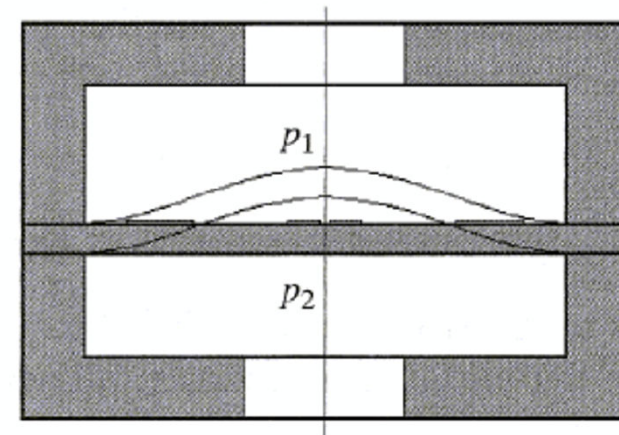
# Tubo di Bourdon



# Manometri a membrana o diaframma

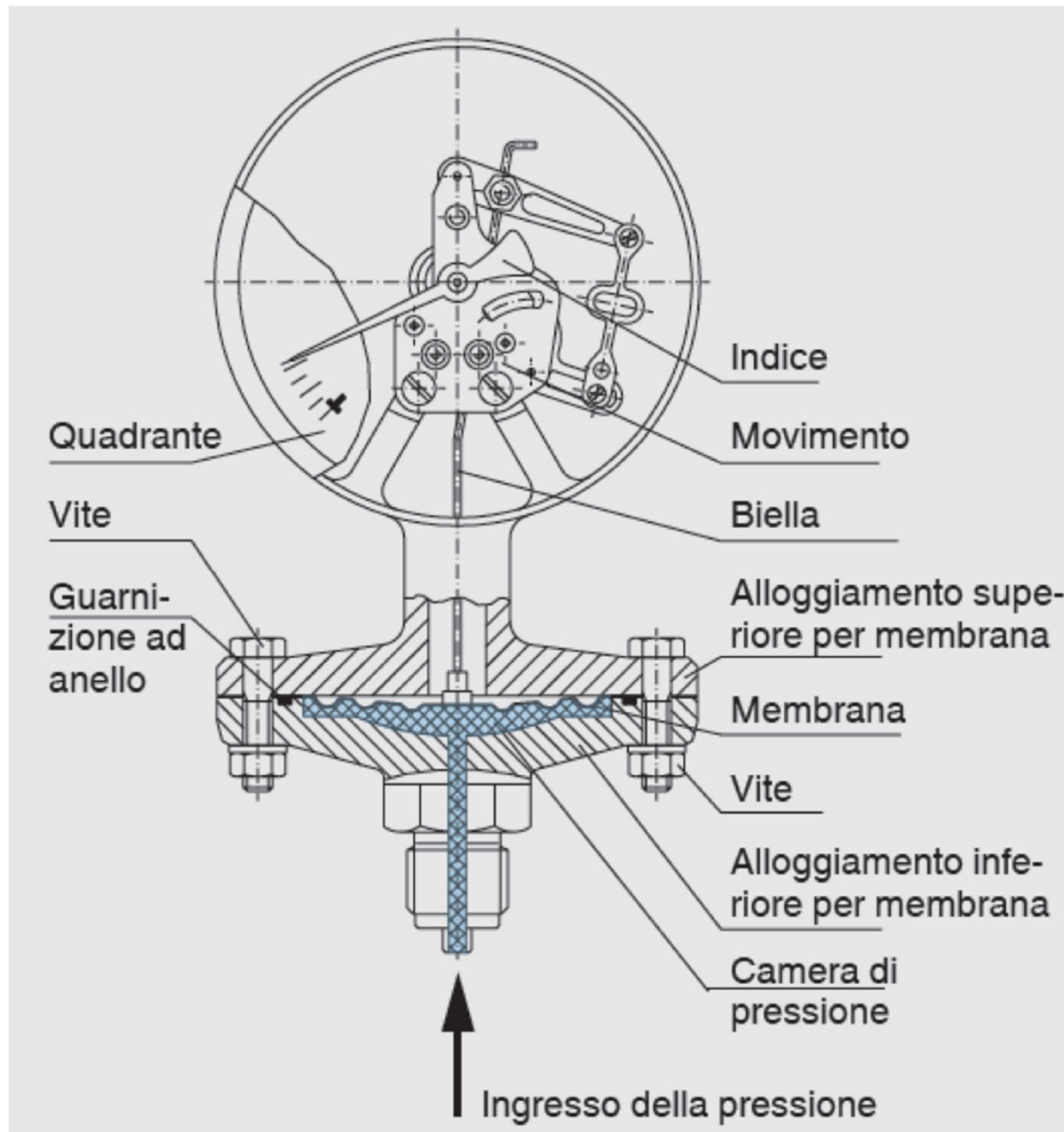


Bonded foil strain-gage pressure transducer. (Courtesy Sensotec Inc., Columbus, Ohio.)

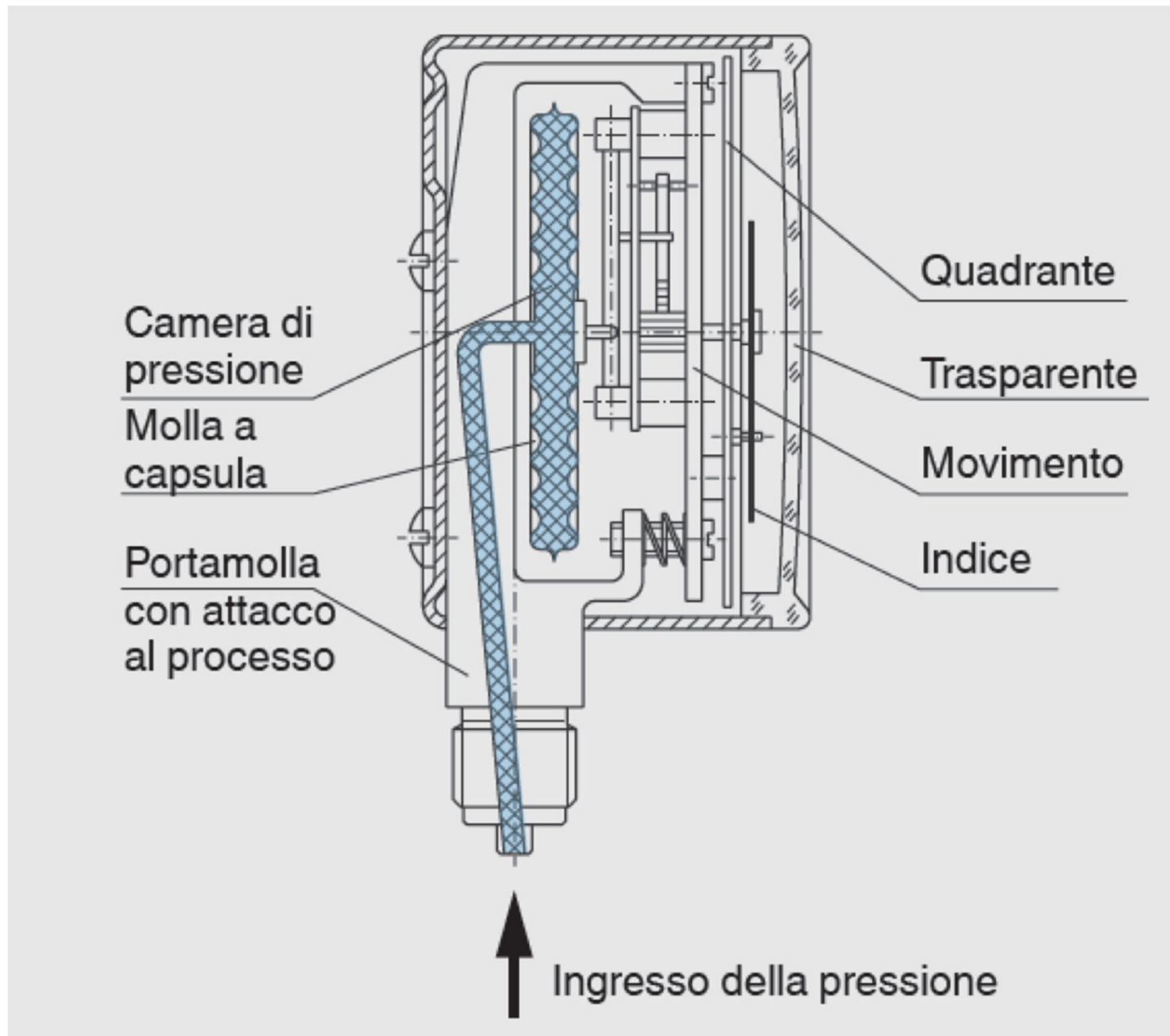


Diaphragm-type strain-gage pressure pickup.

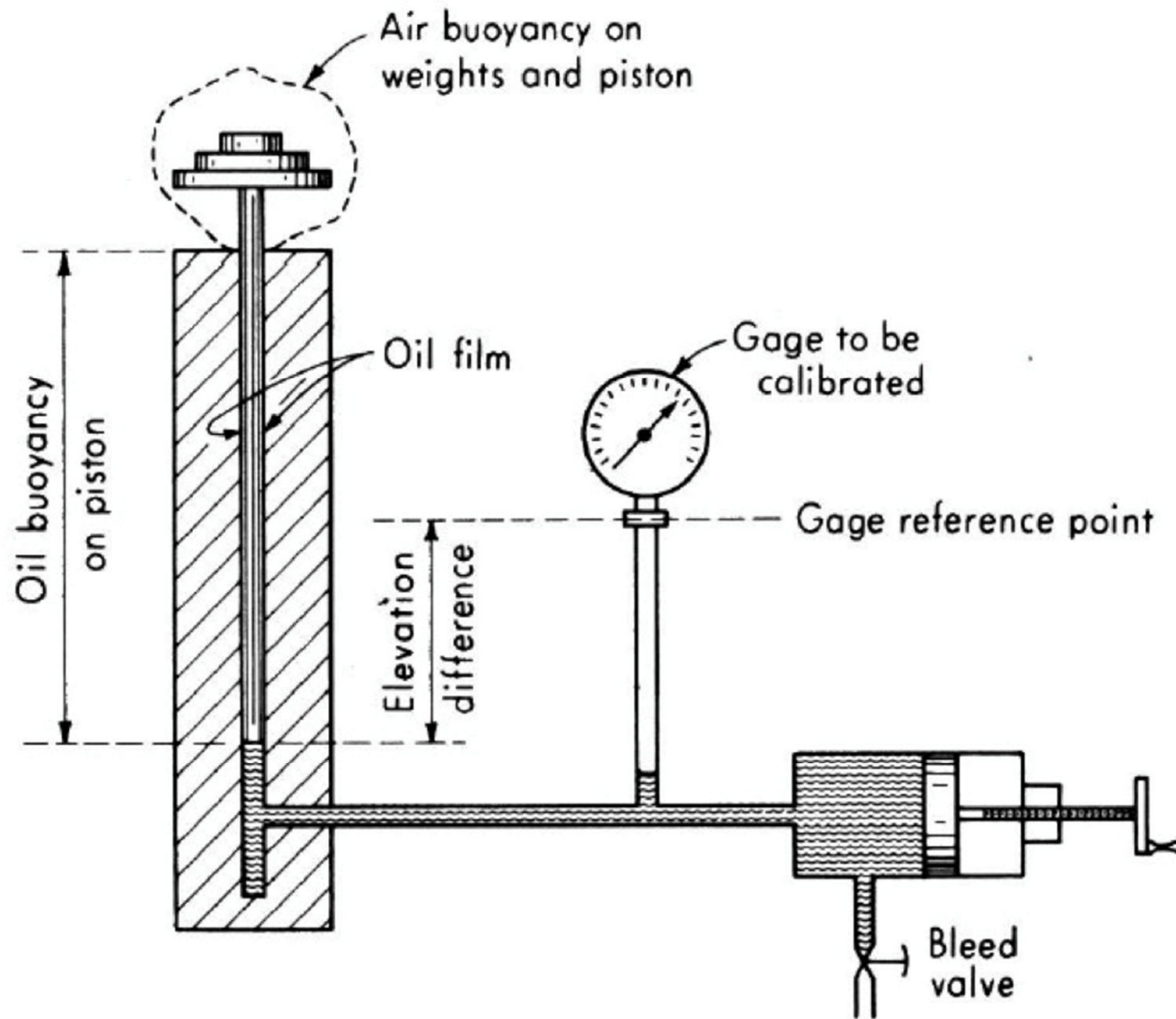
# Manometri a membrana



# Manometri a capsula



# Banco di taratura manometri



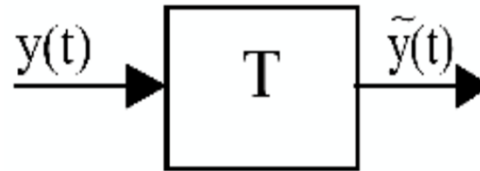
Deadweight gage calibrator.



# Manometri elettrici

## 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.

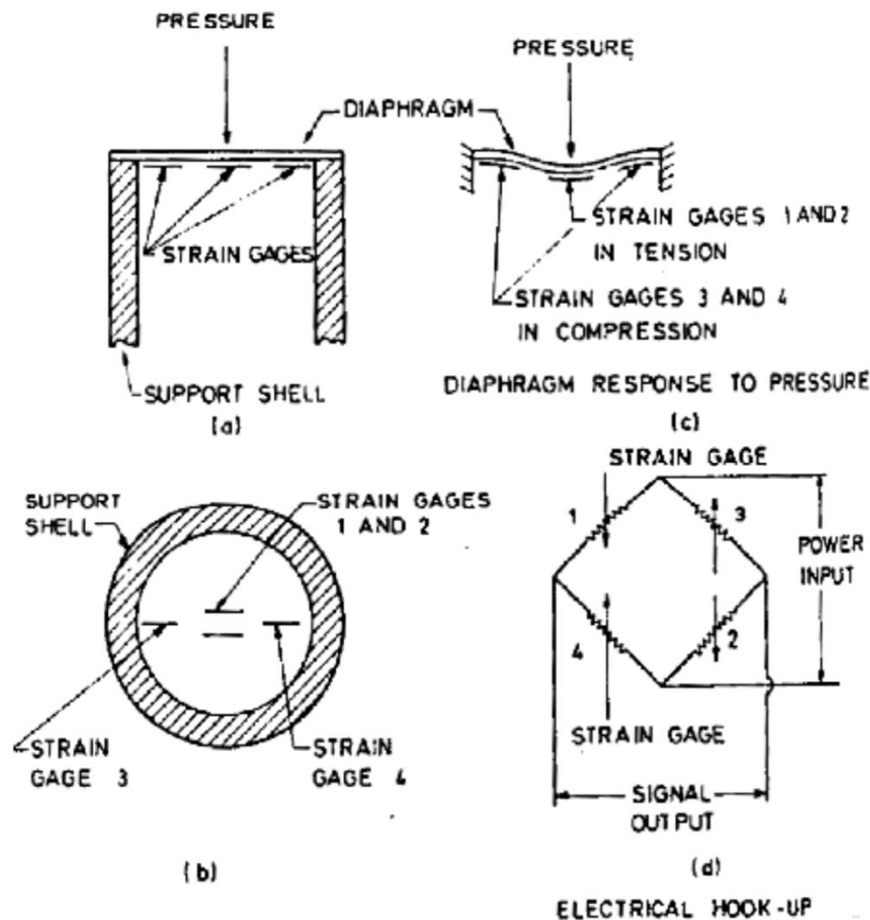
Prescindendo dal principio di misura (che può essere relativamente influente per molte applicazioni) il costo di un trasduttore è fortemente influenzato dalla qualità esecutiva e dell'elettronica; dall'eventuale compatibilità con liquidi (anche corrosivi) e con flussi carichi di particolato; dal valore di pressione di linea sopportabile nel caso di esecuzioni differenziali; dal grado di miniaturizzazione, fondamentale per ottenere come si è visto buone capacità di risposta dinamica.

# Trasduttori di pressione

	Specifications	Model S-10 / S-11											
<b>Pressure Range</b>	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
<b>Materials</b>	Pressure ranges	bar	16	25	40	60	100	160	250	400	600	1000 <sup>1)</sup>	
	Over pressure safety	bar	80	50	80	120	200	320	500	800	1200	1500	
	Burst pressure	bar	96	96	400	550	800	1000	1200	1700 <sup>2)</sup>	2400 <sup>2)</sup>	3000	
			(Vacuum, gauge pressure, compound range, absolute pressure are available)										
<b>Power supply Signal output</b>	Materials		Stainless steel (other materials see WIKA diaphragm seal program)										
	Wetted parts		Stainless steel										
	Case		Stainless steel (Hastelloy C4)										
<b>Response Time</b>	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) <sup>4)</sup> (Listed by FDA for food industry)										
	Power supply U <sub>B</sub>	DC V	10 < U <sub>B</sub> ≤ 30 (14 ... 30 with signal output 0 ... 10 V)										
	Signal output and maximum load R <sub>A</sub>		4 ... 20 mA, 2-wire R <sub>A</sub> ≤ (U <sub>B</sub> - 10 V) / 0,02 A with R <sub>A</sub> in Ohm and U <sub>B</sub> in Volt 0 ... 20 mA, 3-wire R <sub>A</sub> ≤ (U <sub>B</sub> - 3 V) / 0,02 A with R <sub>A</sub> in Ohm and U <sub>B</sub> in Volt (0 ... 5 V, 3-wire) R <sub>A</sub> > 5 kOhm (0 ... 10 V, 3-wire) R <sub>A</sub> > 10 kOhm (other signal outputs on request)										
<b>Accuracy Hysteresis Repeatability</b>	Adjustability zero/span	%	± 10 via potentiometers in the instrument										
	Response time (10 ... 90 %)	ms	≤ 1 (≤ 10 ms at medium temperatures below -30 °C for pressure ranges up to 25 bar or with flush diaphragm)										
	Accuracy <sup>5)</sup>	% of span	≤ 0,5 (0,25) <sup>6)</sup> (limit point calibration)										
<b>Temperature</b>	Hysteresis	% of span	≤ 0,25 (0,125) <sup>6)</sup> (BFSL)										
	Repeatability	% of span	≤ 0,1										
	Linearity	% of span	≤ 0,05										
<b>Temperature</b>	Permissible temperature of	% of span	≤ 0,2 (at reference conditions)										
	Medium		-30 ... +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					
<b>Temperature</b>	Storage		-20 ... +80 °C					-4 ... +176 °F					
	Storage		S-11 with cooling element: -20 ... +80 °C					S-11 with cooling element: -4 ... +176 °F					
	Storage		-40 ... +100 °C					-40 ... +212 °F					
<b>Temperature</b>	Compensated temp. range		S-11 with cooling element: -20 ... +100 °C					S-11 with cooling element: -4 ... +212 °F					
	Temperature coefficients in compensated temp range		0 ... +80 °C					32 ... +176 °F					
	Mean TC of zero	% of span	≤ 0,2 / 10 K (< 0,4 for pressure range < 250 mbar)										
	Mean TC of range	% of span	≤ 0,2 / 10 K										

# 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.

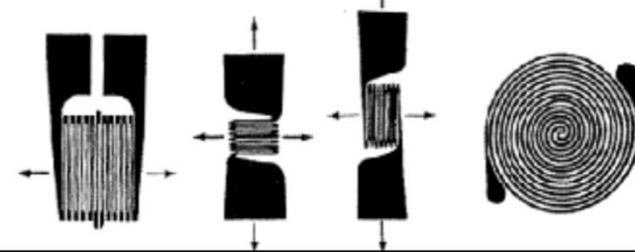


## Richiamo estensimetri

consideriamo un conduttore di sezione trasversale uniforme con resistività  $\rho$ , 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, mm<sup>2</sup>

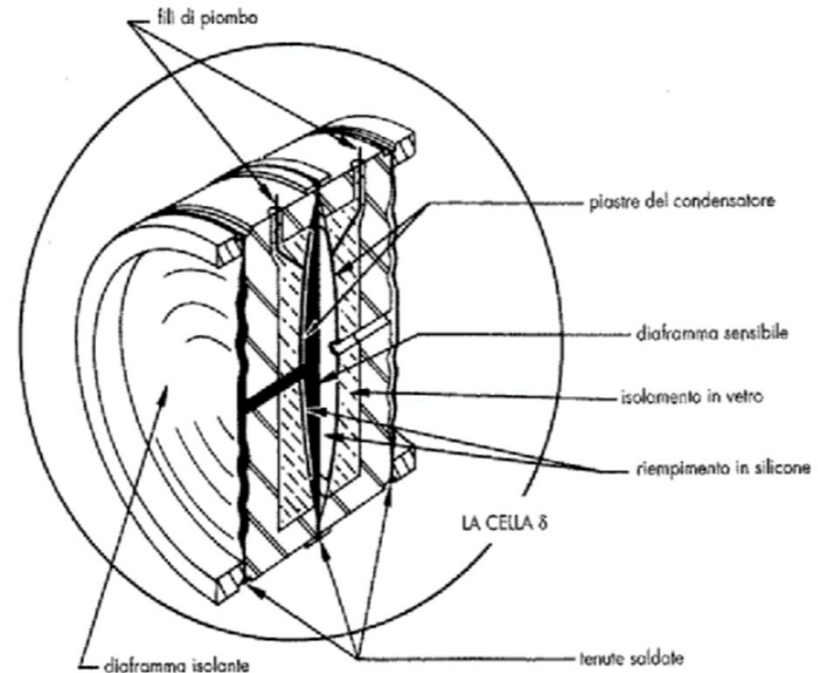
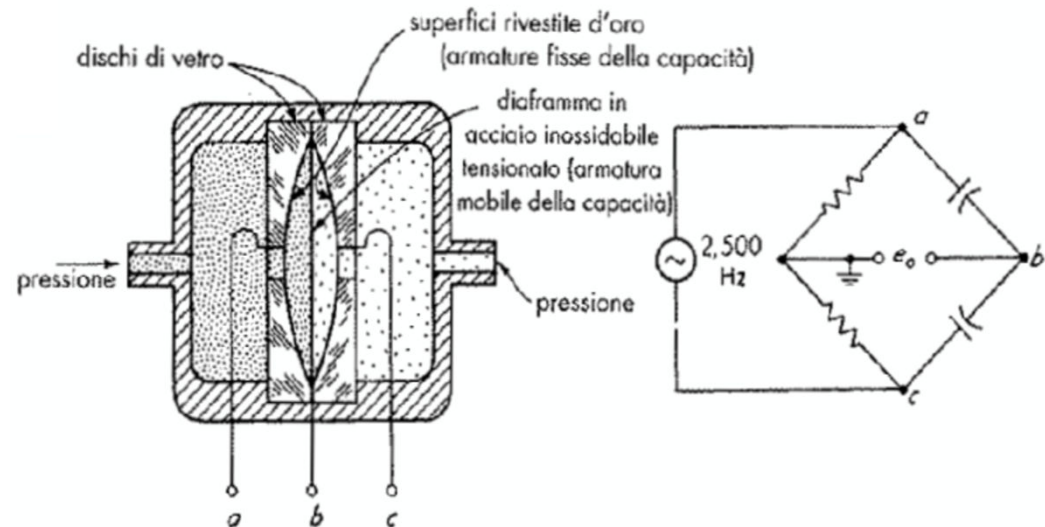
x: distanza tra le armature, mm

K: costante dielettrica del mezzo

c: costante (geometria)

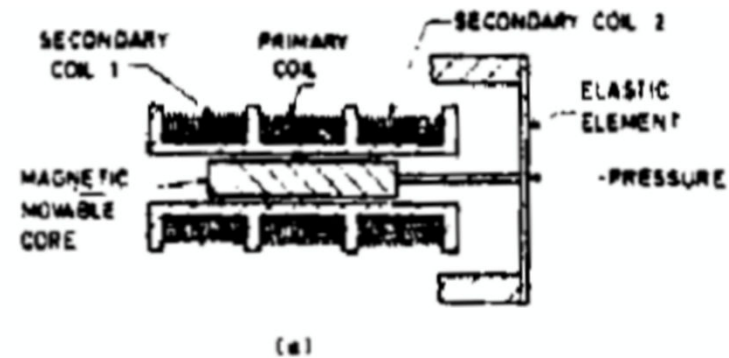
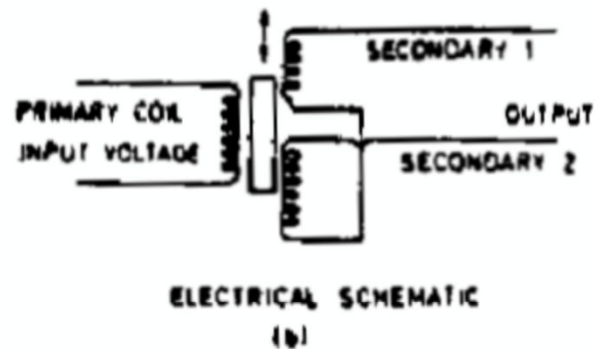
I traduttori differenziali presentano particolari difficoltà di progetto perché devono essere sensibili a piccole differenze di pressione, spesso con elevate pressioni di linea.

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.

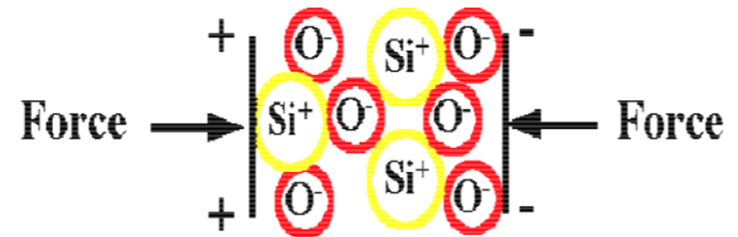


[www.wika.com](http://www.wika.com) [www.gemssensors.com](http://www.gemssensors.com) [www.druck-temperatur.de](http://www.druck-temperatur.de) [www.setra.com](http://www.setra.com)

# Trasduttori piezoelettrici

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

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

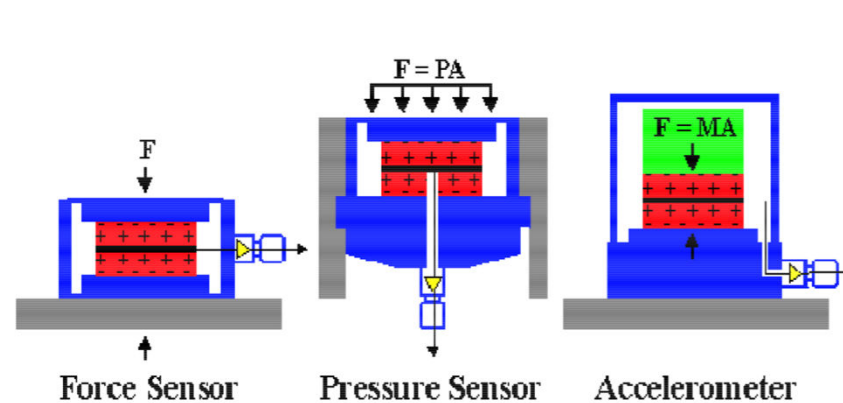


La misurazione di questa permette di risalire all'intensità della forza  $F$  agente sull'elemento. Conoscendo, quindi,  $F$  ed  $A$  (la superficie su cui viene applicata la forza) si può risalire alla pressione  $P$ .

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

# Trasduttori piezoelettrici

Possibili strutture di sensori che sfruttano l'effetto piezoelettrico



La rigidezza del cristallino è paragonabile a quella dell'acciaio.

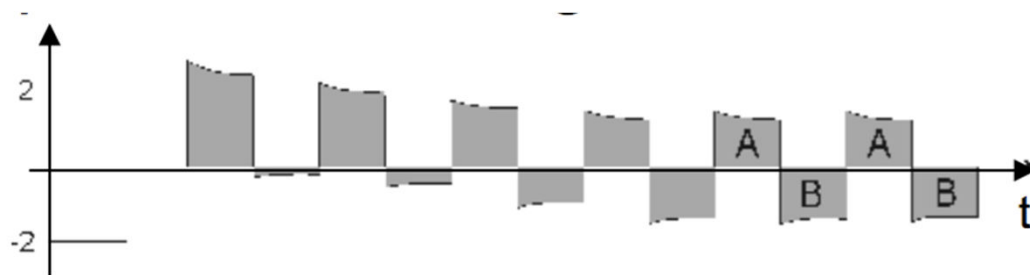
Si può misurare accelerazioni da 0.0001 a 100 m/s<sup>2</sup>.

Per la maggior parte dei casi l'elemento sensibile del trasduttore è in scatolato 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.

# Trasduttori piezoelettrici

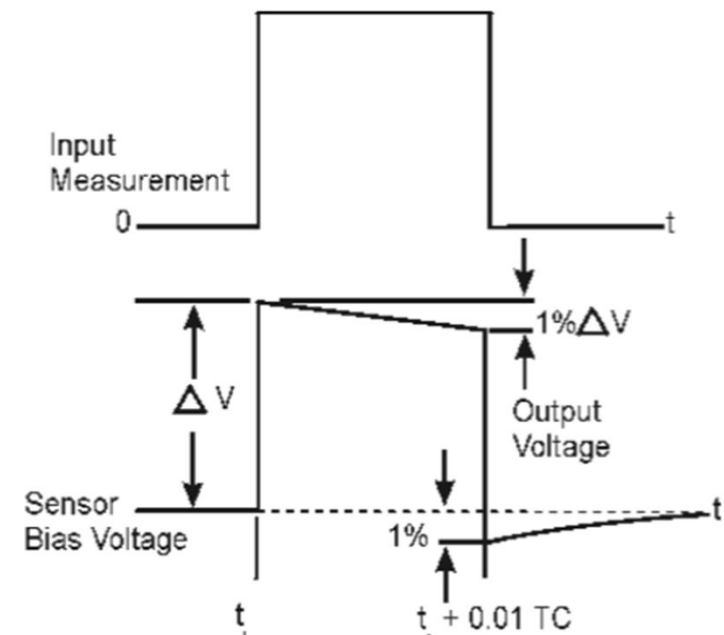
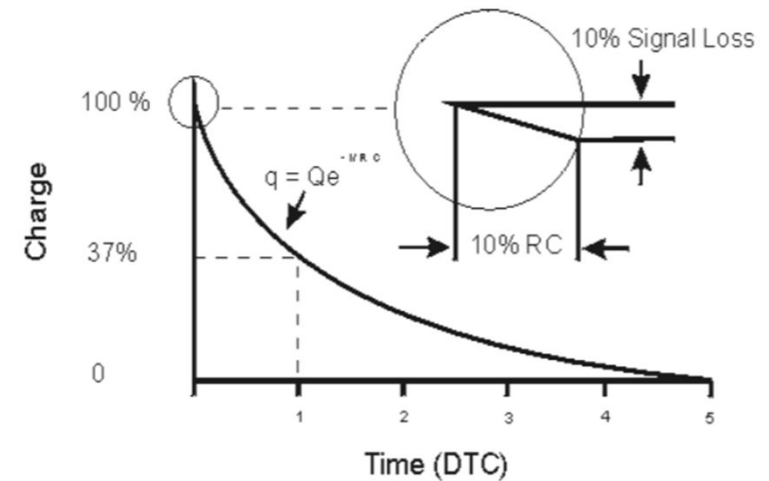
## Corrente di scarica

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



**Si perde la componente media del segnale**

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





# Trasduttori piezoelettrici

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 ( $\pm 0.1$ 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	$\geq 400$ kHz	$\geq 400$ kHz
Rise Time	$\leq 1.0$ $\mu$ sec	$\leq 1.0$ $\mu$ sec
Low Frequency Response (-5 %)	0.001 Hz	0.001 Hz
Non-Linearity	$\leq 2.0$ % FS	$\leq 2.0$ % FS [2]
<b>ENVIRONMENTAL</b>		
Acceleration Sensitivity	$\leq 0.002$ psi/g	$\leq 0.0014$ kPa/(m/s <sup>2</sup> )
Temperature Range (Operating)	-100 to +275 °F	-73 to +135 °C
Temperature Coefficient of Sensitivity	$\leq 0.03$ %/°F	$\leq 0.054$ %/°C
Maximum Flash Temperature	3000 °F	5400 °C
Maximum Shock	20,000 g pk	196,000 m/s <sup>2</sup> pk
<b>ELECTRICAL</b>		
Output Polarity (Positive Pressure)	Positive	Positive
Discharge Time Constant (at room temp)	$\geq 500$ sec	$\geq 500$ 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
<b>PHYSICAL</b>		
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



[www.pcb.com](http://www.pcb.com)

# Trasduttori piezoresistivi

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

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

# Trasduttori piezoresistivi

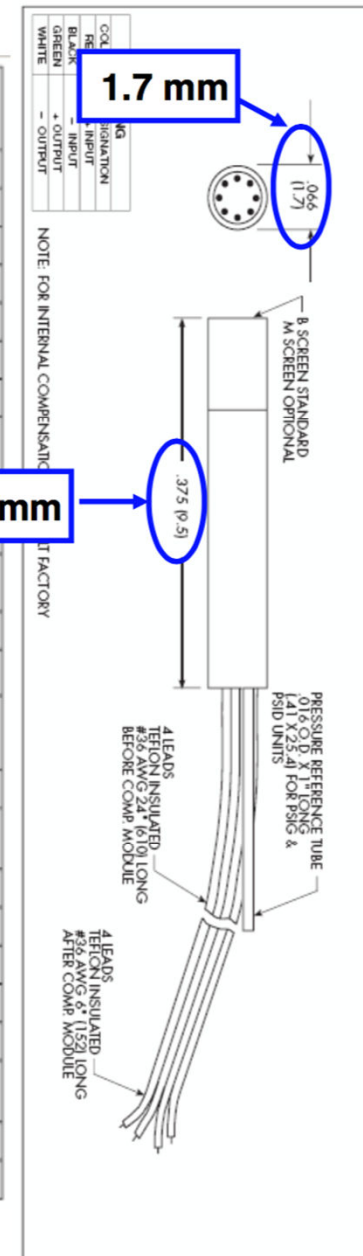
La tecnologia dei semiconduttori fa sì che i sensori piezoresistivi possano essere utilizzati in un vasto campo di applicazioni, per via dell'ampia possibilità di variare le loro caratteristiche generali.



# Trasduttori piezoresistivi

KULITE SEMICONDUCTOR PRODUCTS, INC.

INPUT	0.35	0.7	1.7	3.5	7	17	35	70 BAR
Pressure Range	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	1000 Ohms (Nom.)							
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 <sup>-3</sup>	1.0x10 <sup>-4</sup>	5.0x10 <sup>-4</sup>	3.0x10 <sup>-4</sup>	1.5x10 <sup>-4</sup>	1.0x10 <sup>-4</sup>	6.0x10 <sup>-5</sup>	4.0x10 <sup>-5</sup>
Transverse	2.2x10 <sup>-4</sup>	1.4x10 <sup>-5</sup>	6.0x10 <sup>-5</sup>	4.0x10 <sup>-5</sup>	2.0x10 <sup>-5</sup>	9.0x10 <sup>-6</sup>	6.0x10 <sup>-6</sup>	3.0x10 <sup>-6</sup>
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							

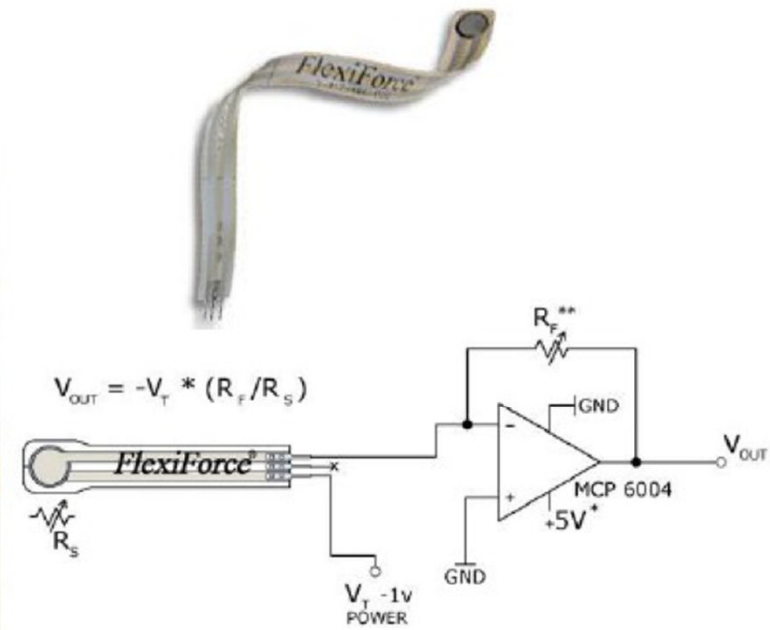


<http://www.kulite.com>

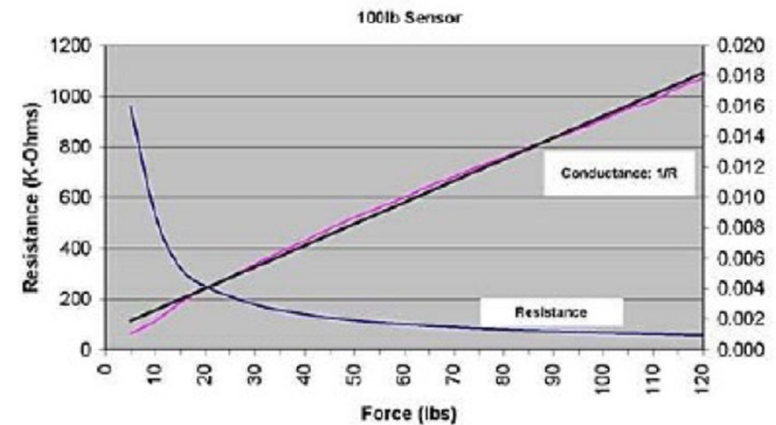
# Trasduttori di pressione a film piezoresistivo

accurate  
reliable  
high-resolution  
fast sampling  
paper-thin  
flexible  
conformable  
non-intrusive  
**pressure & force sensing**

The Leader in  
Tactile Pressure Measurement  
Industrial and Research Solutions

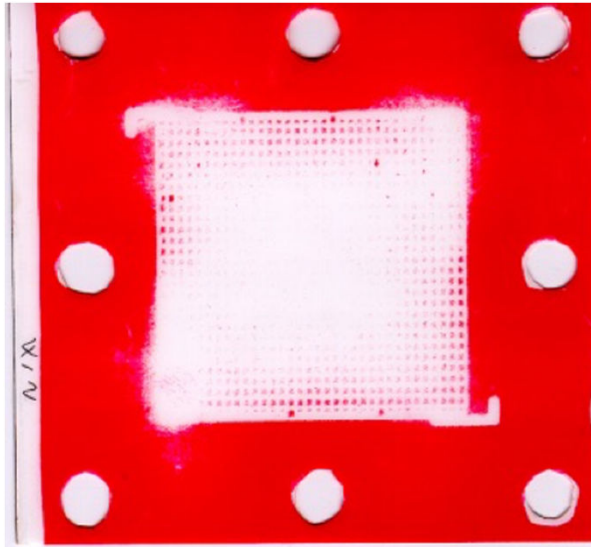


- \* Supply Voltages should be constant
- \*\* Reference Resistance  $R_f$  is 1k $\Omega$  to 100k $\Omega$
- Sensor Resistance  $R_s$  at no load is >5M $\Omega$
- Max recommended current is 2.5mA

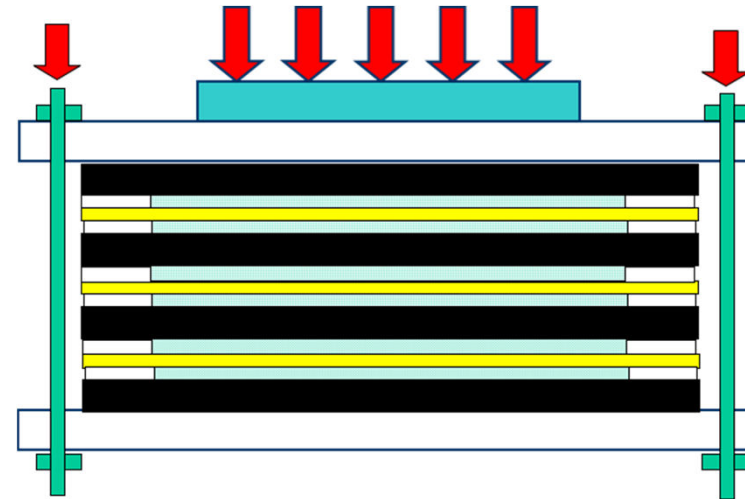
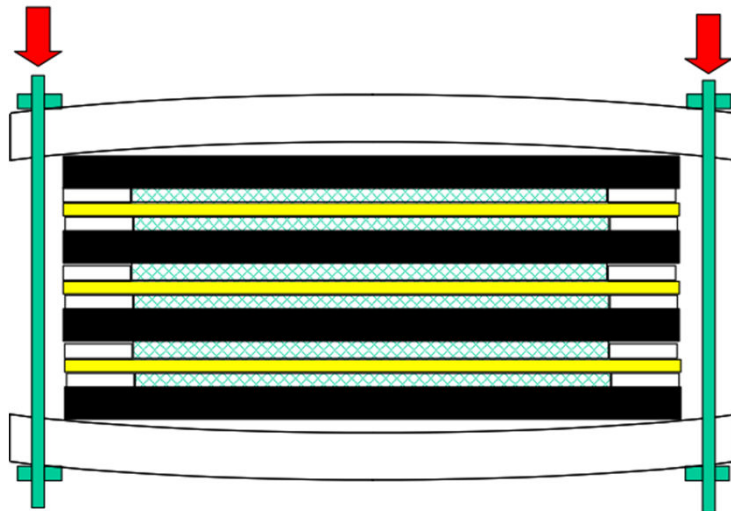
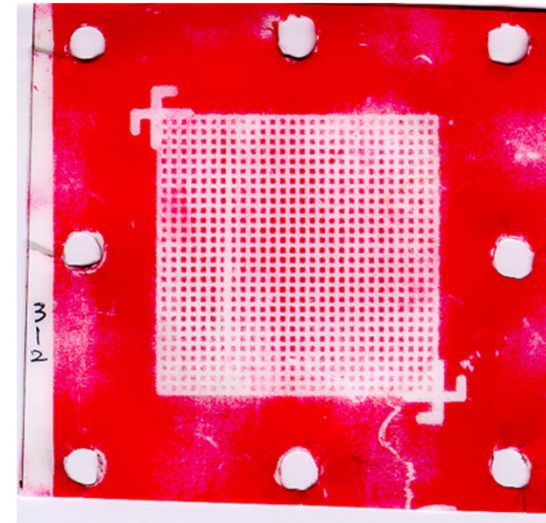


# Pellicole sensibili

Non – uniform



Uniform



# 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.

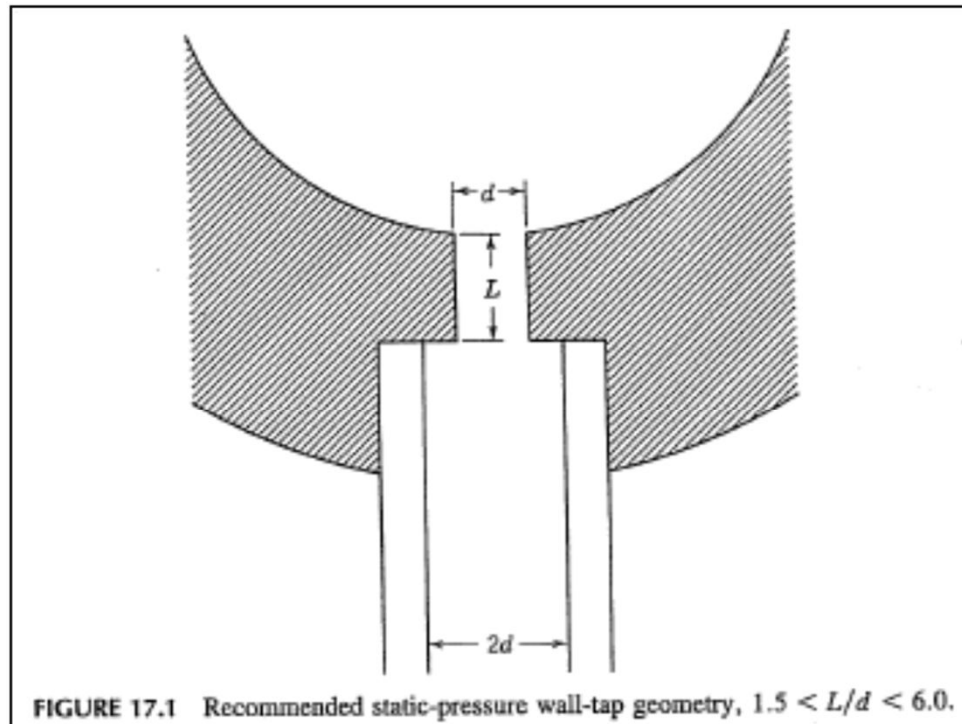
$$\frac{P_0}{P} = \left( 1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right)$$

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

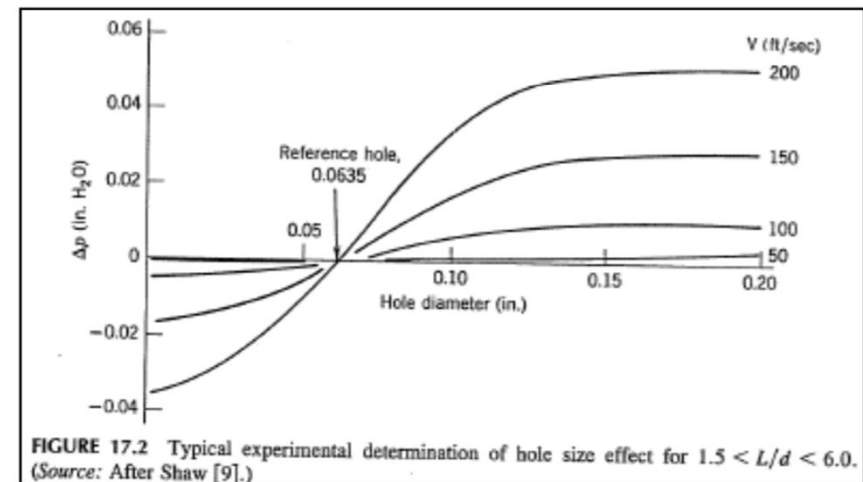
Nel caso di flusso incomprimibile ( $M < 0.3$ ) si può approssimare:  $P_0 = P + \frac{\rho c^2}{2}$

# 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.

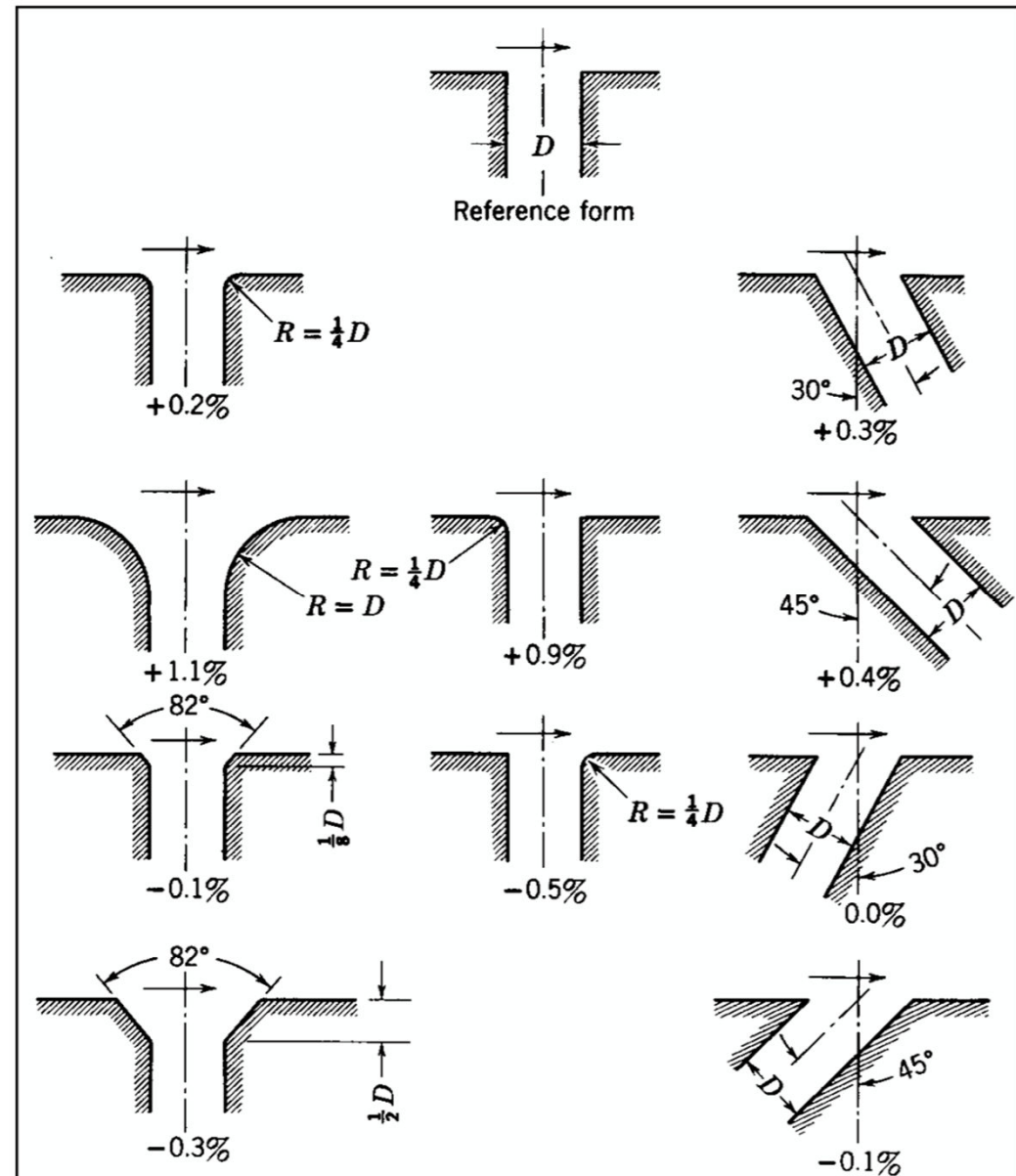




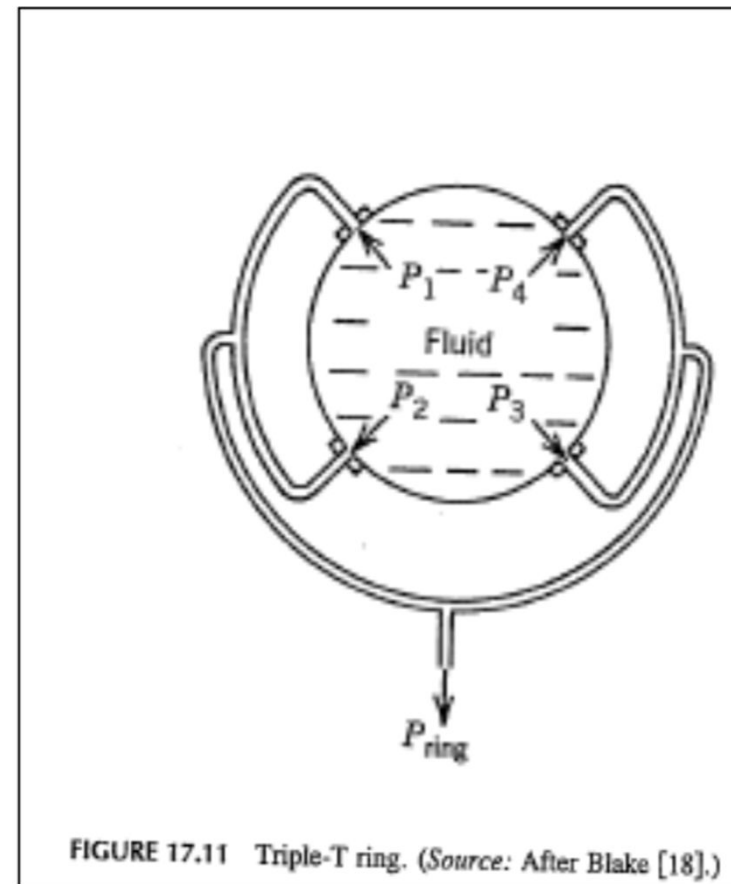
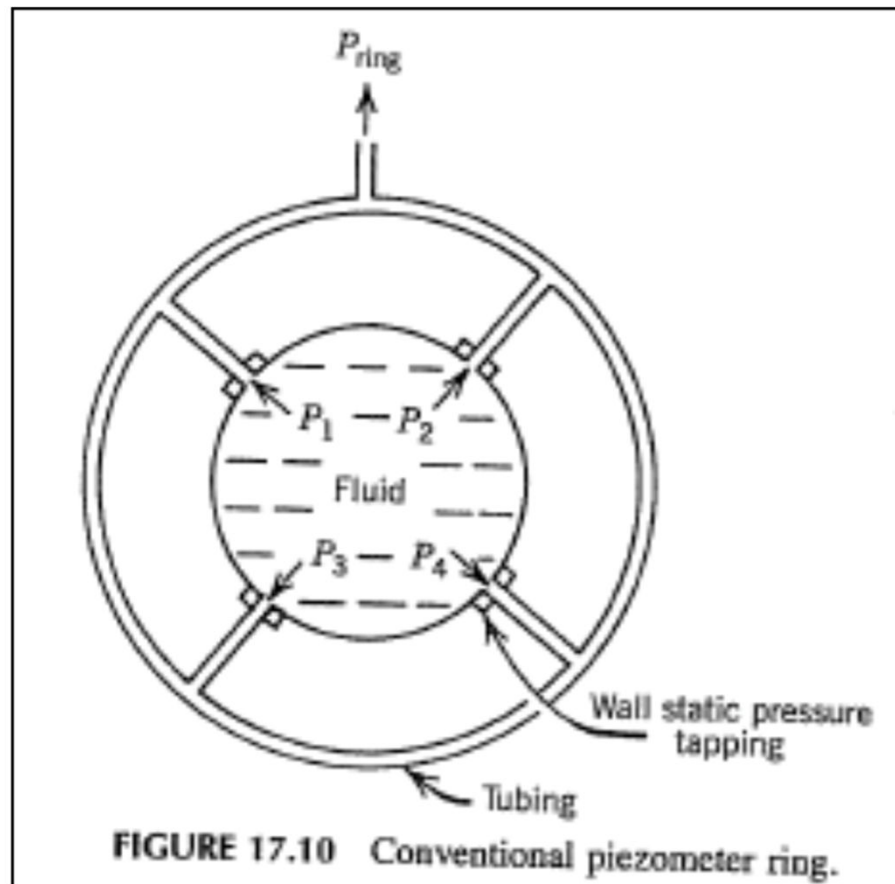
# Misure di pressione statica nei flussi

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



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

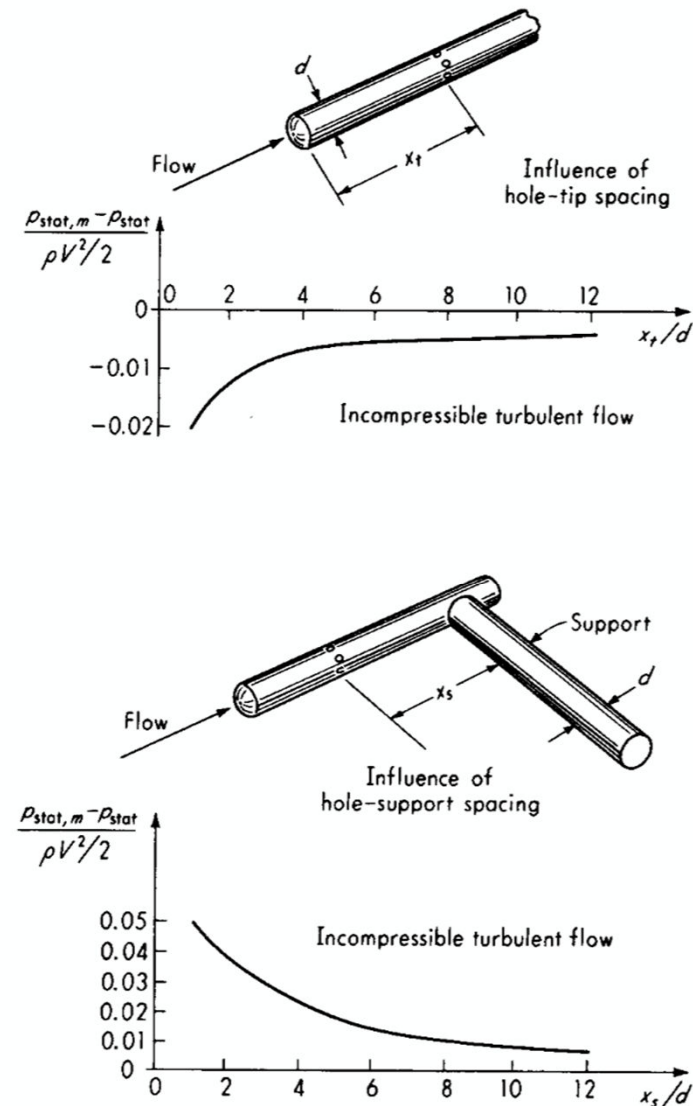
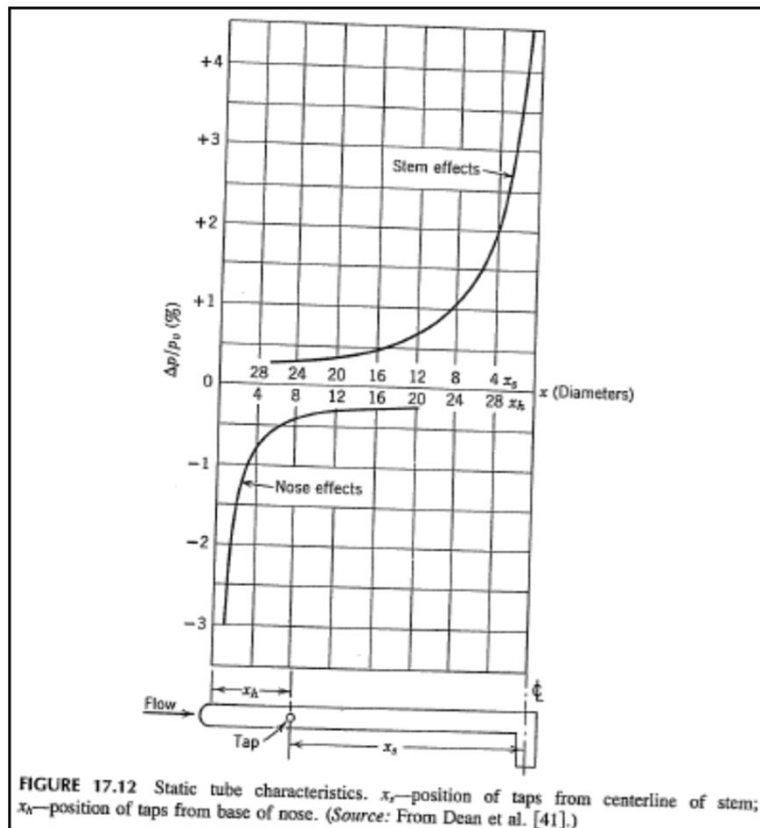


Figure 7.2 Static-pressure errors.

# 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

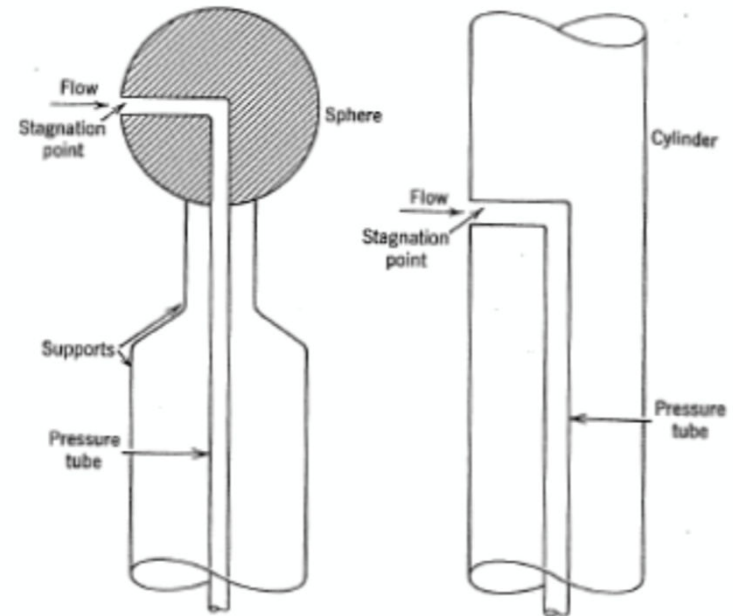


FIGURE 17.24 Aerodynamic total pressure probes.

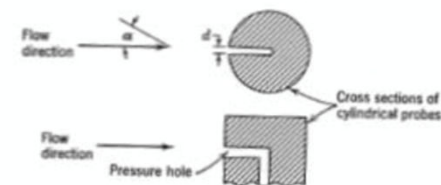
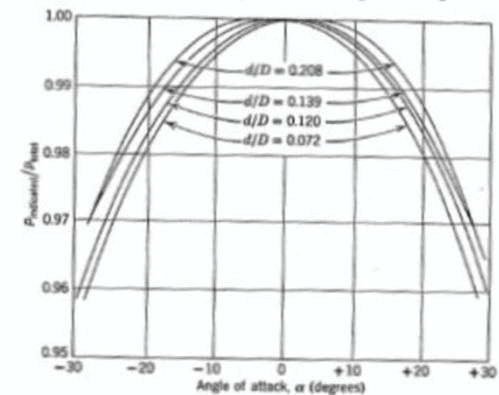
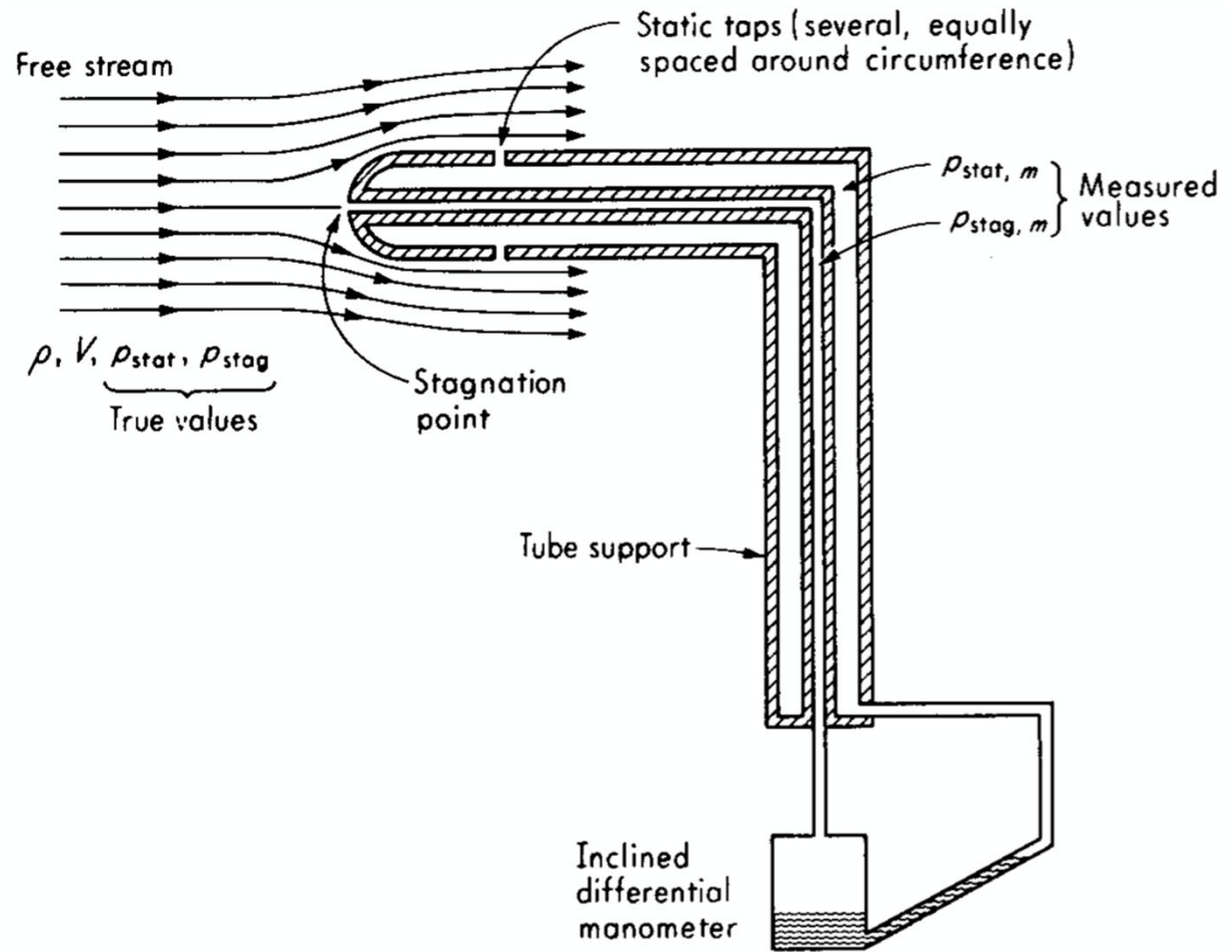


FIGURE 17.26 Variation of total pressure indication with angle of attack and hole size for cylindrical probes perpendicular to flow.

# Tubo di Pitot

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

$$DP = P_0 - P = \frac{\rho c^2}{2}$$



**Figure 7.1** Pitot-static tube.

# Sonde direzionali

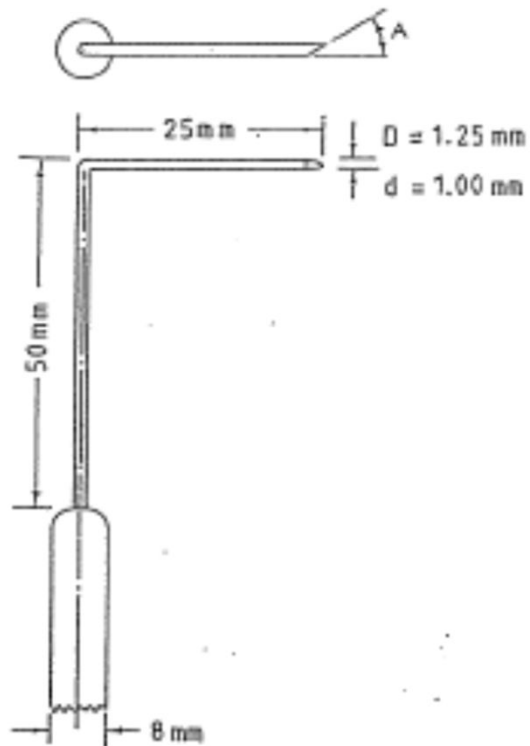


Fig. III.32 - Slanted tube geometry for yaw angle measurement

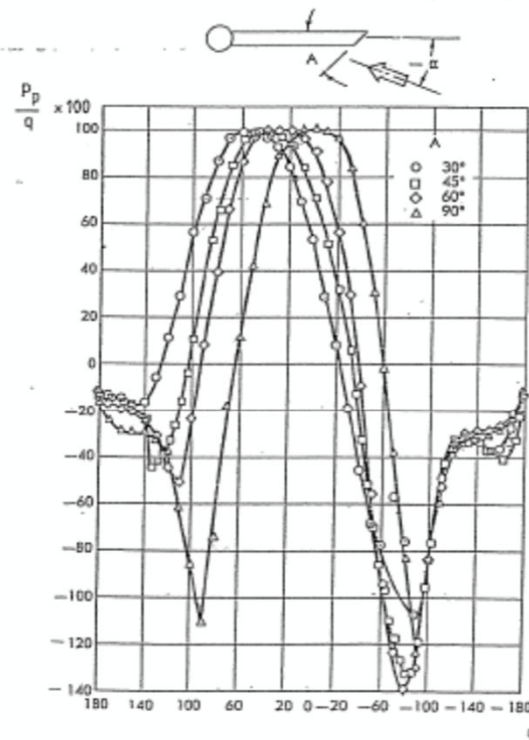


Fig. III.33 - Indicated pressure versus yaw angle of different slanted tube probes [9]

# Sonde direzionali

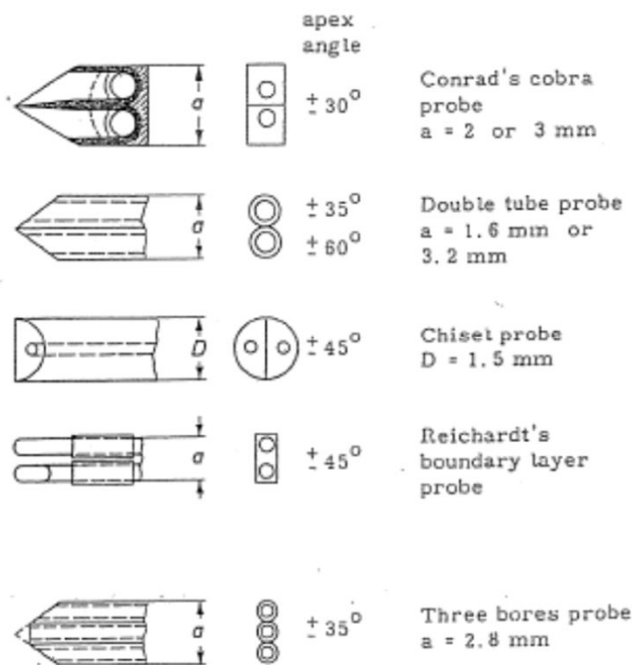
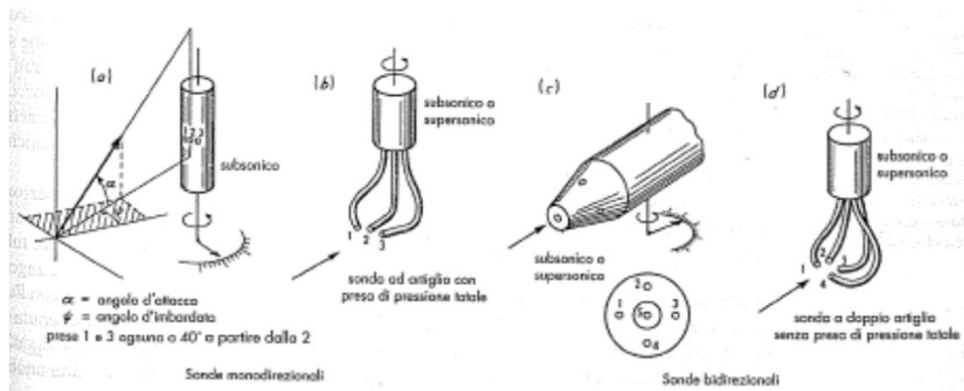


Fig. III.34 - Two dimensional flow directional probes [4]

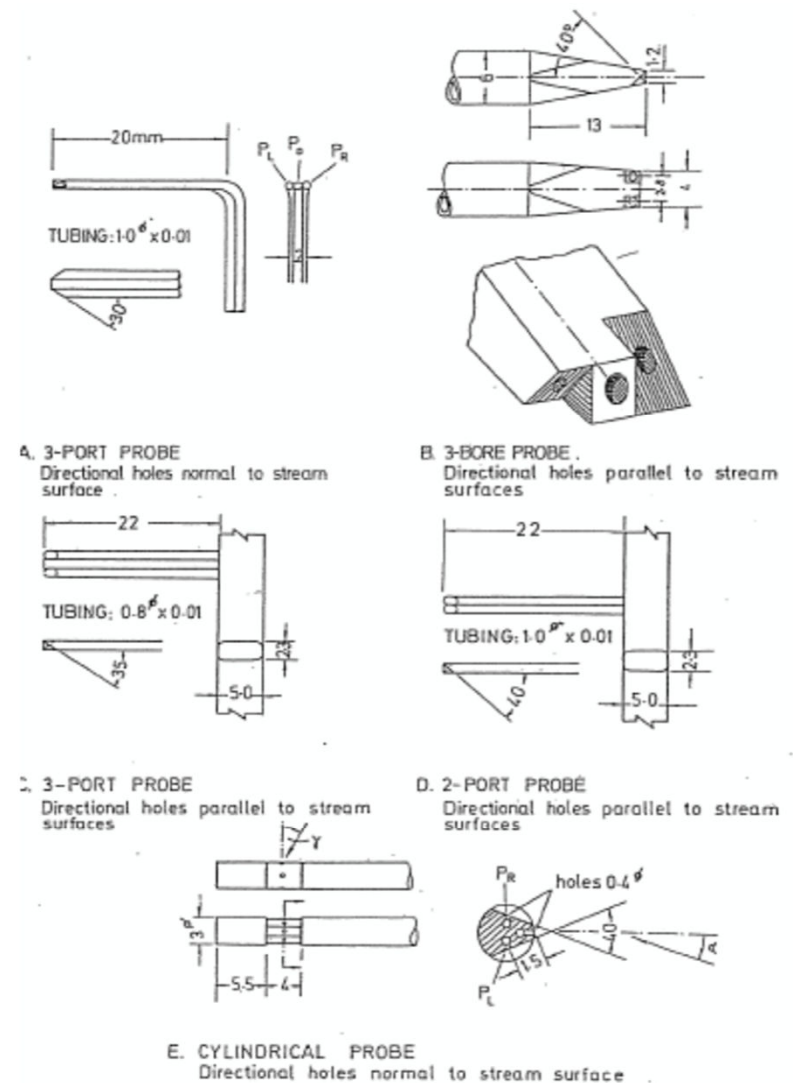


Fig. III.35 - Various types of two dimensional probes [35]

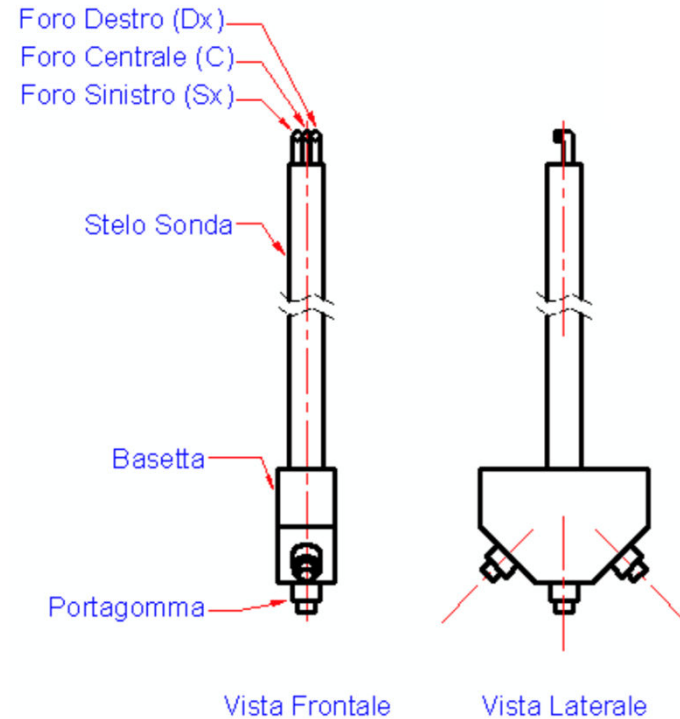
# Sonde direzionali – Coefficienti caratteristici

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

- Pd            pressione del foro destro della sonda
- Ps            pressione del foro sinistro della sonda
- PC            pressione del foro centrale della sonda
- Pt            pressione totale
- P             pressione statica



## 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

$$C_{bl} = \frac{P_d - P_s}{P_C - \frac{P_s + P_d}{2}} \quad C_{psl} = \frac{P_C - P_t}{P_t - P} \quad C_{ptl} = \frac{P_C - \frac{P_s - P_d}{2}}{P_t - P}$$



# Sonde direzionali 3D

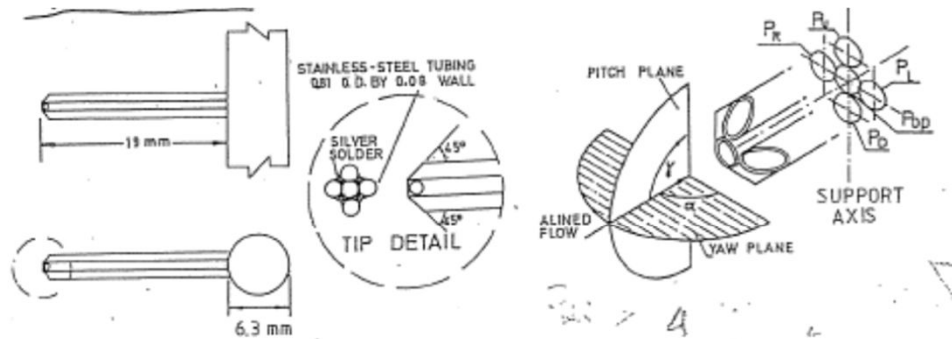


Fig. III.39 - Three dimensional flow direction probe

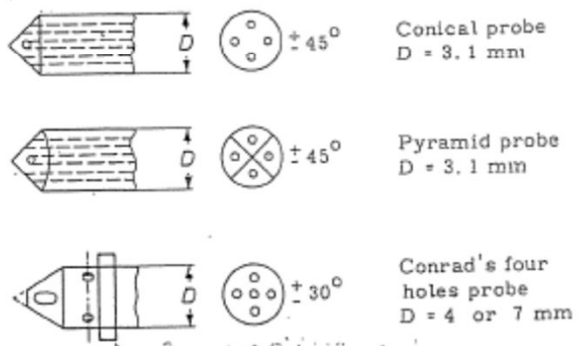


Fig. III.41 - Three dimensional flow direction probes [4]



## Fonti

- Prof. M. De Lucia – Università di Firenze
- Prof. C. Mengoni – Università di Firenze
- Dispense del corso di Misure dell'Università Sapienza (Roma)
- Schemi dal testo Doebelin

Si ringrazia Federico Ustolin per il supporto nella preparazione delle slide

## 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

## Note sensori piezoresistivi

# Trasduttori piezoresistivi

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

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

Per un semiconduttore, la resistività  $\rho$  è inversamente proporzionale al prodotto del numero di cariche  $Ni$  ed alla mobilità media  $\mu_m$ , e può essere espressa da:

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

Dove  $e$  è la carica elettronica

# Trasduttori piezoresistivi

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:

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

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  $\nu$  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.

## Trasduttori piezoresistivi

I cristalli di semiconduttore con i quali si ottiene l'elemento sensibile di un 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/cm<sup>3</sup>), il G.F. è essenzialmente indipendente dalla temperatura e dalla forza, cioè:

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

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/cm<sup>3</sup>, 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.

