



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE**



Dipartimento di
**Ingegneria
e Architettura**

MISURE MECCANICHE TERMICHE E COLLAUDI MISURE DI PRESSIONE

Prof. Marco Bogar

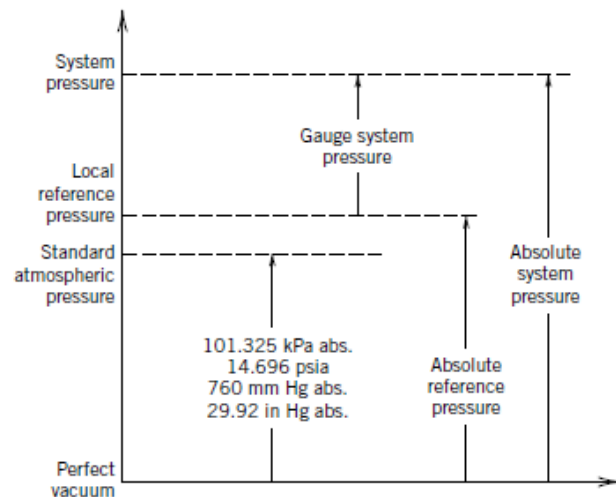
A.A. 2023-2024

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 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



Unità di misura della pressione

- pascal (Pa): nel Sistema Internazionale, 1 newton su metro quadro (1 N/m^2 o $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$);
- Baria: nel Sistema CGS (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
- 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 kg_f/cm^2 (10.000 mmH₂O), di poco inferiore all'atmosfera (0,96784 atm). Spesso distinta in ata, intesa come pressione assoluta, e ate, come pressione relativa.

Strumenti di misura della pressione

La pressione può essere misurata per mezzo di diverse classi di strumenti:

- Manometri (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

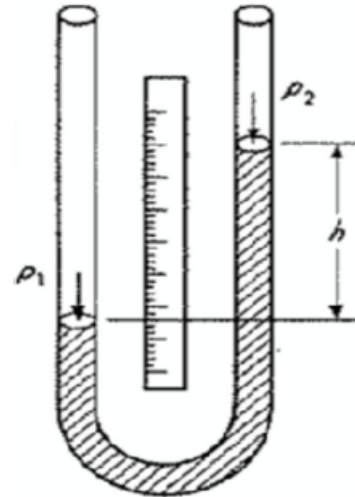
Manometro differenziale: per la misura di piccole differenze di pressione si utilizzano molto i manometri ad U a colonna liquida. In tali strumenti, la pressione, convertita in una forza agendo su di una opportuna superficie, determina lo scostamento tra i pelli liberi del liquido contenuto nei due vasi comunicanti.

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

NON dipende dall'area della sezione trasversale del tubo

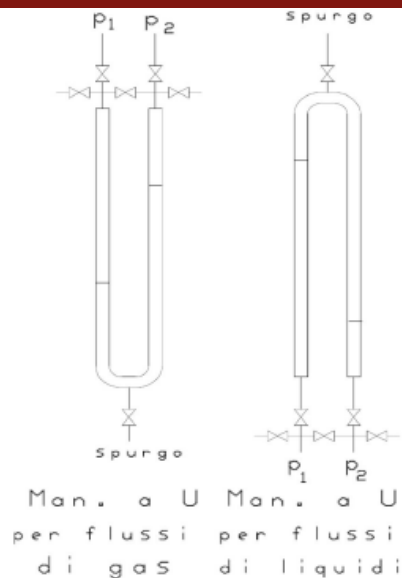
g : accelerazione di gravità;

ρ : densità del fluido.



Manometro differenziale

- 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).



Errori:

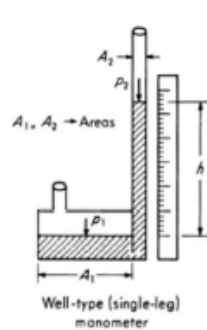
- Variazioni tra le gradazioni della scala per effetto della variazione di temperatura;
- Variazione di p del fluido manometrico per effetto della variazione di temperatura;
- Non perfetta verticalità dei tubi;
- Difficoltà nella lettura di h dovuta al menisco.

Manometri a pozzetto

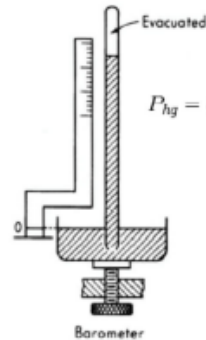
Viene largamente utilizzato per la sua semplicità d'uso che richiede la lettura di un solo dato.

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.



$$\frac{P_1 - P_2}{\rho_m g} = h$$

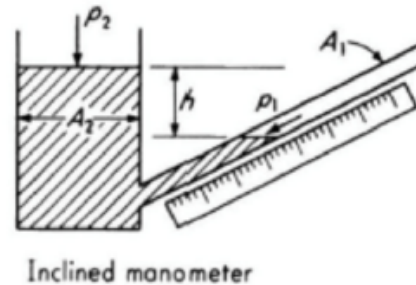


$$P_{hg} = \delta \cdot g \cdot h_{hg} = 13579 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,8 \frac{m}{s^2} \cdot 0,76m = 1,013 \cdot 10^5 Pa$$

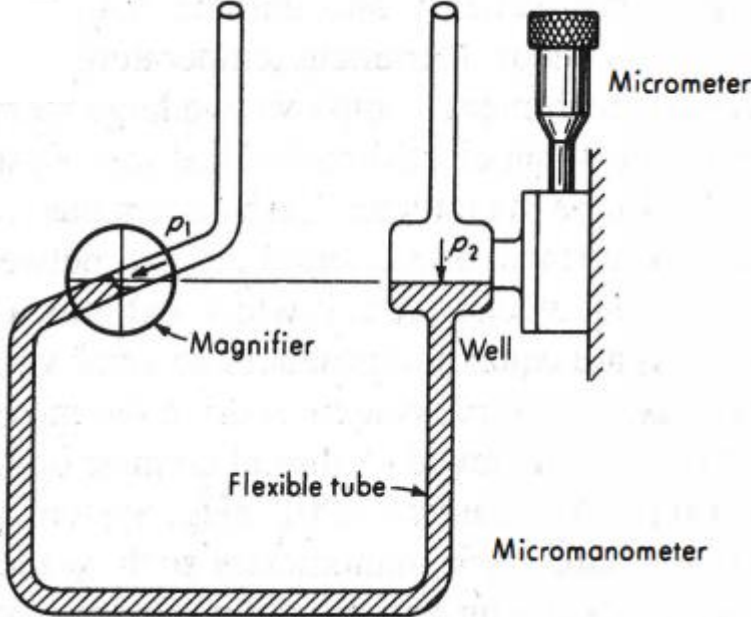
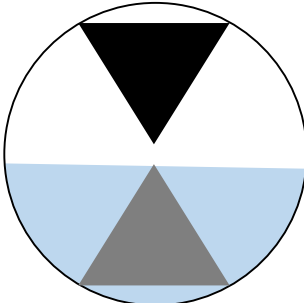
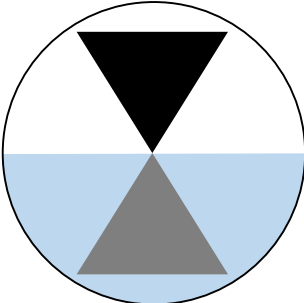
Manometro a tubo inclinato

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.

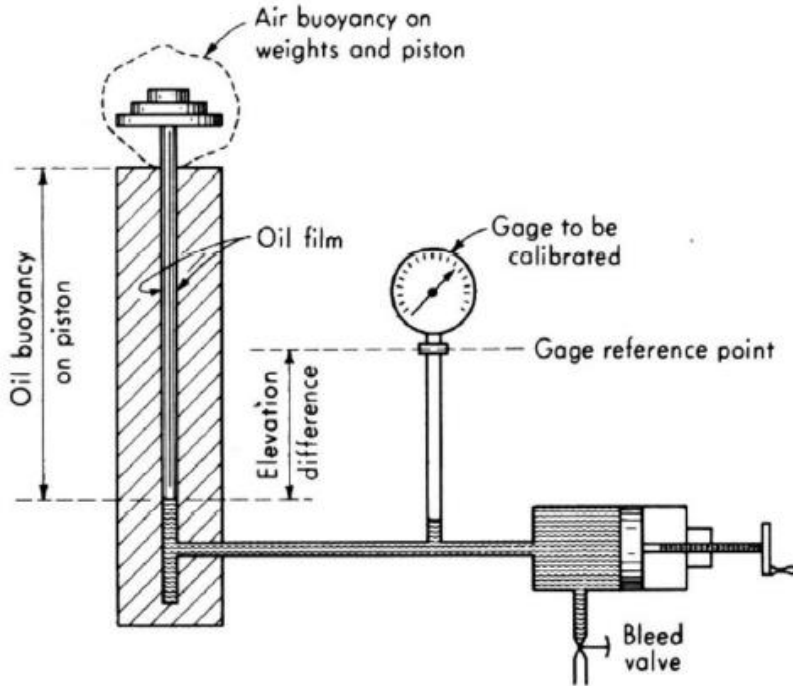
$$\frac{P_1 - P_2}{\rho_m g} = h = l \cdot \sin \vartheta$$



Micro-manometri differenziali



Sonde a pesi diretti



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

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

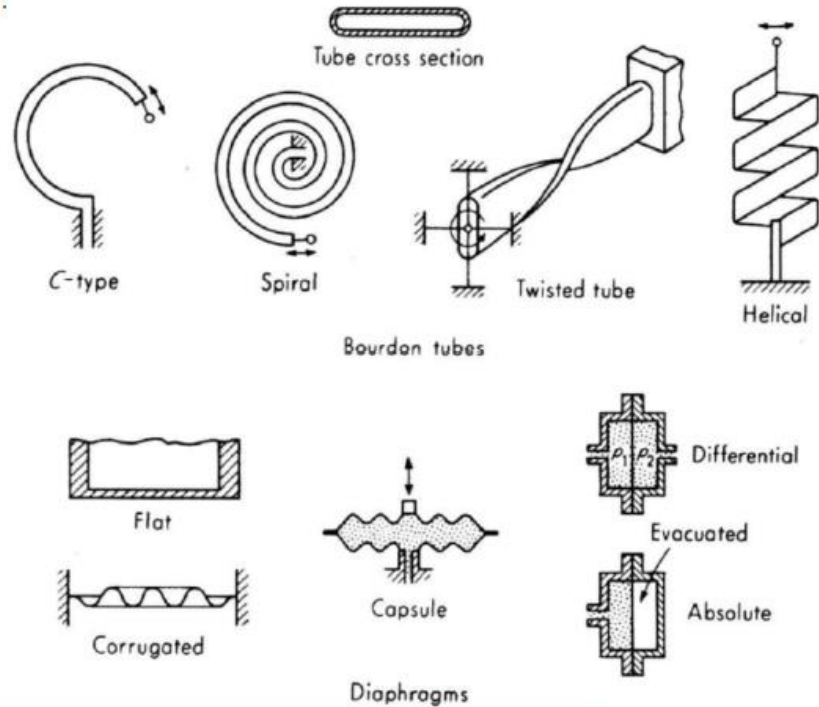
h – differenza di altezza



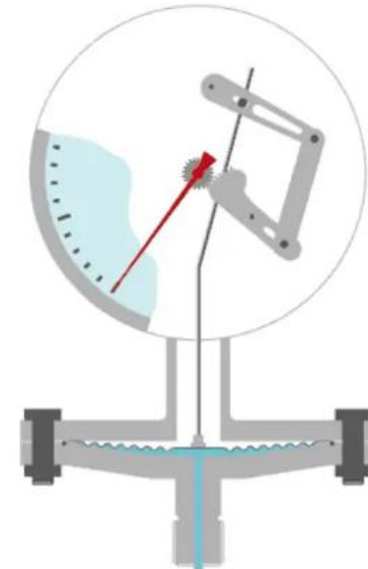
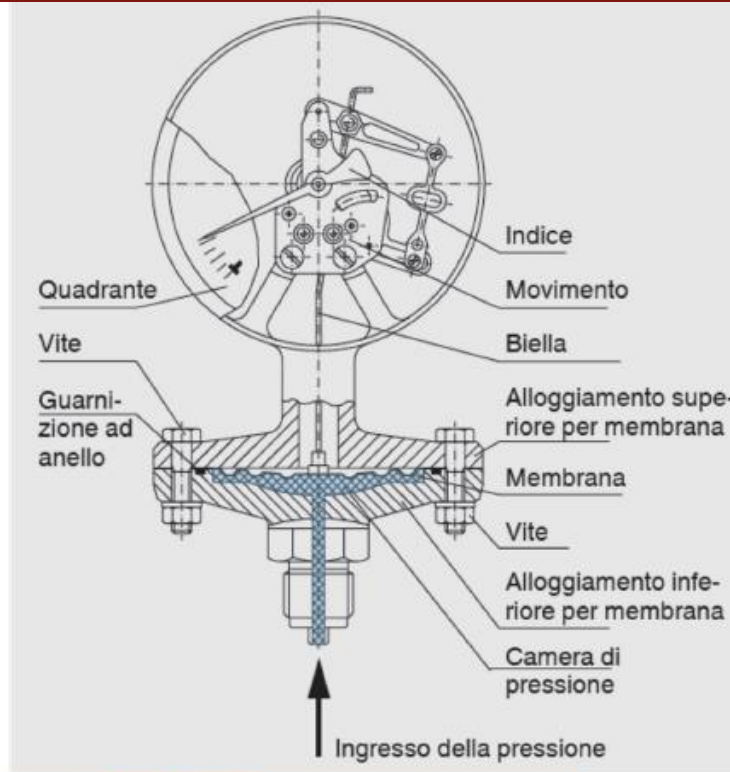
Trasduttori a deformazione elastica

Trasduttori a deformazione elastica

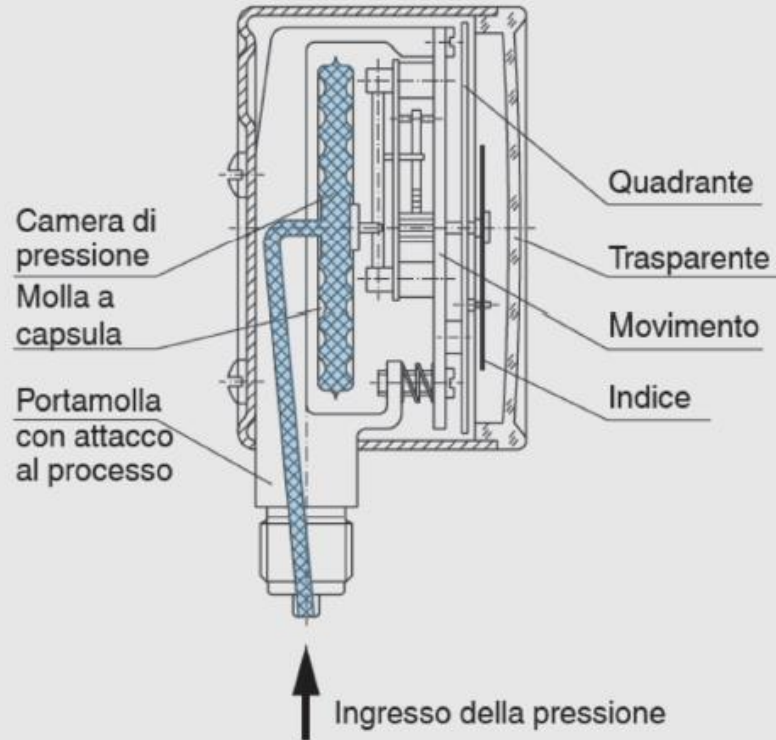
Tutti basati sulla deformazione di un elemento elastico sul quale agiscono le forze di pressione:



Manometri a membrana

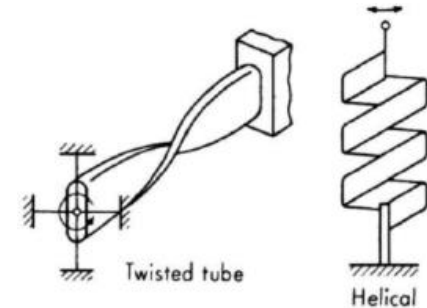
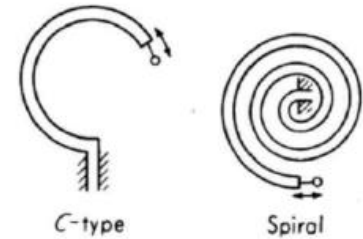
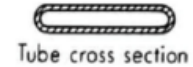
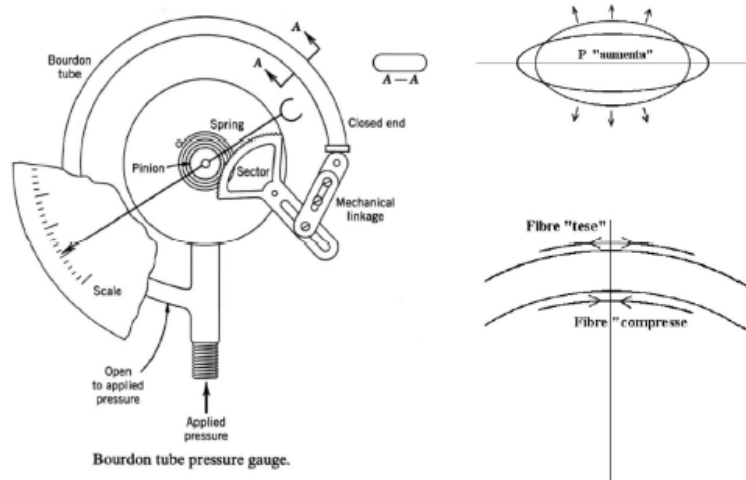


Manometri a capsula



Il tubo di Bourdon

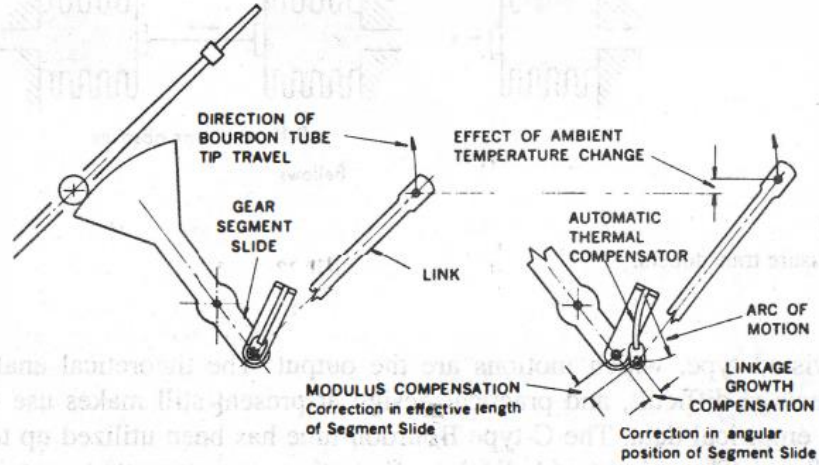
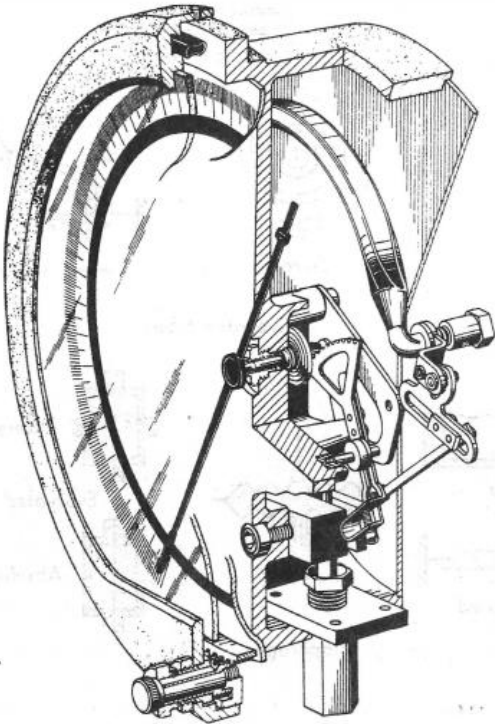
l'elemento base in tutte le sue varianti è un tubo a sezione non circolare. Una differenza di pressione fra l'interno e l'esterno del tubo fa sì che il tubo tenda ad assumere una sezione circolare.



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.

Il tubo di Bourdon





Trasduttori di pressione elettrici

Trasduttori di pressione 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.

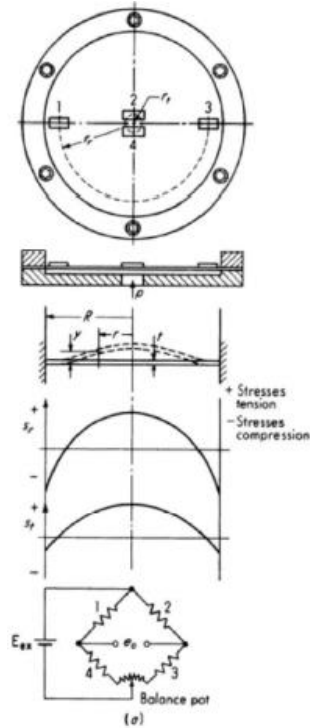
Preciando dal principio di misura (che può essere relativamente ininfluenza per molte applicazioni) il costo di un trasduttore è fortemente influenzato dalla qualità esecutiva e dell'elettronica; dall'eventuale compatibilità con liquidi (anche corrosivi) e con flussi carichi di particolato; dal valore 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 elettrici

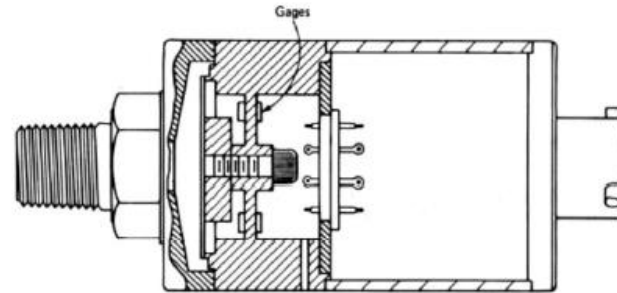
I trasduttori di pressione qui presentati sono:

- I trasduttori a membrana
- Trasduttori piezoelettrici
- Trasduttori piezoresistivi

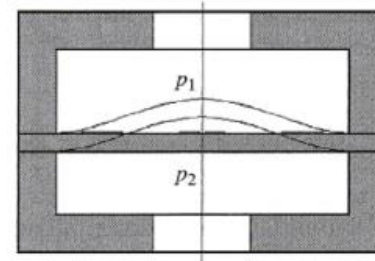
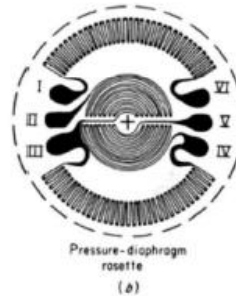
Trasduttori a membrana o diaframma



Diaphragm-type strain-gage pressure pickup.



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



Trasduttori di pressione

		Specifications	Model S-10 / S-11
Pressure Range	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⁾
Materials	Over pressure safety	bar	80 90 80 120 200 320 500 900 1200 1500
	Burst pressure	bar	95 96 400 550 800 1000 1200 1700 ²⁾ 2400 ³⁾ 3000
			(Vacuum, gauge pressure, compound range, absolute pressure are available)
	Materials		Stainless steel (other materials see Wika diaphragm seal program) Stainless steel Stainless steel (Hastelloy C4) O-rings: NBR ⁴⁾ (viton or EPDM) Stainless steel Synthetic oil only for pressure ranges up to 0...25 bar or for Model S-11 (flush diaphragm) units (Fluorination oil for oxygen applications) ⁴⁾ (Listed by FDA for food industry)
Power supply Signal output	Power supply U _s	DC V	10 - U _s ≤ 30 (14...30 with signal output 0...10 V)
	Signal output and maximum load R _L		4...20 mA, 2-wire R _L ≤ (U _s - 10 V) / 0.02 A with R _L in Ohm and U _s in Volt 0...20 mA, 3-wire R _L ≤ (U _s - 3 V) / 0.02 A with R _L in Ohm and U _s in Volt (0...5 V, 3-wire) R _L > 5 kOhm (0...10 V, 3-wire) R _L > 10 kOhm (other signal outputs on request)
Response Time	Approximate response	%	± 10 via potentiometers in the instrument
	Response time (90...95 %)	ms	± 1 (± 10 ms at medium temperatures below -30 °C for pressure ranges up to 25 bar or with flush diaphragm)
Accuracy Hysteresis Repeatability	Accuracy ⁵⁾	% of span	≤ 0.5 (0.25) ⁶⁾ (final point calibration)
	Hysteresis	% of span	≤ 0.25 (0.125) ⁶⁾ (BFSL)
	Repeatability	% of span	≤ 0.1
	Linearity	% of span	≤ 0.05
Temperature	Potentiometer temperature ⁷⁾	% of span	≤ 0.2 (at reference conditions)
	Medium		-20...+100 °C (-40...+125 °C) -22...+212 °F (-40...+257 °F)
	■ Ambient		S-11 with cooling element: -20...+150 °C -4...+302 °F
			-20...+80 °C -4...+176 °F
	■ Storage		S-11 with cooling element: -20...+80 °C -4...+176 °F
			-40...+100 °C -40...+212 °F
Compensated temp. range		S-11 with cooling element: -20...+100 °C -4...+212 °F	
Temperature coefficients in compensated temp. range		0...+80 °C 32...+176 °F	
■ Meas TC of zero	% of span	≤ 0.2 / 10 K (i.e. 0.4 for pressure range < 250 mbar)	
■ Meas TC of range	% of span	≤ 0.2 / 10 K	

Trasduttori basati sugli estensimetri

I trasduttori basati sugli estensimetri basano il loro principio di funzionamento sul rilevare la variazione di resistenza elettrica al seguito di una sollecitazione di un sensore appositamente progettato.

La resistenza elettrica di un materiale esprime la caratteristica del materiale stesso ad opporsi al passaggio di corrente elettrica, ed è legata alle dimensioni fisiche dello stesso dalla seconda legge di Ohm:

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

Qui ρ indica la resistività del materiale, ossia la resistenza caratteristica di un materiale di lunghezza e sezione unitarie (Ωm). A seguito di una deformazione indotta sul materiale a fronte di una sollecitazione esterna, si può pertanto rilevare una variazione della resistenza elettrica dello stesso. Differenziando la seconda legge di Ohm:

$$dR = d\left(\frac{\rho L}{A}\right) = \frac{A(\rho dL + d\rho L) - dA \rho L}{A^2}$$

Considerando che la variazione di volume indotta è così legata al coefficiente di Poisson (ν) e alla deformazione (ε):

$$dV = L(1 + \varepsilon)A(1 - \varepsilon\nu)^2 - AL = dA L + A dL$$

Nell'approssimazione che il prodotto $(\varepsilon\nu)^2 \approx 0$ (ε è molto piccolo), e ricordandosi che $\varepsilon = dL/L$, si ottiene che:

$$dV = AL\varepsilon(1 - 2\nu) = AdL(1 - 2\nu) = dA L + A dL \quad \rightarrow \quad -2\nu A dL = dA L \quad \rightarrow \quad dR = \frac{\rho(1+2\nu) dL}{A} + \frac{L d\rho}{A}$$

Trasduttori basati sugli estensimetri

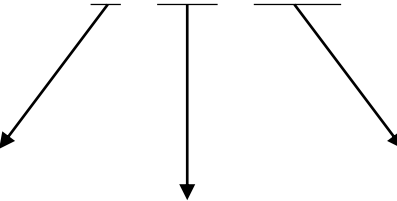
Da cui:

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

Da qui è quindi possibile ricavare il *gage factor*, il parametro che caratterizza gli estensimetri:

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

Variazione della
resistenza in
funzione della
variazione della
lunghezza del
sensore



Variazione della
resistenza in funzione
delle variazioni della
sezione del sensore

Variazione
della resistenza
in funzione
dell'effetto
piezoresistivo

Trasduttori basati sugli estensimetri

Gli estensimetri sono largamente usati per misure di deformazioni meccaniche, oltre che per le misure di pressione, vista la loro elevata sensibilità.

Gli estensimetri si possono classificare in funzione della loro forma e dei materiali e dal numero di elementi sensibili che li compongono.

Film sottili di materiali metallici sono impiegati per realizzare questa classe di sensori.

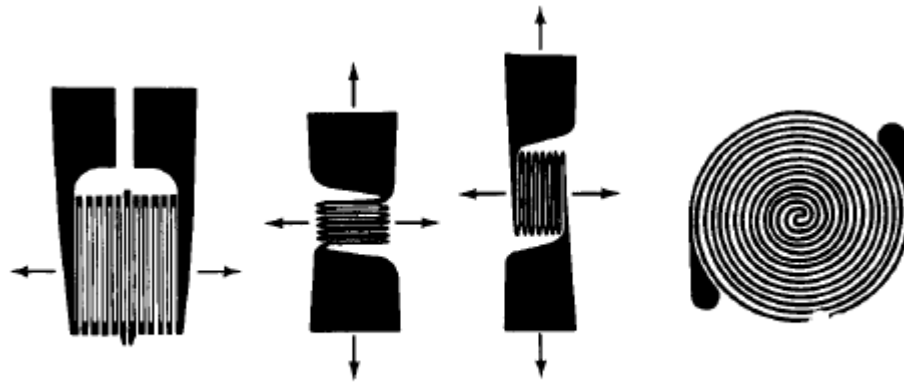


Figure 4.11 Foil strain gages.

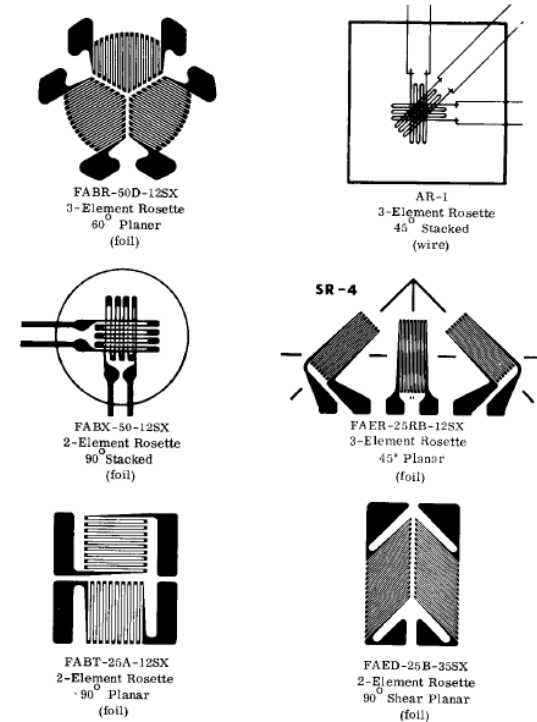


Figure 4.12 Strain-gage rosettes. (Courtesy BLH Electronics, Waltham, Mass.)

Trasduttori basati sugli estensimetri

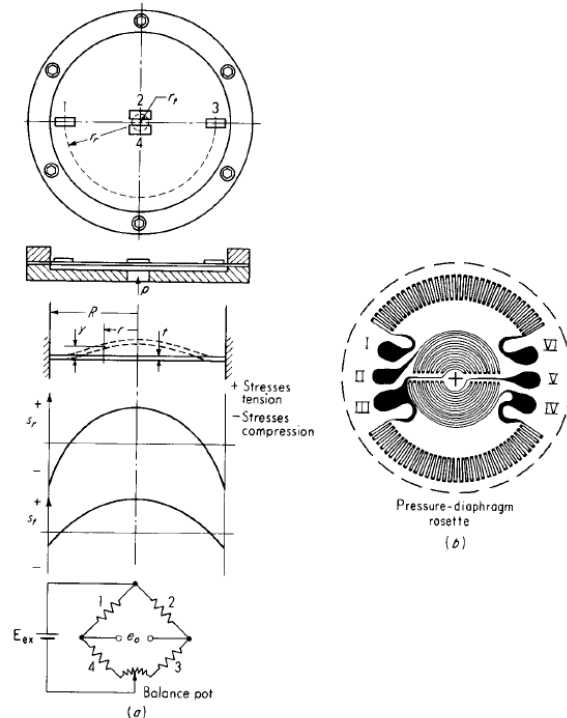


Figure 6.12 Diaphragm-type strain-gage pressure pickup.

Il loro condizionamento avviene tramite la misura di sbilanciamento di un ponte di Wheatstone, ed il loro vantaggio risiede nel fatto che la dipendenza tra la variazione di resistenza e di deformazione longitudinale può essere resa lineare:

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

per piccole deformazioni. Infatti, per un trasduttore di pressione a film sottile metallico, applicato ad un diaframma:

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

t: spessore del diaframma, p: differenza di pressione ai capi del diaframma, E: modulo di elasticità di Young, ν : coefficiente di Poisson, r: raggio del diaframma; y_c : variazione longitudinale dell'estensimetro

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

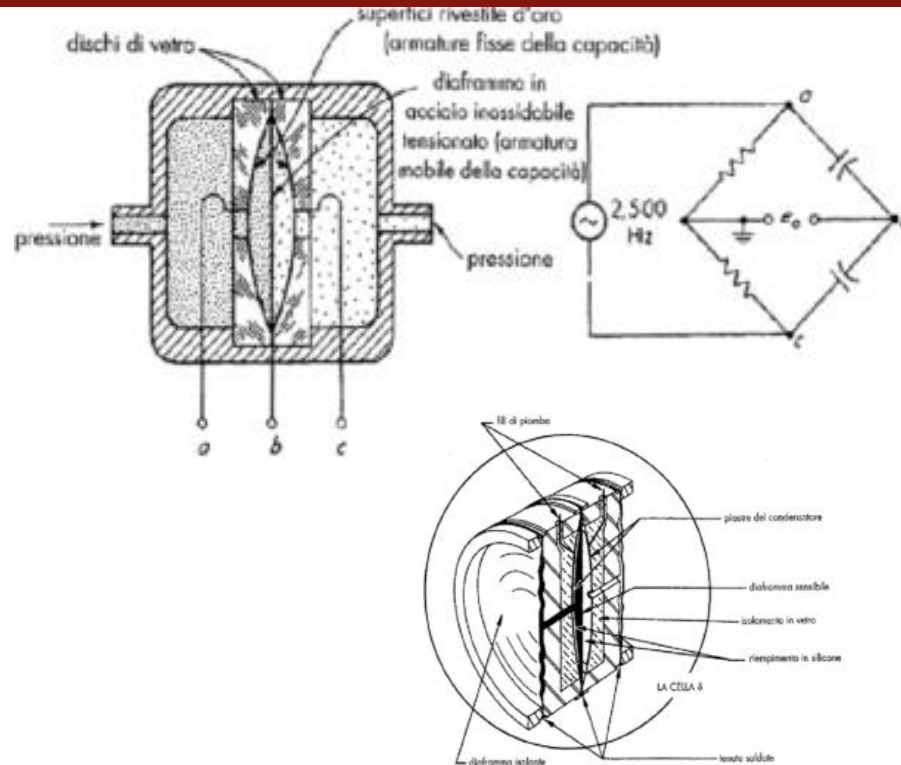
x: distanza tra le armature, mm

K: costante dielettrica del mezzo

c: costante (geometria)

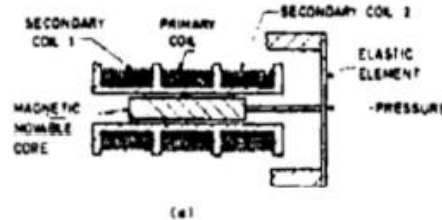
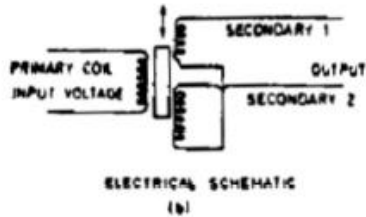
I trasduttori differenziali presentano particolari difficoltà di progetto perché devono essere sensibili a piccole differenze di pressione, spesso con elevate pressioni di linea.

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.



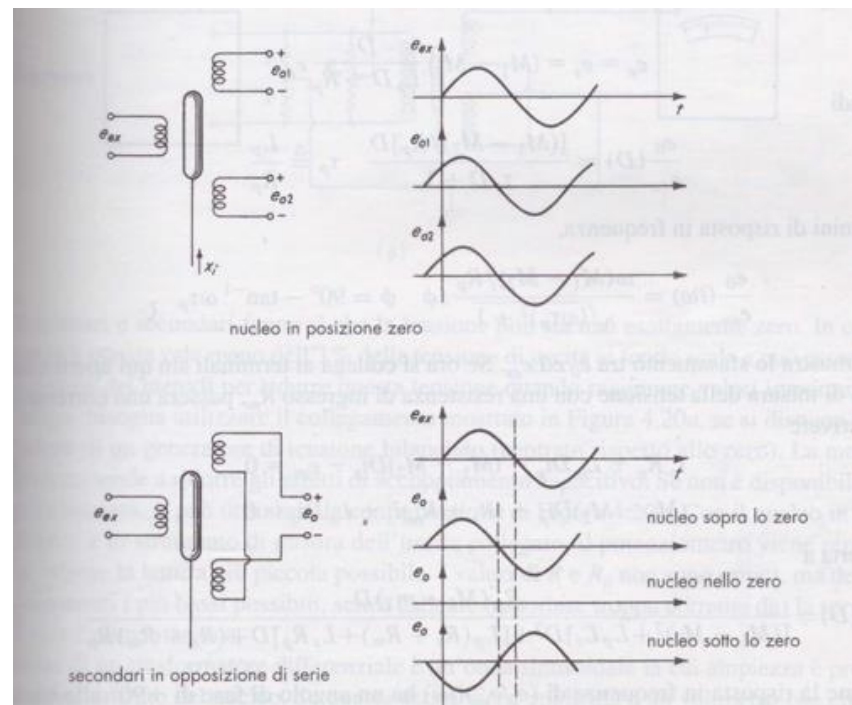
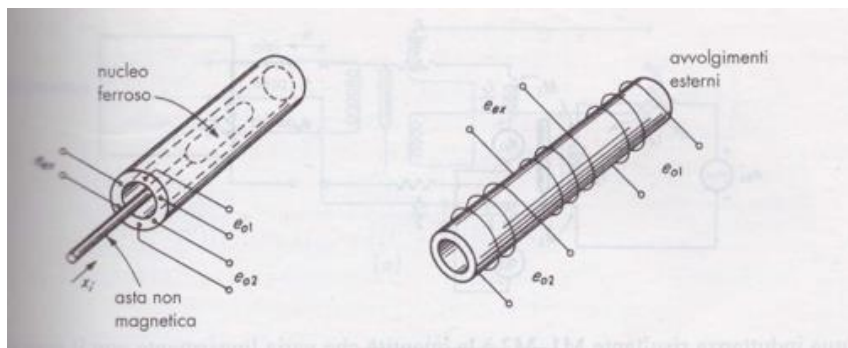
$$L = \frac{\mu N^2 A}{L}$$



$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$

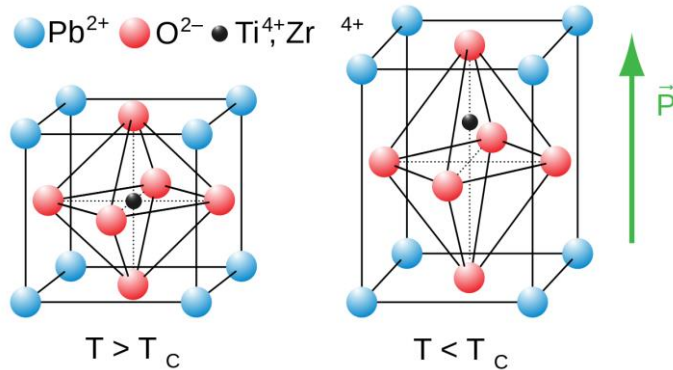
www.wika.com www.gemssensors.com www.druck-temperatur.de www.setra.com

Trasduttori induttivi

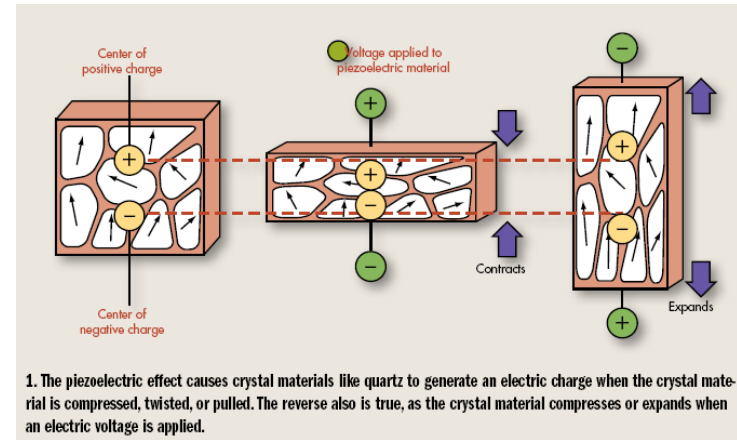


Trasduttori piezoelettrici – L'effetto piezoelettrico

La piezoelettricità è una proprietà di alcuni materiali cristallini di polarizzarsi e generare ai loro capi una differenza di potenziale se sottoposti a deformazione meccanica (piezoelettricità diretta) e al tempo stesso di venire deformati se ai loro capi si applica una differenza di potenziale (piezoelettricità inversa).



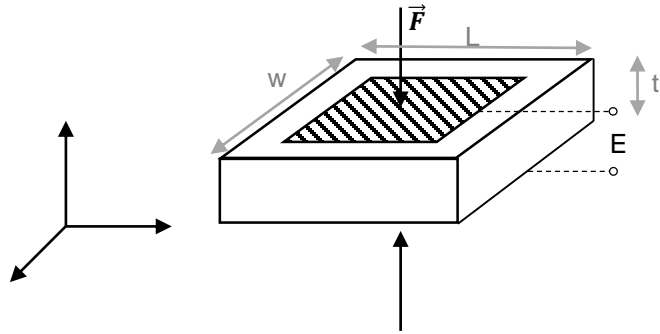
https://en.wikipedia.org/wiki/Lead_zirconate_titanate#/media/File:Perovskite.svg



Diverse classi di materiali manifestano piezoelettricità, tra loro: materiali cristallini (es. quarzo, topazio, ...), materiali ceramici e semiconduttori dei gruppi III-V e II-VI (organizzati nella forma cristallina detta wurtzite).

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.



Infatti, considerando un trasduttore piezoelettrico soggetto ad una compressione della sua sezione.

Tipicamente, i materiali piezoelettrici sono caratterizzati:

- dalla costante g :

$$g_{i,j} = \frac{\text{campo elettrico prodotto nella direzione } i}{\text{stress applicato nella direzione } j} \left(\frac{V/m}{N/m^2} = \frac{Vm}{N} \right)$$

- e dalla costante d :

$$d_{i,j} = \frac{\text{carica generata nella direzione } i}{\text{forza applicata nella direzione } j} \left(\frac{C}{N} \right)$$

$$C = \frac{\epsilon w L}{t}$$

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

Quarzo

$$g = 50 \cdot 10^{-3} \text{ Vm/N}$$

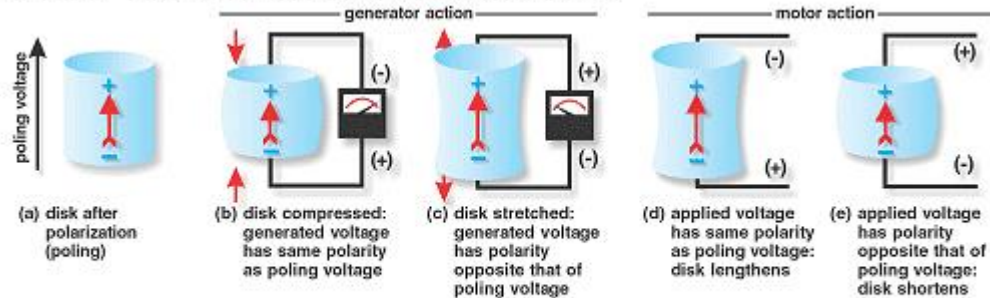
$$t = 2 \text{ mm}$$

$$\text{sensibilità} = 0.1 \text{ mV/N}$$

Trasduttori piezoelettrici

I trasduttori piezoelettrici misurano pertanto la differenza di potenziale che si manifesta ai capi di un cristallo piezoelettrico, permettendo così di ricavare (in sequenza): spostamento, forza agente sul sensore, e di conseguenza di ricavare il valore di pressione agente sulla superficie dello stesso.

Figure 1.4 Generator and motor actions of a piezoelectric element

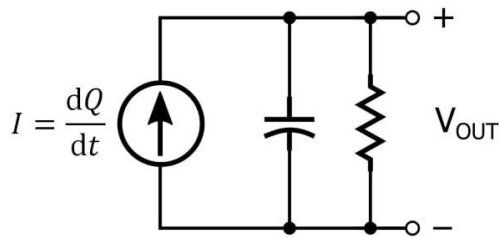


* Generator action is used in fuel-igniting devices, solid state batteries, and other products; motor action is adapted to piezoelectric motors, sound or ultrasound generating devices, and many other products.

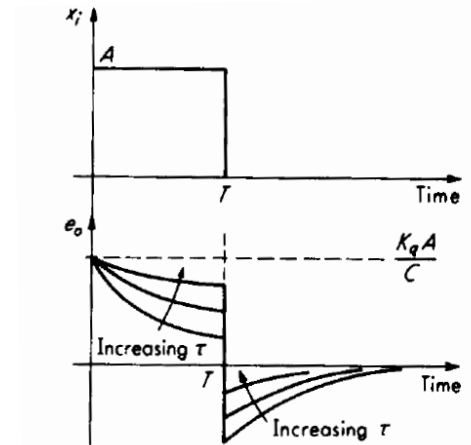
<https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezolectricity.html>

Trasduttori piezoelettrici

Se tra i vantaggi di tale classe di trasduttori si trova che la trasduzione può ricondursi ad una semplice trasduzione di spostamento, allargando il punto di vista all'intero sistema di misura, e considerando il sistema di misura come composto da un generatore di corrente (indotta dallo spostamento di carica provocato dalla variazione di potenziale) ed un circuito RC parallelo (resistenze e capacità di sensore e sistema di misura). Qui, la corrente generata si dissipa nel tempo sulla resistenza del circuito (che, per quanto elevata, non è infinita), come:



$$K_q \left(\frac{dx_i}{dt} \right) = \frac{dQ}{dt} = I = i_C + i_R$$
$$C \left(\frac{dV_C}{dt} \right) = I - i_R = K_q \left(\frac{dx_i}{dt} \right) - \frac{V_{OUT}}{R}$$
$$\frac{V_{OUT}}{x_i} = K \frac{i\omega\tau}{i\omega\tau + 1}$$



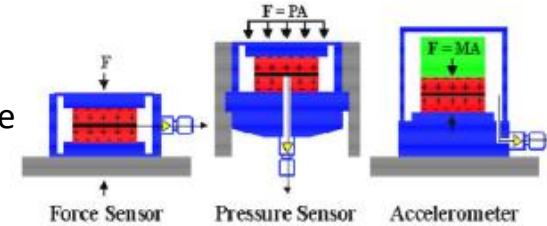
Trasduttori piezoelettrici

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



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 (± 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

Misure 2016 - Taccani

 PCB PIEZOTRONICS™



www.pcb.com

Alcune applicazioni

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

Trasduttori piezoresistivi

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

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

The diagram illustrates the components of the gauge factor equation. Three arrows point from the terms in the equation to their respective descriptions:

- From the '1' term: Variazione della resistenza in funzione della variazione della lunghezza del sensore
- From the '2ν' term: Variazione della resistenza in funzione delle variazioni della sezione del sensore
- From the $\frac{d\rho/\rho}{dL/L}$ term: Variazione della resistenza in funzione dell'effetto piezoresistivo

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:

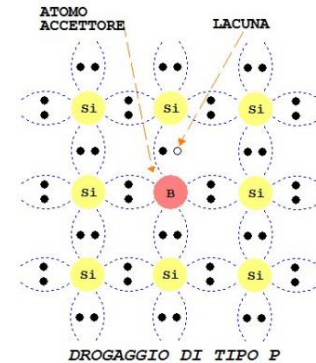
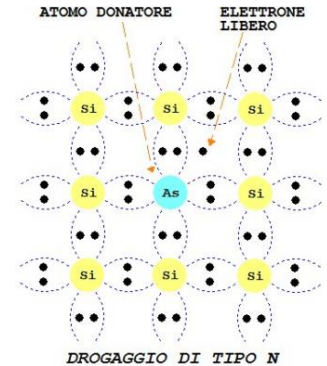
$$\pi_1 = \frac{d\rho/\rho}{dL/L} = \frac{d\rho/\rho}{\varepsilon}$$

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). 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



Trasduttori piezoresistivi

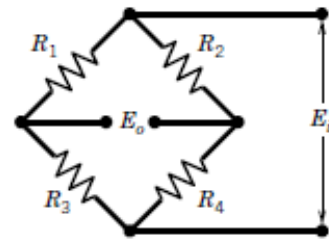
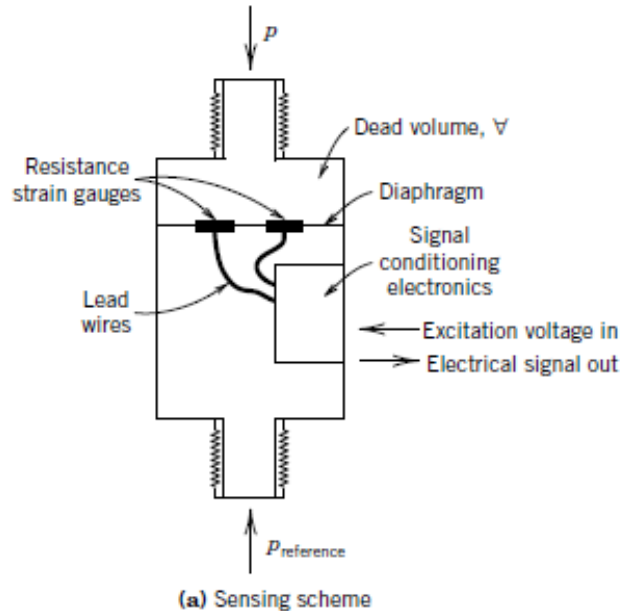


Figure 9.12 Diaphragm pressure transducer.

Trasduttori piezoresistivi

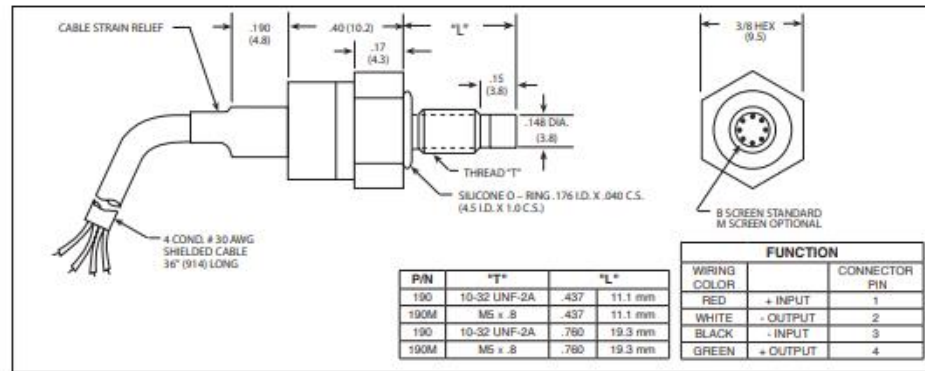
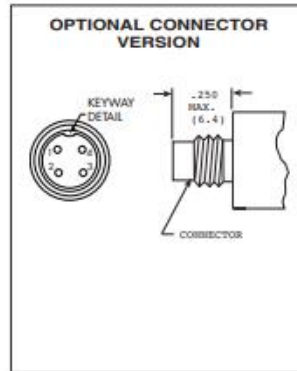


MINIATURE RUGGEDIZED IS® PRESSURE TRANSDUCER

XTL-AC-190 (M) SERIES

- Acceleration/Vibration Insensitive Design **VIS²**
- High Natural Frequency
- Easy Installation

The ruggedness of this sensor has not compromised its performance. It was designed for ease of installation and will operate properly in any medium compatible with 15-5 SS or SiO₂. The XTL-AC-190 incorporates the latest Kulite patented and patent pending technologies in pressure sensor development. One of these patented innovative technologies makes the XTL-AC-190 insensitive to acceleration forces.



Trasduttori piezoresistivi

INPUT	Pressure Range	3.5 50	7 100	17 250	35 500
	Operational Mode	Absolute, Sealed Gage			
	Over Pressure	2 Times Rated Pressure to a Maximum of 3000 PSI (210 BAR)			
	Burst Pressure	3 Times Rated Pressure to a Maximum of 5000 PSI (350 BAR)			
	Pressure Media	Most Conductive Liquids or Gases - Please Consult Factory (All Media May Not Be Suitable With O-Ring Supplied)			
	Rated Electrical Excitation	10 VDC/AC			
	Maximum Electrical Excitation	12 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	Infinitesimal			
	Natural Frequency (KHz) (Typ.)	240	300	380	550
	Acceleration Sensitivity % FS/g Perpendicular Transverse	N/A <<1x10 ⁻⁴			
PHYSICAL ENVIRONMENTAL	Insulation Resistance	100 Megohm Min. @ 50 VDC			
	Operating Temperature Range	-65°F to +350°F (-55°C to +175°C)			
	Compensated Temperature Range	+80°F to +180°F (+25°C to +80°C) Any 100°F Range Within The Operating Range on Request			
	Thermal Zero Shift	± 1% FS/100°F (Typ.)			
	Thermal Sensitivity Shift	± 1% /100°F (Typ.)			
	Mechanical Shock	20g Half Sine Wave 11 msec. Duration			
	Linear Vibration	20g Peak, Sine 10 to 2000 Hz			
	Electrical Connection	4 Conductor 30 AWG Shielded Cable 36" Long			
	Weight	4 Grams (Nom.) Excluding Cable			
	Pressure Sensing Principle	Fully Active Four Arm Wheatstone Bridge Dielectrically Isolated Silicon on Silicon Patented Leadless Technology			
Mounting Torque	15 Inch-Pounds (Max.)				

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 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 è la somma delle pressioni statica e dinamica.

Per fluidi comprimibili:

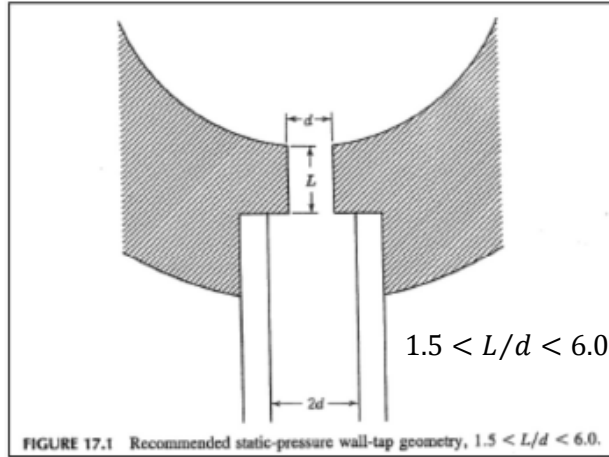
$$\frac{P_0}{P} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right)$$

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

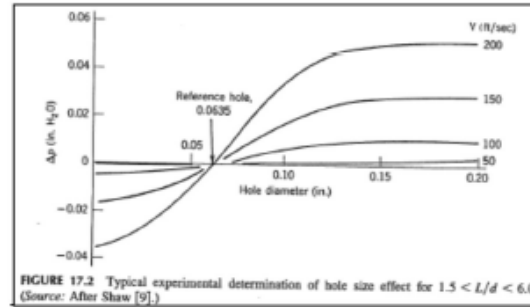
Nel caso di flusso incomprimibile ($M < 0.3$) si può approssimare: $P_0 = P + \frac{\rho v^2}{2}$

Misure di pressione statica nei flussi – wall taps



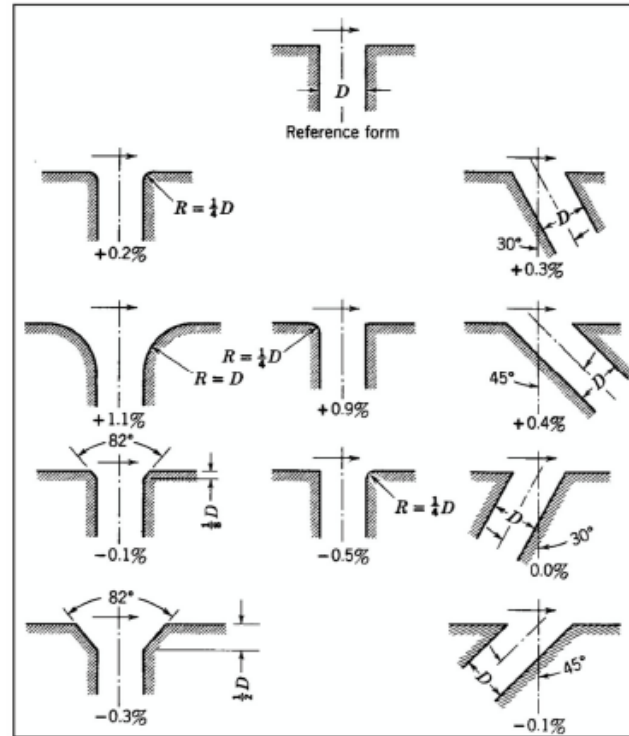
Difficoltà di realizzare per realizzare perpendicolarità e mantenere vivi gli spigoli.

Si assume che la pressione statica corretta si ottiene con un piccolo foro realizzato perpendicolarmente alla parete con gli spigoli vivi.

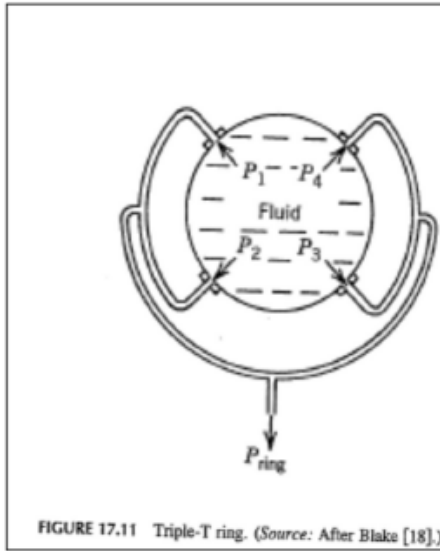
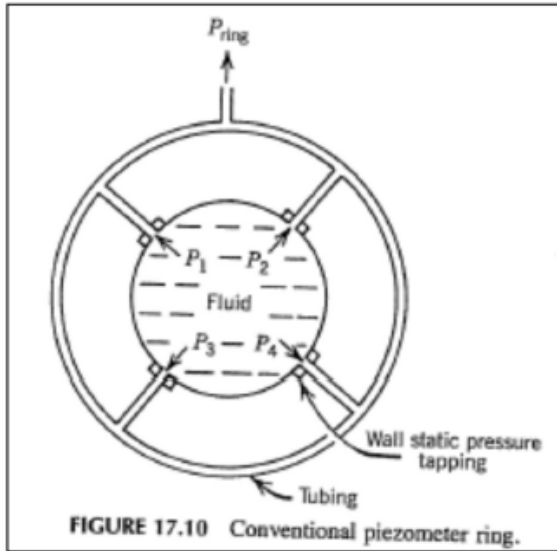


Misure di pressione statica nei flussi

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



Misure di pressione statica nei flussi



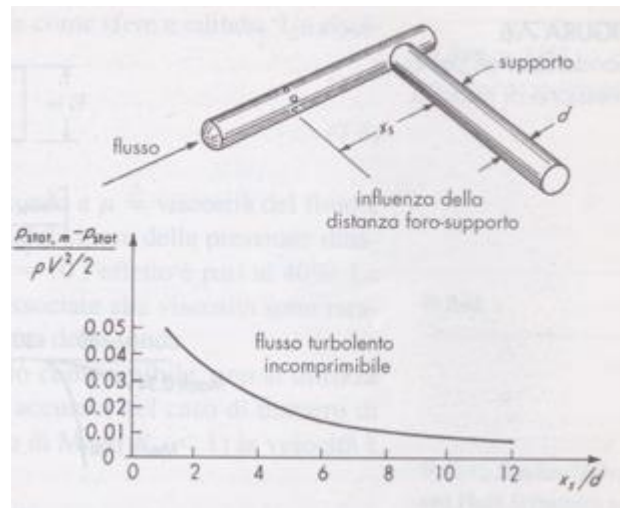
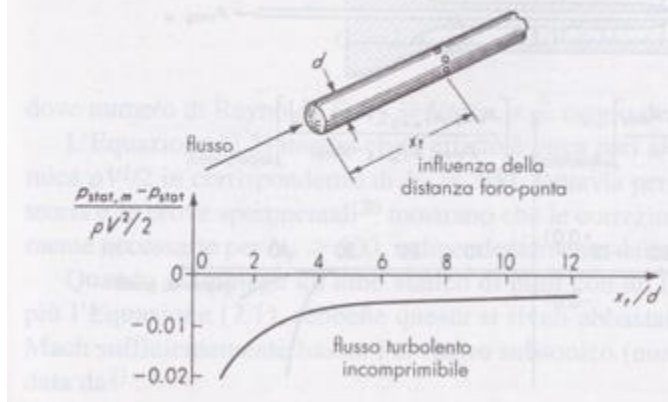
Piezometer ring – anelli piezometrici

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

Sonde di pressione statica nei flussi

FIGURA 7.4

Errori sulla misura della pressione statica.



Sonde di pressione statica nei flussi

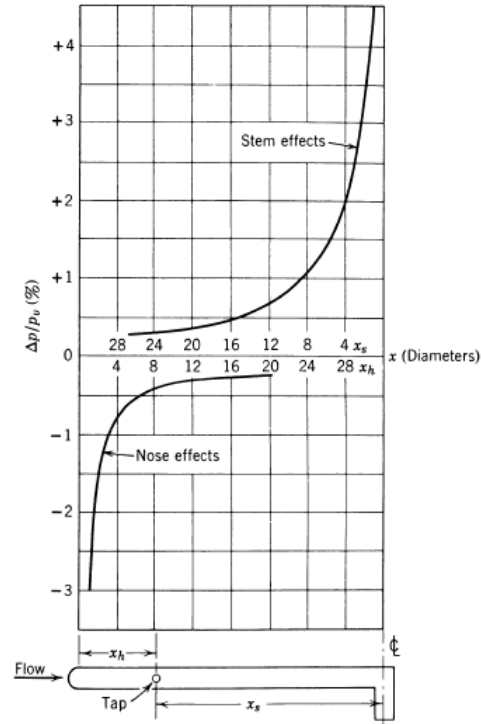


FIGURE 17.12 Static tube characteristics. x_s —position of taps from centerline of stem; x_h —position of taps from base of nose. (Source: From Dean et al. [41].)

Misure di 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

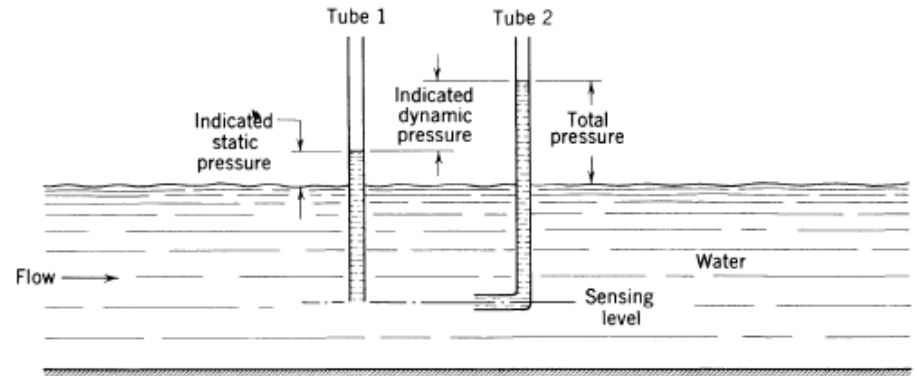


FIGURE 17.23 Basic Pitot-tube method of sensing static, dynamic, and total pressures.

Misure di pressione totale

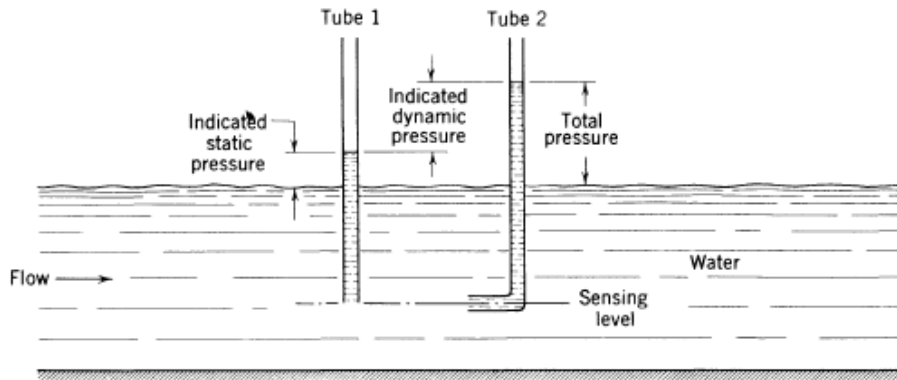


FIGURE 17.23 Basic Pitot-tube method of sensing static, dynamic, and total pressures.

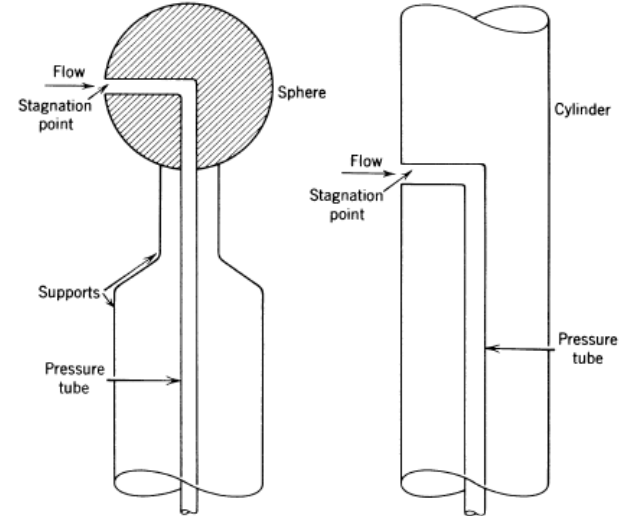


FIGURE 17.24 Aerodynamic total pressure probes.

Misure di pressione totale

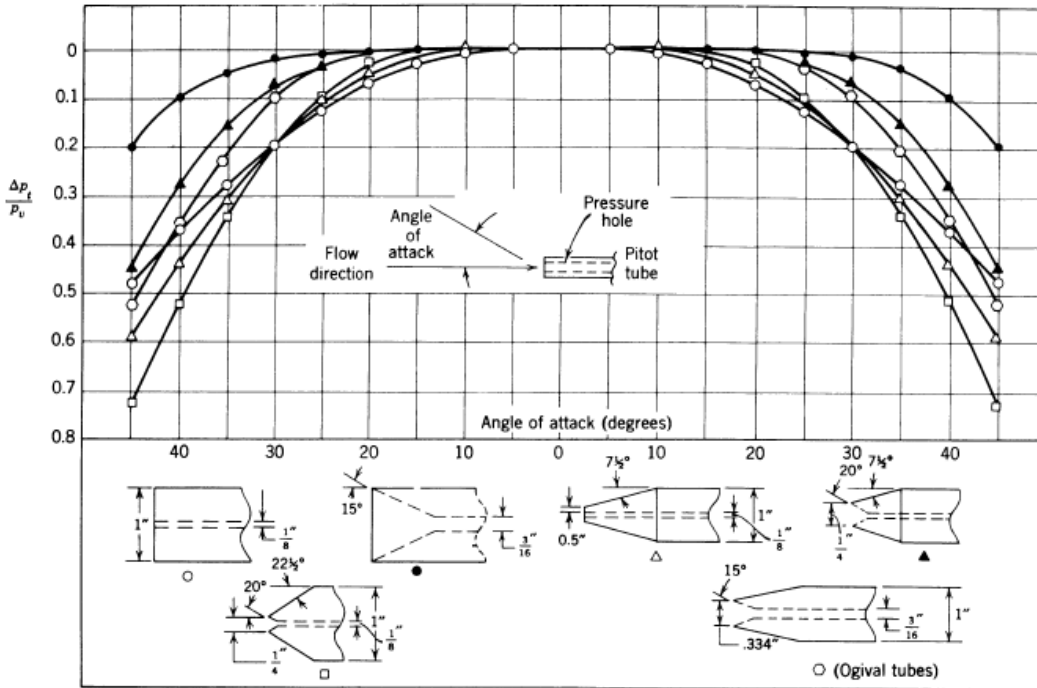


FIGURE 17.25 Characteristics of several Pitot tubes in regard to flow alignment. (Source: After Gracey et al. [29].)

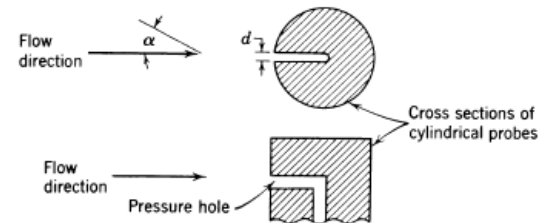
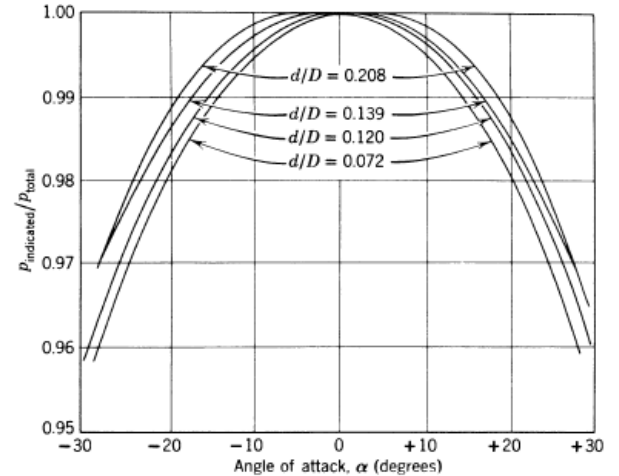
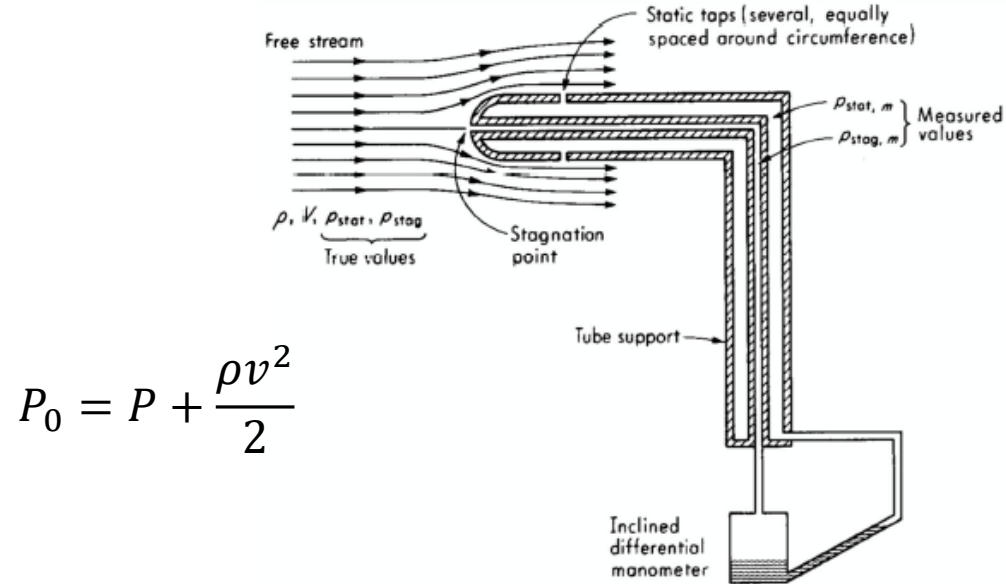


FIGURE 17.26 Variation of total pressure indication with angle of attack and hole size for cylindrical probes perpendicular to flow.

Il Tubo di Pitot

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



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

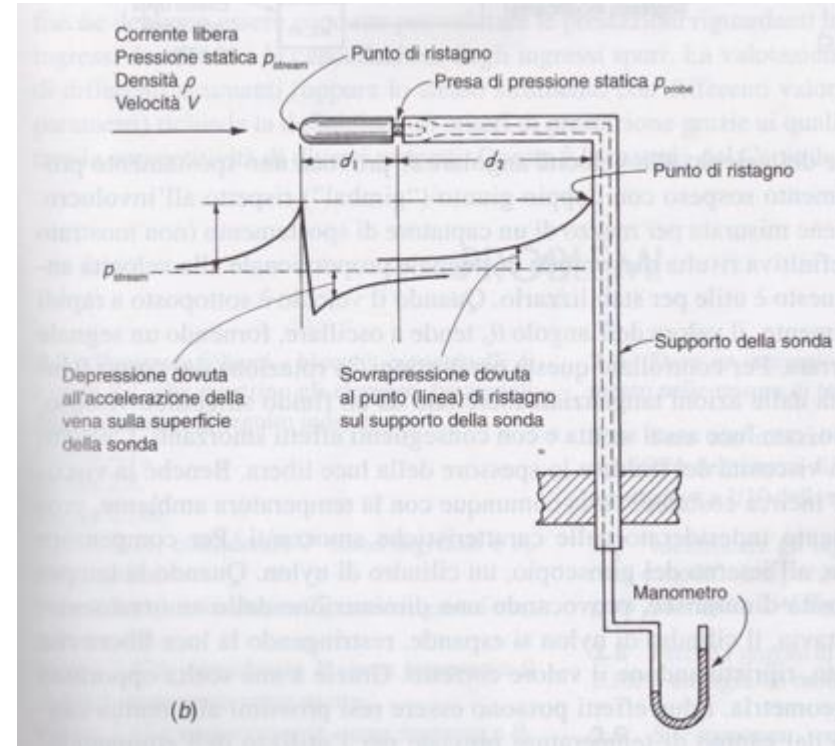
Figure 7.1 Pitot-static tube.

Il Tubo di Pitot

Eventuali sorgenti di errore nel rilevamento della pressione statica possono essere:

1. Disallineamento tra l'asse del tubo e il vettore velocità
2. Il diametro del tubo maggiore a zero porta ad un aumento della velocità del fluido che riduce la pressione statica. Lo stesso problema si manifesta se le dimensioni del condotto sono riconducibili a quelle della sonda.
3. Prese statiche troppo vicine al supporto portano ad un incremento della pressione statica a monte del bordo d'attacco del supporto.

Progettando opportunamente la sonda gli effetti di aumento della velocità e di sovrappressione al punto di ristagno si possono compensare



Sonde direzionali

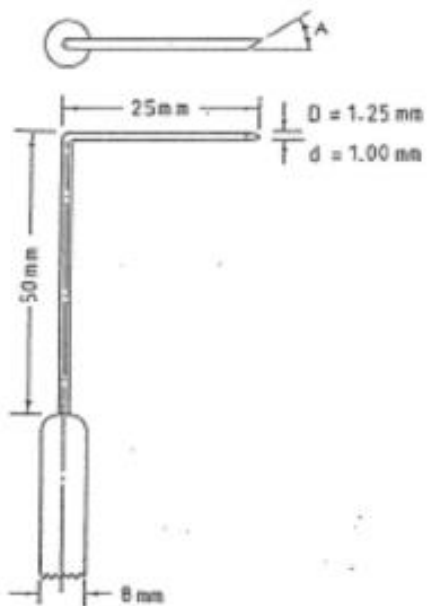


Fig. III.32 - Slanted tube geometry for yaw angle measurement

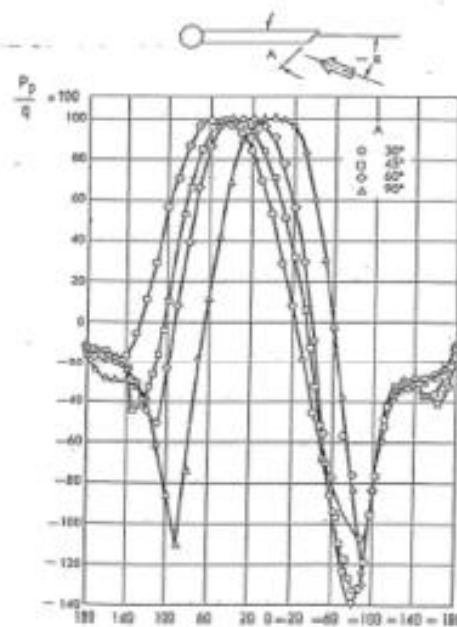
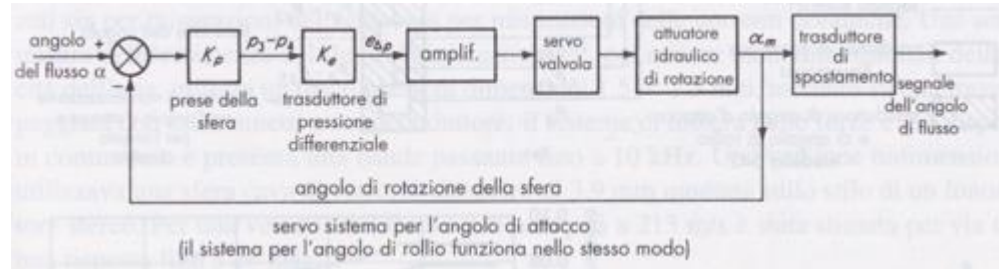
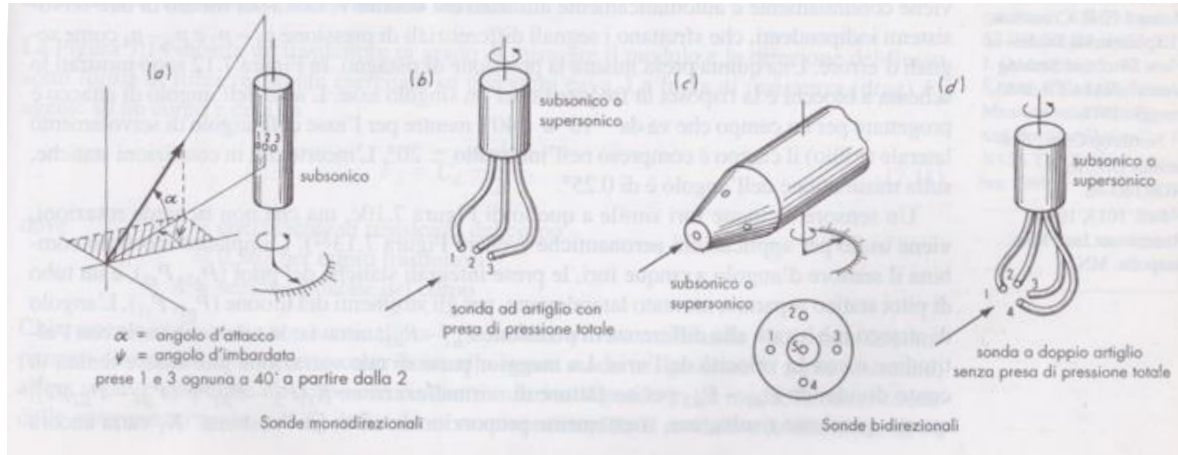


Fig. III.33 - Indicated pressure versus yaw angle of different slanted tube probes [9]

Sonde direzionali



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

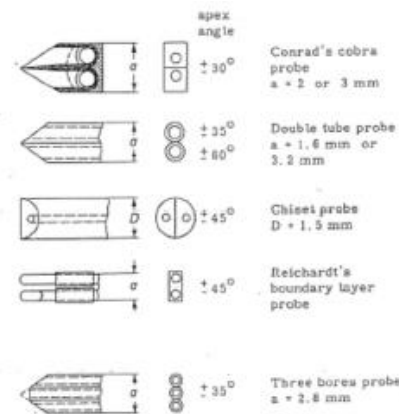
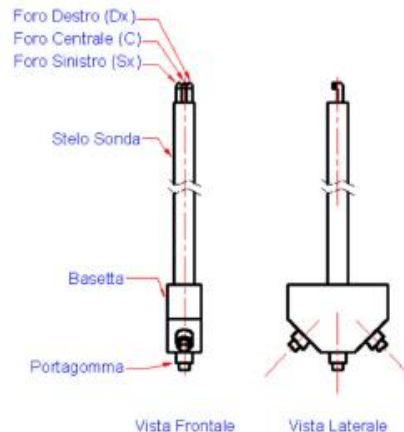


Fig. III.34 - Two dimensional flow directional probes [4]



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

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

Sonde direzionali 3D

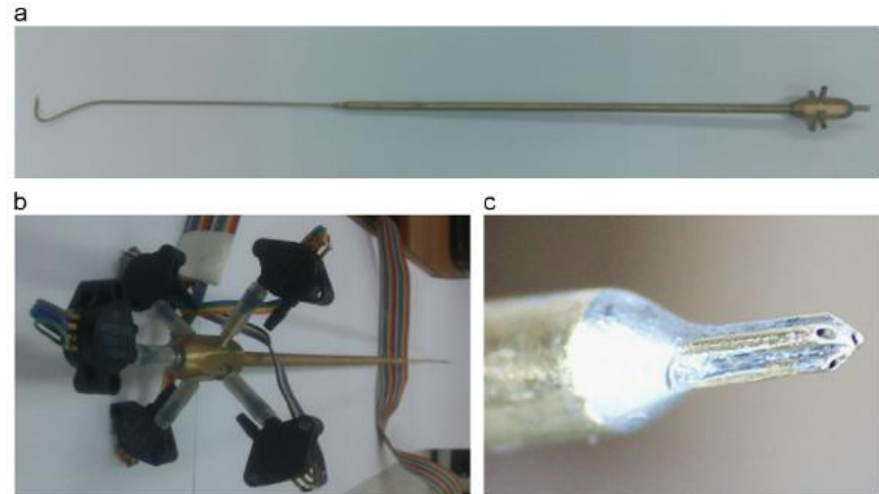
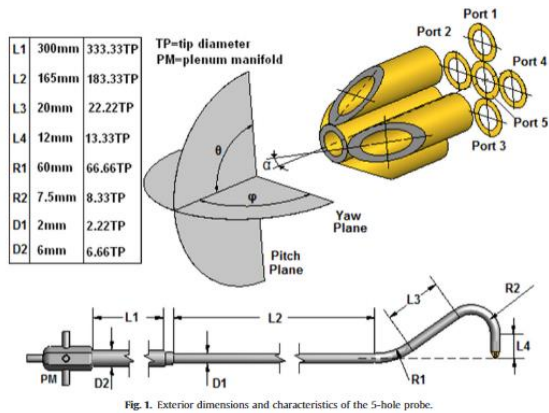


Fig. 2. (a) The fabricated 5-hole probe, (b) close view of the plenum manifold equipped with the pressure sensors, and (c) close up microscope view of the probe's tip.

Sonde direzionali 3D

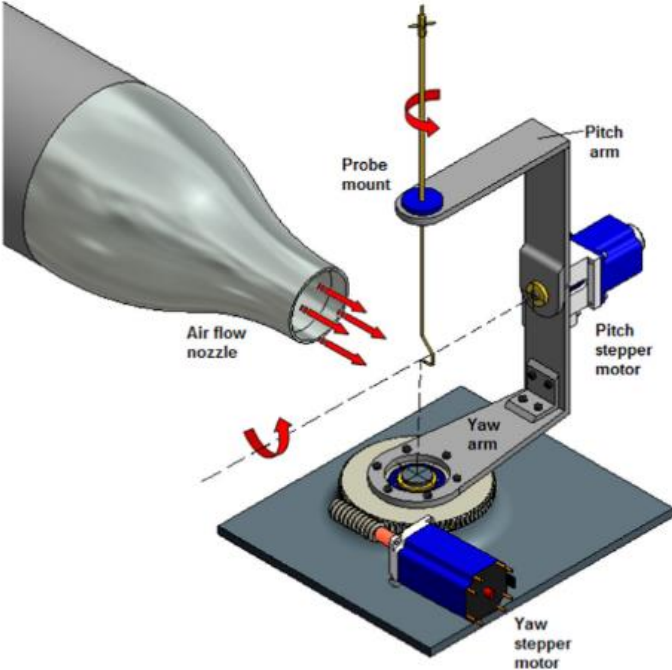


Fig. 4. The yaw-pitch traversing mechanism and air flow nozzle (i.e. the calibration rig).

Sonde direzionali 3D

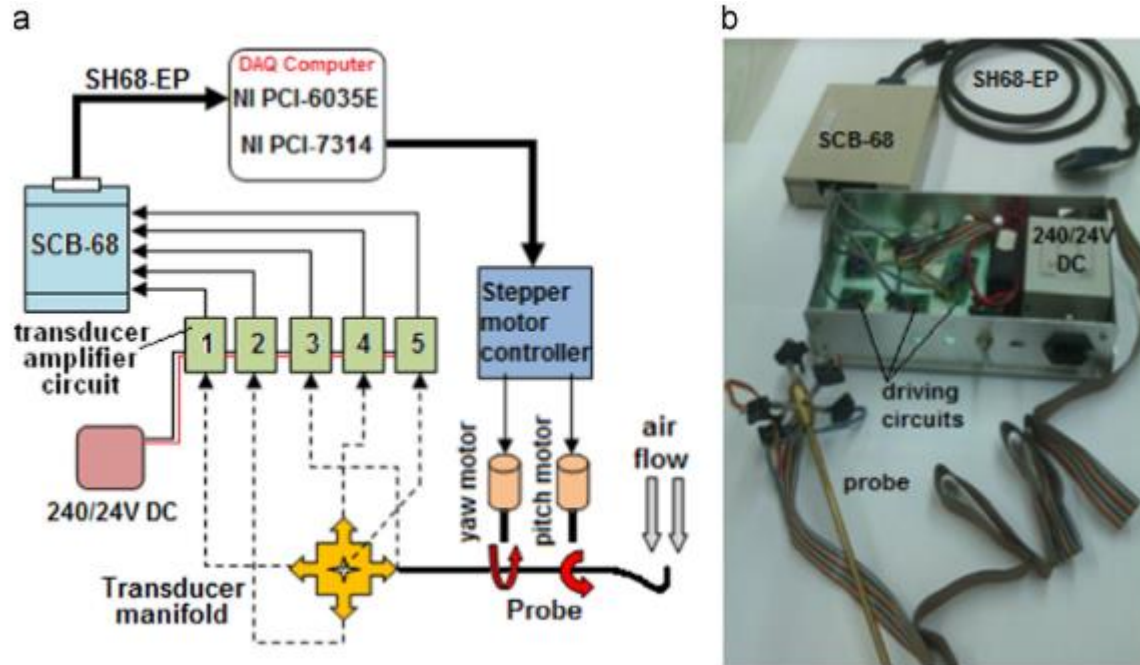


Fig. 3. (a) Components diagram for the data acquisition system and yaw-pitch traversing system and (b) actual view of the probe and its electronic components.

Sonde direzionali 3D

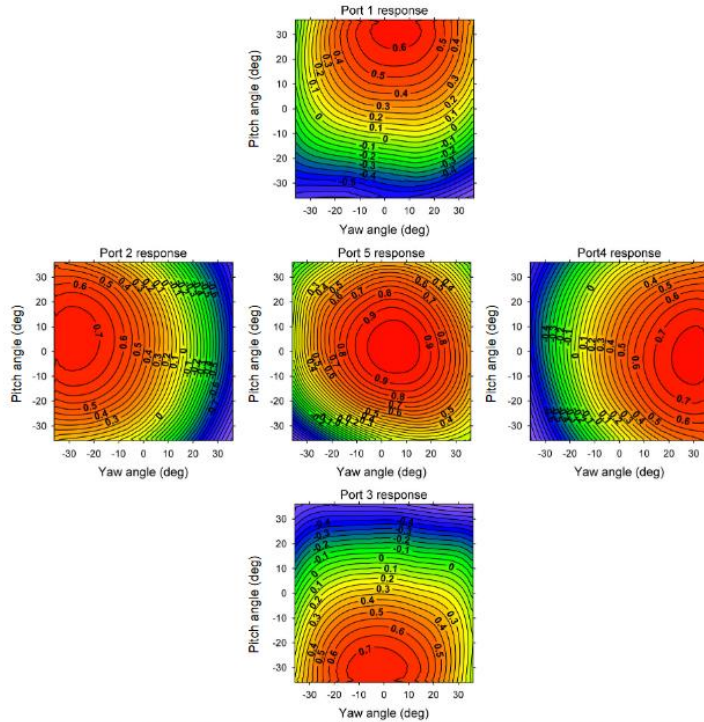


Fig. 6. Non-dimensional calibration coefficient iso-lines from the 5 port data recorded by the probe with respect to the yaw and pitch angles.

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

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

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

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

where

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

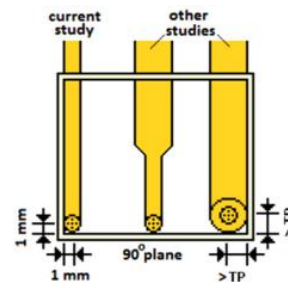


Fig. 11. Illustration of probes attached on the exit 90° plane of the bend duct: left: current study probe position, right: other studies probe position (dimensions not to scale).

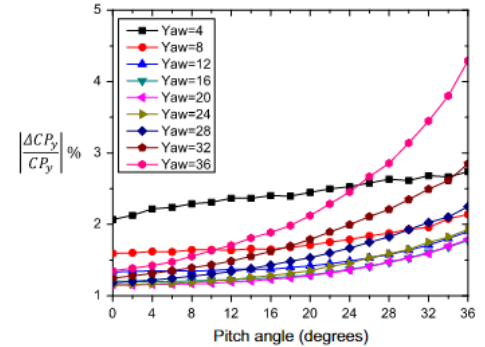


Fig. 9. The percentage error for various yaw (ϕ) and pitch (θ) angles.

Misure di 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

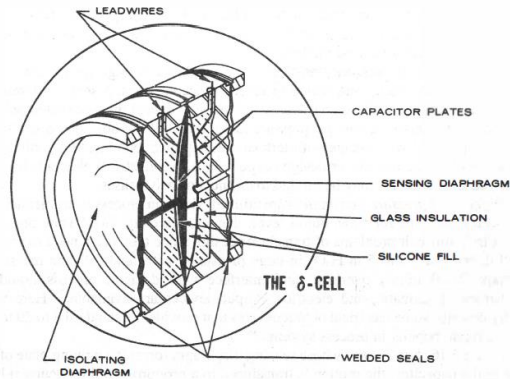


Figure 6.16

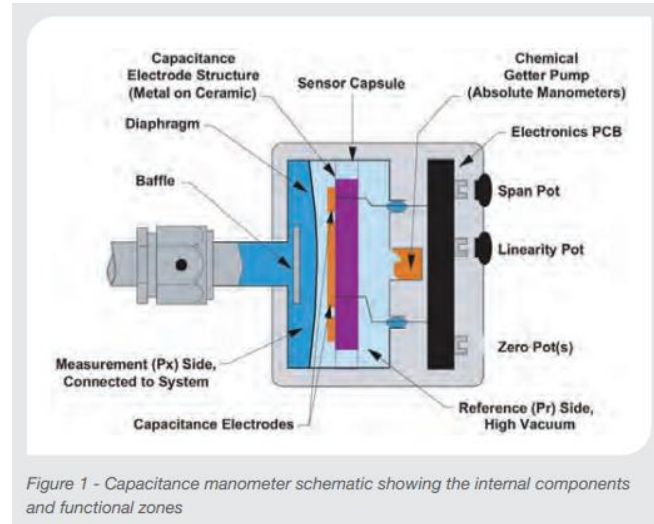
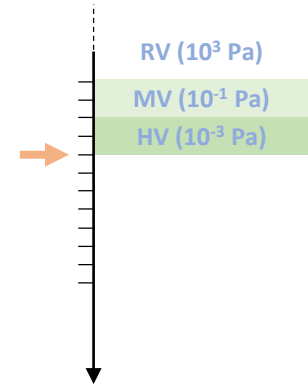


Figure 1 - Capacitance manometer schematic showing the internal components and functional zones

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



Risoluzione: 10^{-5} Pa

Misure di basse pressioni (vuoto) – manometri di McLeod

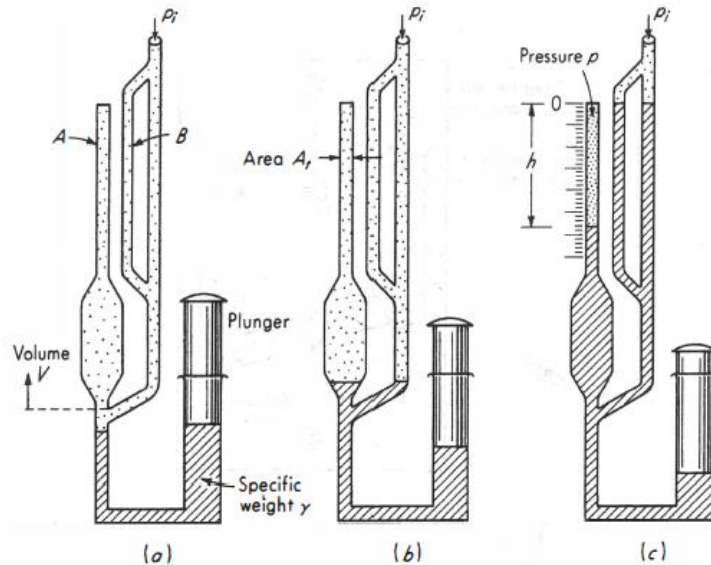


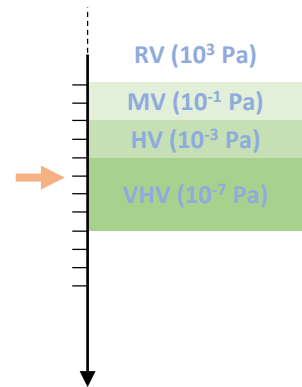
Figure 6.30

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:

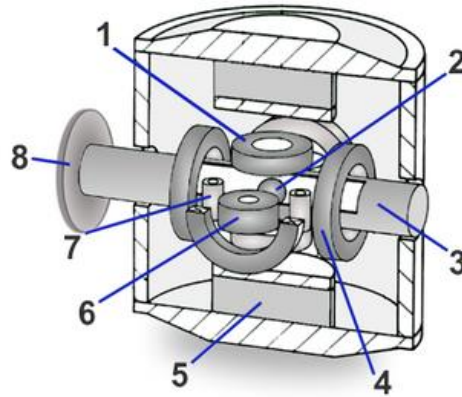
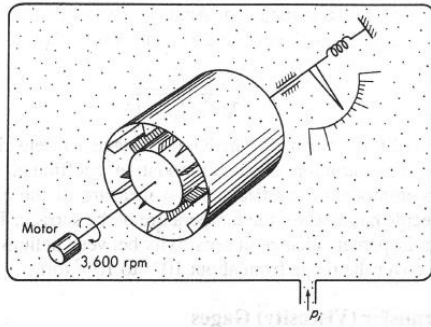
$$p_i V = p A_t h$$

$$p = p_i + h\gamma$$

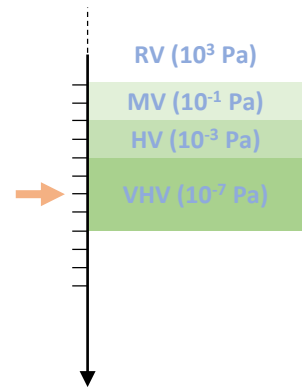
$$p_i = \frac{h\gamma^2}{V - A_t h} \cong \frac{h\gamma^2}{V}; V \gg A_t h$$



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.

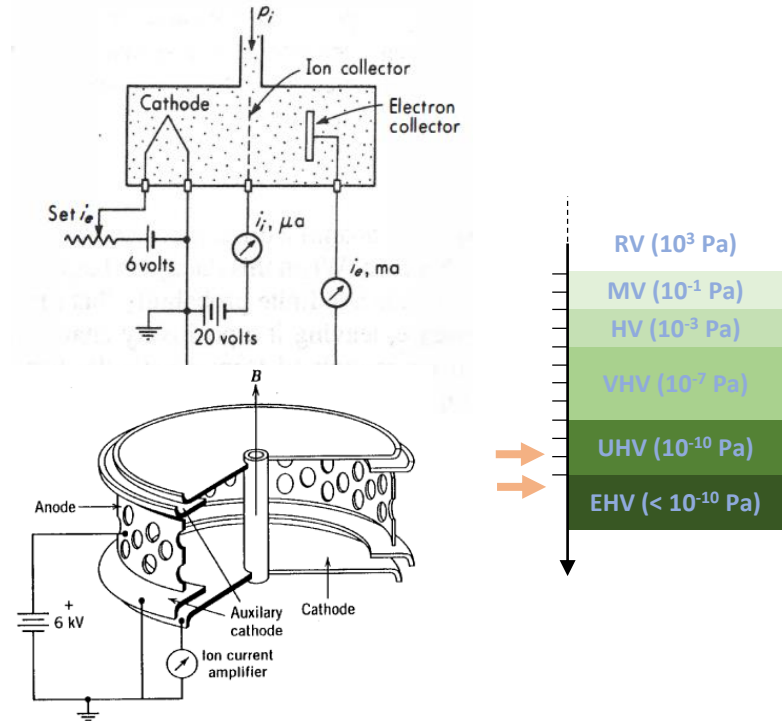
Misure di basse pressioni (vuoto) – manometri a ionizzazione

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:

$$S \sim \frac{i_{i^+}}{p \cdot i_{e^-}}$$

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**