

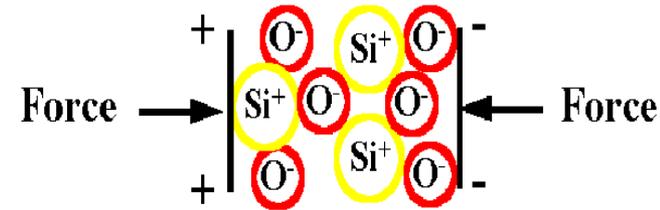
Misure dinamiche di pressione

- Versione: x
- Ultimo aggiornamento: Novembre 2012
- Realizzato da: C.Cinelli-F.Taddei
- Originale C.Cinelli-F. Taddei
- Riferimenti MISURE MECCANICHE E COLLAUDI (Prof. DE LUCIA)
 - ⇒ “Strumenti e metodi di misura”, E. O. Doebelin, Mc GRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS
 - ⇒ “Measurement System - Application and design”, E. O. Doebelin, Mc GRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS
 - ⇒ www.kulite.com
 - ⇒ Siti dei costruttori: PCB, DYTRAN, ecc.

- I sensori dinamici di pressione, grazie alla loro versatilità, sono impiegati ampiamente in tutte quelle applicazioni che richiedono misure accurate di pressione, forza ed accelerazione, nei campi più disparati, quali, ad esempio, l'aerospazio, la balistica, la biomeccanica, l'ingegneria meccanica e strutturale.
- I trasduttori di pressione si dividono in due categorie fondamentali: **piezoelettrici e piezoresistivi**.
- I primi sfruttano la proprietà che hanno solo alcuni particolari materiali di generare uno spostamento di cariche, se sollecitati da un'azione esterna. Se, però, questa forza è costante, il cristallo non restituisce alcun segnale; perciò questi sensori sono adatti solo a misurazioni dinamiche di pressione.
- Quando, invece, sono necessarie anche misurazione statiche, si deve ricorrere ai sensori piezoresistivi, il cui principio di funzionamento si basa sulla variazione di resistenza elettrica di un estensimetro a semiconduttore sottoposto ad una forza esterna.

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

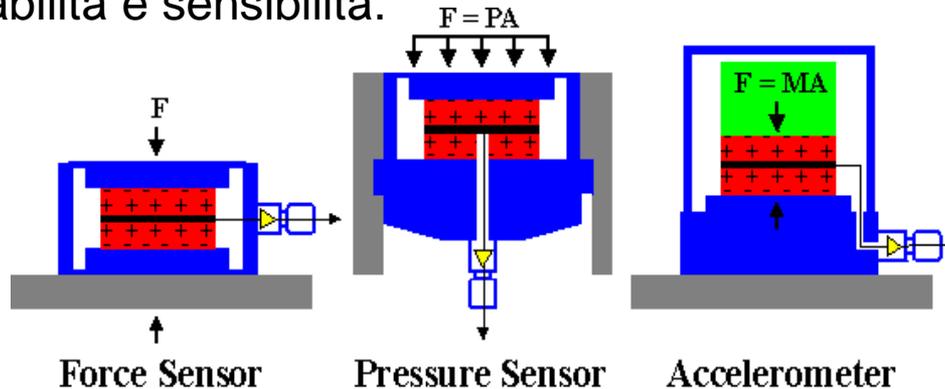
➤ Questo consiste nel fatto che alcuni cristalli, se sottoposti all'azione di una sollecitazione esterna, generano una migrazione di cariche che, con l'utilizzo di un apposito circuito, può essere tradotto in una differenza di potenziale.



➤ 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



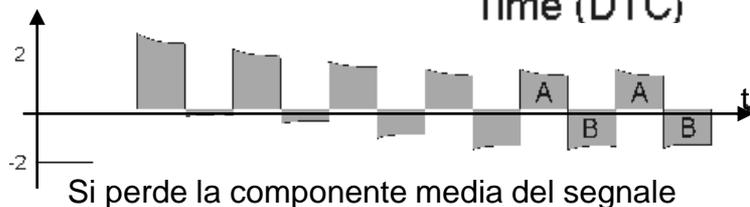
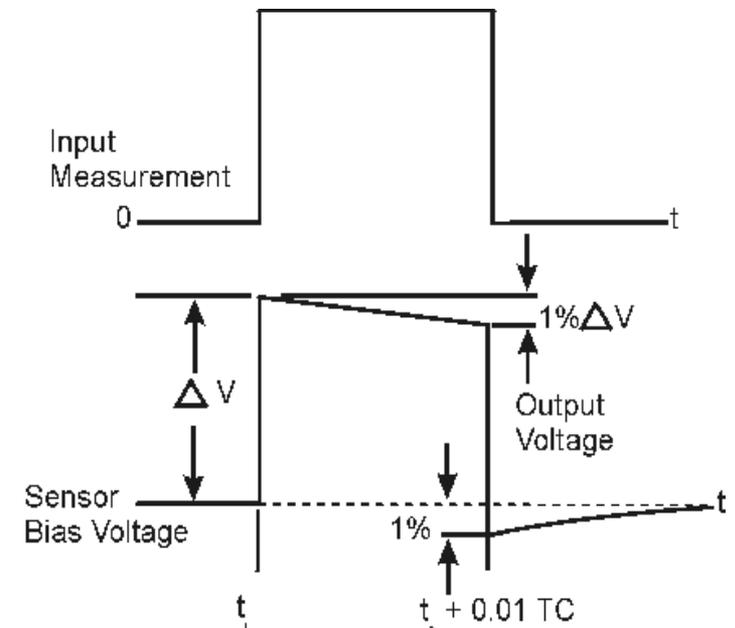
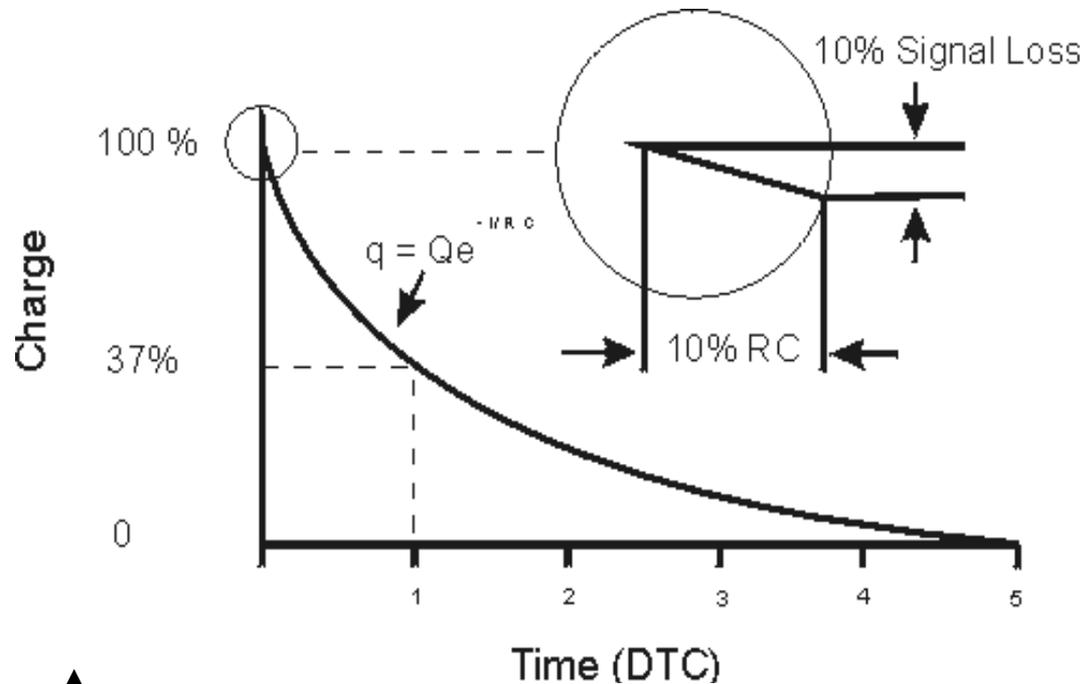
Trasduttori piezoelettrici

- 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.

- Principali gruppi di materiali:
 - ⇒ Cristalli naturali (quarzo, sali di Rochelle)
 - ⇒ Cristalli sintetici (solfato di Litio, fosfato di ammonio biidrogenato)
 - ⇒ Ceramiche ferroelettriche polarizzate (titanio di bario ecc.)
 - Devono essere polarizzate artificialmente tramite l'applicazione di un forte campo elettrico.
 - ⇒ Alcune pellicole di polimeri

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.



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

PERFORMANCE	ENGLISH	SI
Measurement Range (for ± 5V output)	5 kpsi	34,500 kPa
Useful Overrange (for ± 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



www.pcb.com

Combustion

- Combustion Profiles
- Compression
- Fuel Burn Instabilities
- Fuel Injection
- Knock Detection

Explosives Testing

- Air Blast
- Ballistics
- Bubble Energy
- Closed Bombs
- Impulse
- Propellant Studies
- Shock Waves
- Time-of-arrival
- Underwater Blast

Process Monitoring

- Compressor Tuning & Monitoring
- Engine Test Stands
- Gas & Steam Turbine Performance
- Hydraulic Systems
- Liquid Level
- Pump Monitoring
- Surges
- Valve Dynamics
- Wind Tunnels

Product Testing

- Cavitations
- Flow Instabilities
- Fluctuations
- Fluid Pulsations
- Hydraulic Pulsations
- Pneumatic Pulsations
- Turbulence
- Water Hammer



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.
- La resistenza elettrica è definita come: $R = \rho L / A$
- La variazione di resistenza può essere dovuta alla combinazione di due effetti: variazioni geometriche (lunghezza ed area) del materiale ed effetto piezoresistivo (variazione di resistività).

Differenziando:

$$(dR/R) = (d\rho/\rho) + (dL/L) - (dA/A)$$

$$dA/A = 2 dD/D$$

$$\nu = -\varepsilon_1 / \varepsilon_a = -\frac{dD/D}{dL/L} \quad (\text{Coeff. di Poisson})$$

$$dR/R = \varepsilon_A (1 + 2\nu) + d\rho/\rho$$

Trasduttori piezoresistivi

➤ Il *Gauge Factor*, GF , è definito come:

$$GF = \frac{dR/R}{dL/L}$$

$$dR/R = \varepsilon_A (1 + 2\nu) + d\rho/\rho \quad \rightarrow \quad G = 1 + 2\nu + (d\rho/\rho)/\varepsilon_A$$

➤ 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:

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

Trasduttori piezoresistivi

$$GF = 1 + 2\nu + \pi_l E$$

ν è il coefficiente di Poisson,

π_l è il coefficiente di piezoresistività longitudinale

E è il modulo di Young ($E = \sigma/\varepsilon$).

- I primi due termini rappresentano, rispettivamente, le variazioni di resistenza dovute alle variazioni di lunghezza e sezione;
 - l'ultimo termine rappresenta invece la variazione di resistenza associata a quella di resistività dovuta all'applicazione di una forza di compressione o trazione.
- 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:

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

- 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.

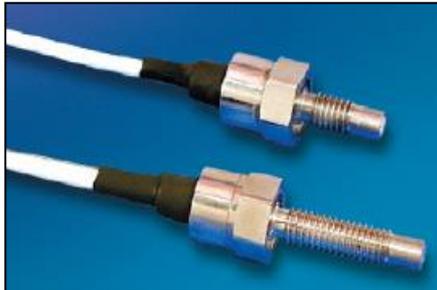
Trasduttori piezoresistivi

- 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/cm³, il *Gauge Factor* dipende fortemente da T e F. nella forma:

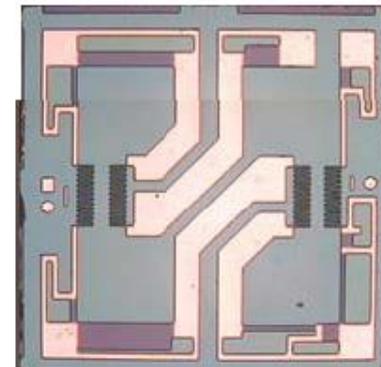
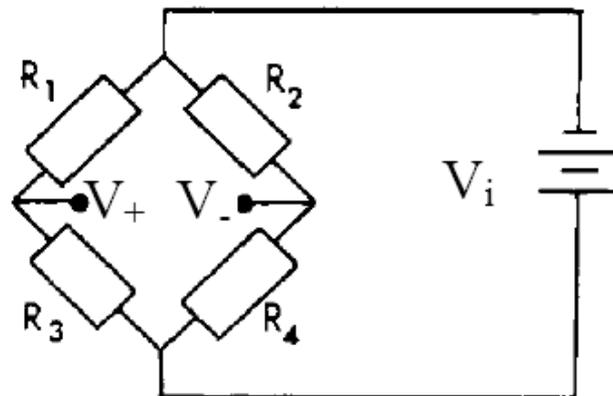
$$G.F. = \frac{T_0}{T} (G.F.)_0 + \frac{T_0}{T} \cdot \varepsilon$$

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.



- The diffused piezoresistive transducer uses a **silicon element** for the mechanical structure, and the **strain gauge is an integral part of the silicon element** instead of the strain sensitive elements being bonded to the diaphragm as in the past. The silicon integrated chip is itself the diaphragm.
- Applied pressure presents a distributed load to the diaphragm, which in turn provides bending stresses and resultant strains, to which the strain gauges react. This stress creates a strain proportional to the applied pressure, which results in a bridge unbalance.
- With an applied voltage, this unbalance typically produces a 100 millivolt deviation at the bridge output, which is proportional to the net difference in pressure acting upon the diaphragm for a supply voltage of 10 volts.

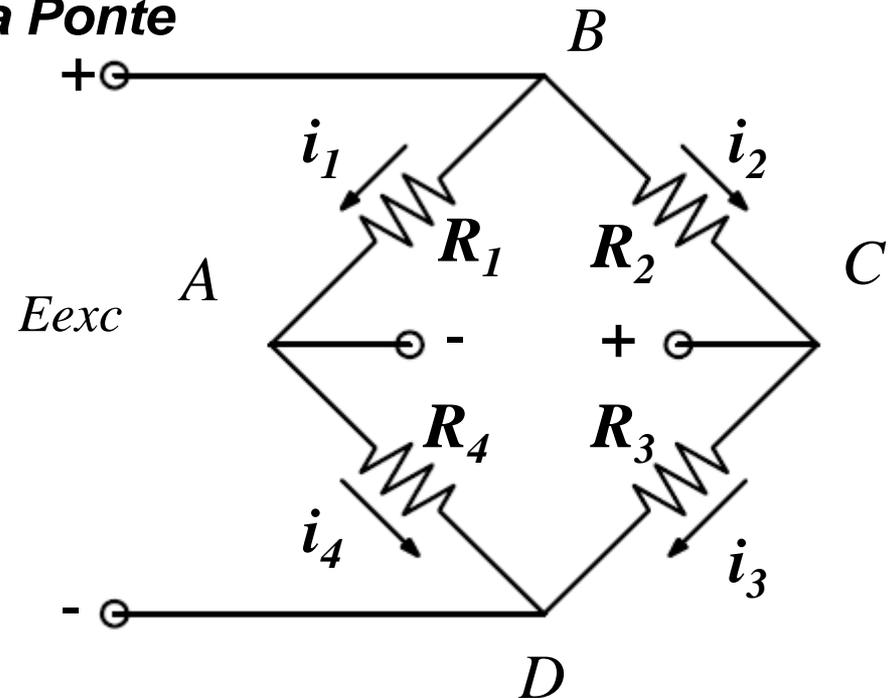


Circuiti a Ponte

Ponte di Wheatstone

- Largamente impiegati nei sistemi di misura che convertono una grandezza fisica in una variazione di resistenza
 - Termoresistenze
 - Termistori
 - Estensimetri
 - Sensori piezoresistivi

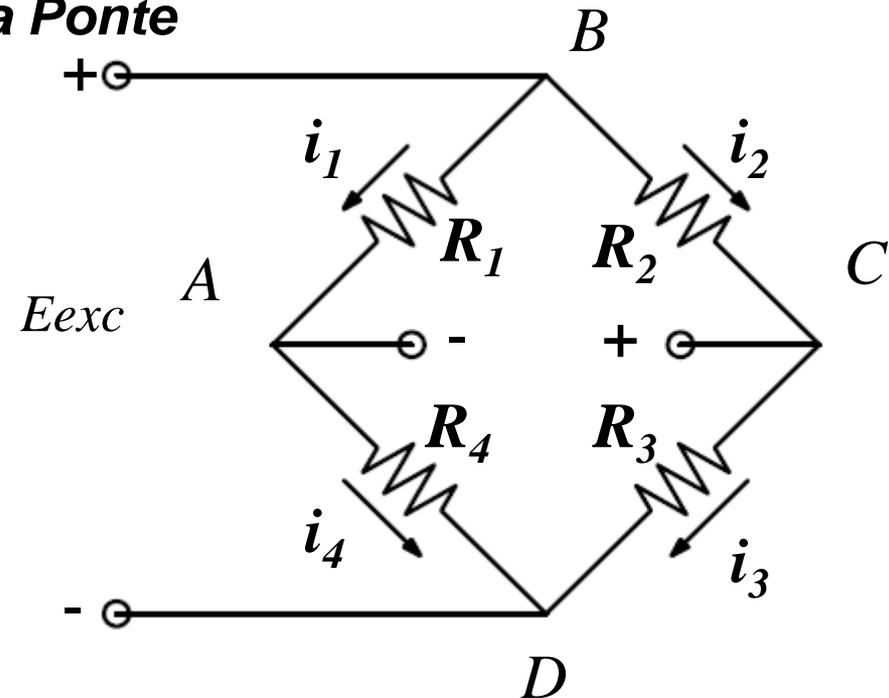
- Ponte puramente resistivo
- E_{exc} può essere sia AC che DC
- La resistenza variabile può essere una o più di una delle resistenze che costituiscono il ponte
- Può variare il numero di elementi sensibili: full-bridge, half-bridge, quarter-bridge



Circuiti a Ponte

$$e_{AC} = 0 \Leftrightarrow R_1/R_4 = R_2/R_3$$

- ❑ Il ponte è bilanciato
- ❑ Due modalità di funzionamento:
 1. A deflessione
 2. Ad azzeramento
- ❑ Supponiamo che R_1 cambi sbilanciando il ponte
 1. Nella modalità a deflessione si misura lo sbilanciamento con uno strumento tarato
 2. Nella modalità ad azzeramento si modifica una resistenza, ad es. R_2 , in modo da riportare il ponte nella condizione $e_{AC}=0$



- ✓ Misura diretta dell'uscita del ponte
- ✓ Adatto a misure dinamiche
- ✗ E_{exc} influenza direttamente la misura
- ✓ E_{exc} non influenza la misura
- ✗ Necessita di un circuito di regolazione e di una resistenza variabile
- ✗ Risposta lenta

Circuiti a Ponte

$$e_{AC} = E_{exc} \left[\frac{R_1}{R_1 + R_4} - \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right]$$

❑ Direttamente proporzionale con la tensione di eccitazione, non lineare con la resistenza

❑ Supponiamo che:

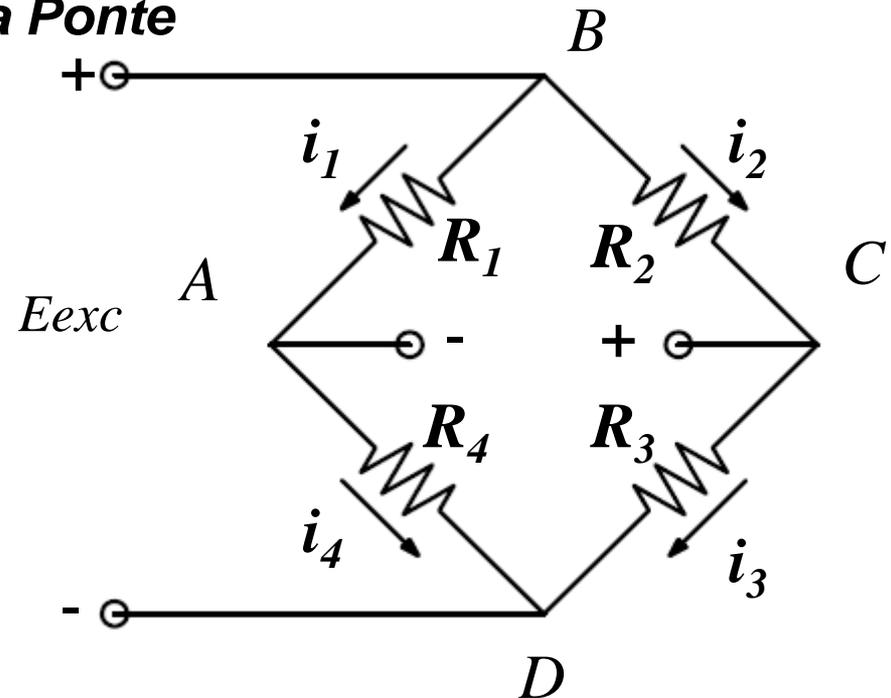
$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$$

$$+ \Delta R_1 = -\Delta R_2 = +\Delta R_3 = -\Delta R_4 = \Delta R$$

$$e_{AC} = E_{exc} \left[\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_4 + \Delta R_4} - \frac{R_2 + \Delta R_2}{R_2 + \Delta R_2 + R_3 + \Delta R_3} \right]$$

❑ Si può ottenere una perfetta linearità, infatti sostituendo si ottiene

$$e_{AC} = E_{exc} \left[\frac{\Delta R}{R} \right]$$



NOTA: la linearità si ottiene anche nel caso che R_2 e R_3 siano fisse e $+ \Delta R_1 = -\Delta R_4$

Circuiti a Ponte

□ Nei casi pratici la linearità si ottiene perché □ $R \approx 1\%$ di R

$$e_{AC} = E_{exc} \left[\frac{R_1}{R_1 + R_4} - \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right]$$

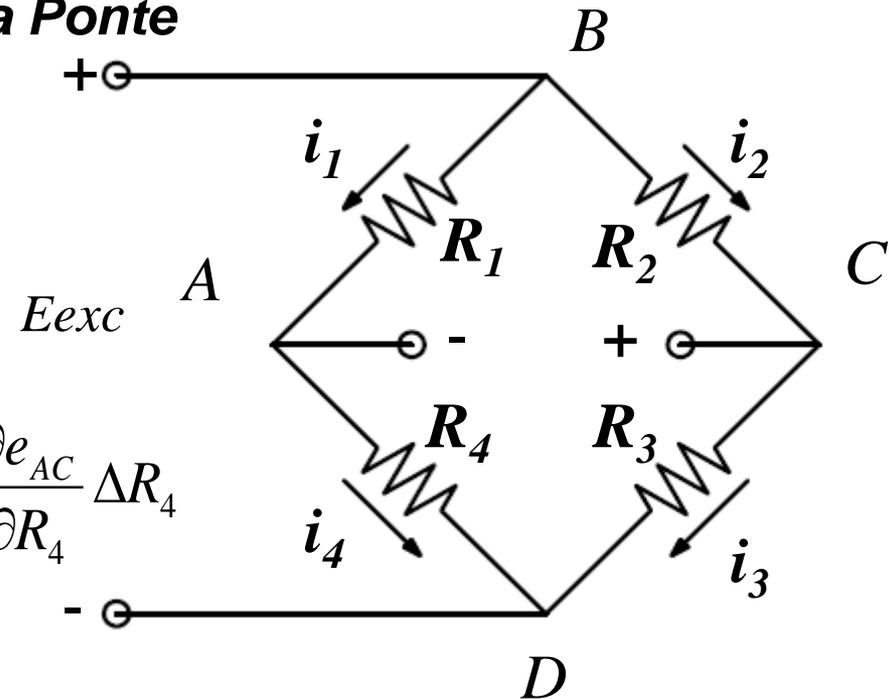
$$\Delta e_{AC} = \frac{\partial e_{AC}}{\partial R_1} \Delta R_1 + \frac{\partial e_{AC}}{\partial R_2} \Delta R_2 + \frac{\partial e_{AC}}{\partial R_3} \Delta R_3 + \frac{\partial e_{AC}}{\partial R_4} \Delta R_4$$

$$\frac{\partial e_{AC}}{\partial R_1} = +E_{exc} \frac{R_4}{(R_1 + R_4)^2}$$

$$\frac{\partial e_{AC}}{\partial R_2} = -E_{exc} \frac{R_3}{(R_2 + R_3)^2}$$

$$\frac{\partial e_{AC}}{\partial R_3} = +E_{exc} \frac{R_2}{(R_2 + R_3)^2}$$

$$\frac{\partial e_{AC}}{\partial R_4} = -E_{exc} \frac{R_1}{(R_1 + R_4)^2}$$



- Le variazioni di resistenza su rami adiacenti hanno segno opposto mentre su rami opposti hanno lo stesso segno
- Un buon progetto del ponte è tale che le variazioni di resistenza dovute all'azione della grandezza da misurare siano di segno opposto su rami adiacenti, in tal modo si possono eliminare gli effetti della temperatura

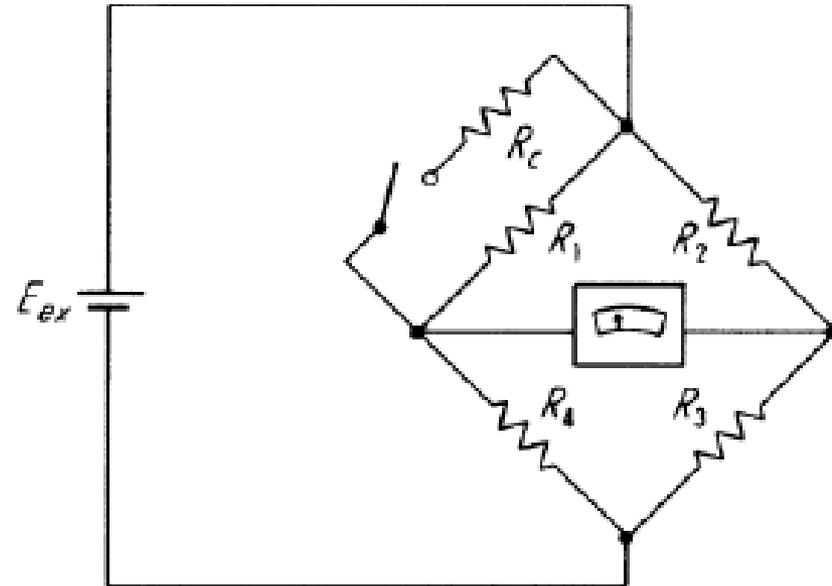
Circuiti a Ponte

- ❑ Taratura con resistenza in parallelo (Shunt-Resistor)

$$\Delta R = R_1 - \frac{R_1 R_c}{R_1 + R_c}$$

$$S \equiv \frac{e_{AC}}{\Delta R}$$

- ❑ Considera gli effetti di tutti i resistori del ponte e del sistema di alimentazione
- ❑ Non è una taratura completa del dispositivo se il circuito a ponte è una parte parte di un sistema più ampio (es. trasduttore piezoresistivo)



Circuiti a Ponte

EFFETTI DI TEMPERATURA

- ❑ La variazione della temperatura dell'ambiente di misura:
 - Modifica la **resistenza del ponte**
 - **Temperature Coefficient of Resistance (TCR)** [%/°C ref. $\Omega@T_0$]
 - Modifica la sensibilità del circuito - gauge factor
 - **Temperature Coefficient of Sensitivity (TCS)** [%/°C ref. $V/Pa@T_0$; $mV/V_{exc}/Pa@T_0$]

⇒

- ❑ **Deriva di zero (Zero Thermal Drift)**
 - Anche se il ponte ha resistenze equalizzate, si ha sempre un'uscita residua (Zero Measurand Output), questa viene modificata dalla temperatura
- ❑ **Deriva della sensibilità (Sensitivity Drift)**
 - Generalmente decresce con la temperatura ⇒ $TCS < 0$; $\approx -0.2\%/^{\circ}C$
- ❑ **Span Drift**
 - Deriva del range di output del sensore, ampiezza del range dal valore massimo al valore minimo della grandezza misurata
 - Dipende da sensitivity drift e dalla resistenza del ponte

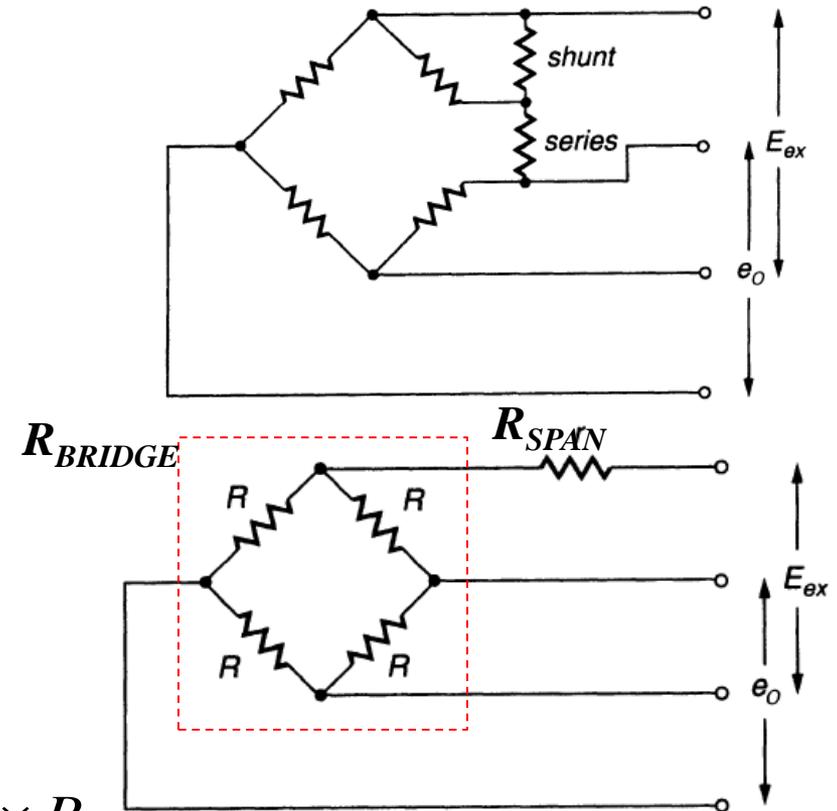
Circuiti a Ponte

EFFETTI DI TEMPERATURA – ESEMPI di CIRCUITI CON COMPENSAZIONE

Zero drift compensation + Temperature compensation: vengono inseriti dei resistori con TCR nullo, quello in parallelo diminuisce la sensibilità del ponte dalla temperatura, quello in serie serve per bilanciare il ponte. Le resistenze possono essere installate fuori dalla zona di misura.

Span drift compensation: viene inserito un resistore con TCR nullo in serie all'alimentazione del ponte.

$$e_{OUT} = E_{exc} \times \left[\frac{R_{Bridge}(T)}{R_{Bridge}(T) + R_{SPAN}} \right] \times S(T) \times P$$



Circuiti a Ponte

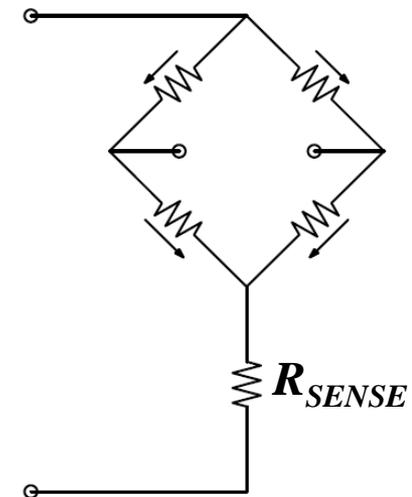
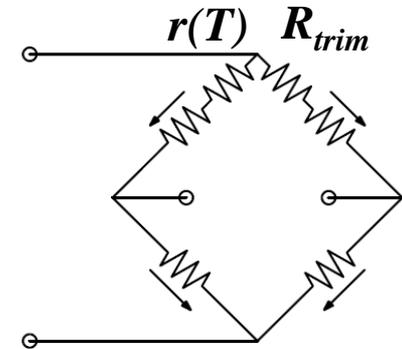
EFFETTI DI TEMPERATURA – ESEMPI di CIRCUITI CON COMPENSAZIONE

Zero drift compensation + Temperature

compensation: viene inserito un resistore r variabile con la temperatura. Tale resistore viene dimensionato in modo da annullare lo sbilanciamento dovuto alla variazione di temperatura, per garantire il bilanciamento del ponte alla temperatura di riferimento si inserisce un altro resistore con TCR nullo sul ramo adiacente.

La compensazione della deriva della sensibilità viene effettuata come nel caso precedente.

Con Sense-Resistor, la tensione ai capi del resistore viene registrata per effettuare correzioni analogiche o in postprocessing.



Circuiti a Ponte

ESEMPI di CIRCUITI

- ❑ Ponte con sistema di bilanciamento in parallelo, regolazione della sensibilità e resistenza di taratura

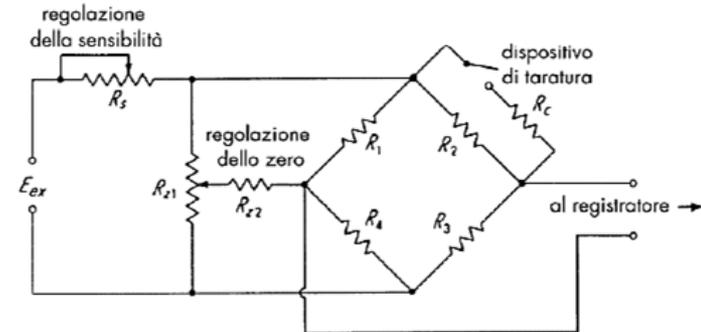
$$e_{AC} = 0 \Leftrightarrow R_1/R_4 = R_2/R_3$$

- ❑ Sistema di bilanciamento:

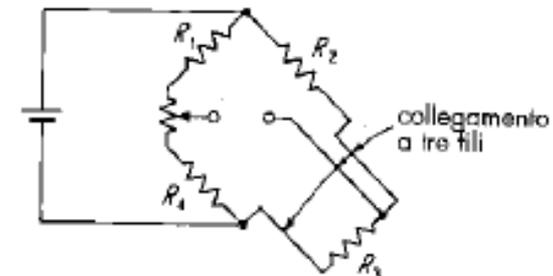
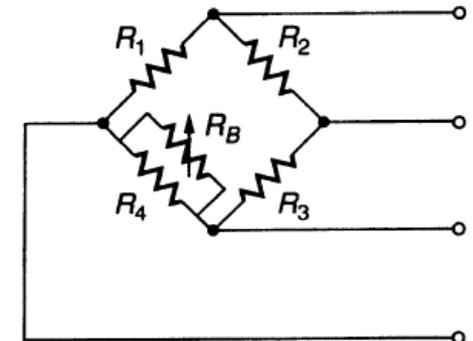
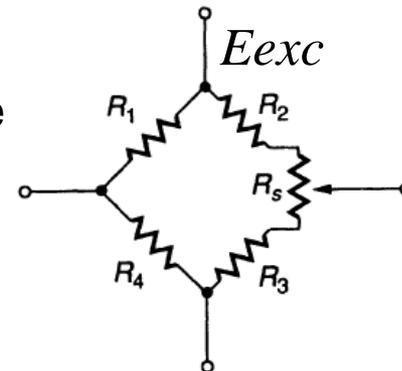
Variazione di due resistori in serie, la resistenza di contatto non influisce perché si trova su rami adiacenti del ponte.

A destra: bilanciamento con variazione della resistenza di un solo ramo del ponte

- ❑ Compensazione della resistenza nei cavi collegamento a 3 fili (circuito a 1/4 di ponte)



Se $R_1 \approx R_2 \approx R_3 \approx R_4 < 1000$ ohm (normale trasduttore a estensimetri)
allora $R_{z2} \approx 100 R_1$
 $R_{z1} \approx 25000$ ohm



TECHNOLOGY: Capabilities

Pressure Sensors

High Proof Pressure

5 to 200 times overload pressure (range dependent) without affecting transducers performance. This includes overload pressures in "Both Directions" for differential pressure sensors.

Pressure Ranges

Ranges from 2 PSI Full Scale, to 30,000 PSI Full Scale.
(Absolute, Gage, Sealed Gage, Differential)

Temperature Extremes

Very High 1000°F (538°C) Continuous operation.
Cryogenic -320°F (-196°C) Continuous operation.

Simultaneous Static and Dynamic Pressure Measurements

Ability to measure steady state pressure, and dynamic pressure with the same sensor.

Bridge Resistance

1,000 ohms typical. Custom requests from 350 ohms, through 4,000 ohms, is possible.

High Vibration

100g Peak, Sine 10 to 5,000 Hz

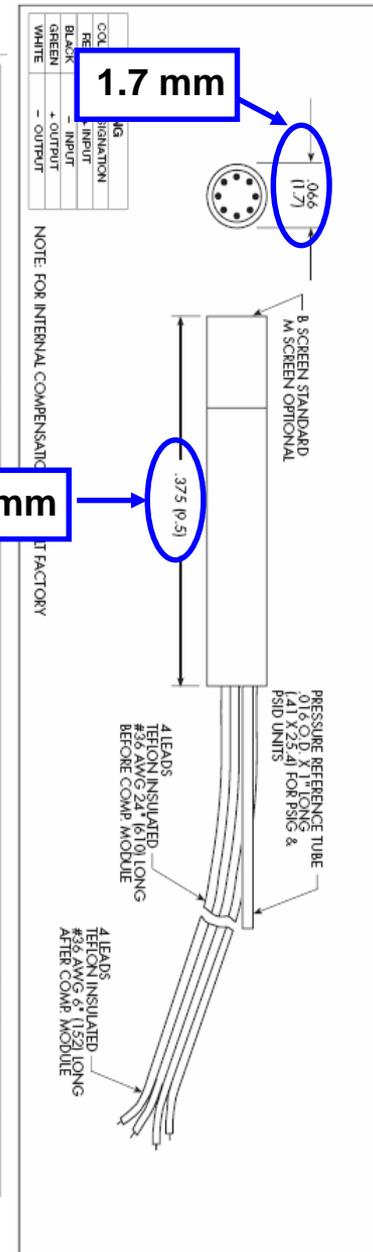
Shunt Calibration

Special option available upon request.



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	1.5x10 ⁻³	1.0x10 ⁻⁴	5.0x10 ⁻⁴	3.0x10 ⁻⁴	1.5x10 ⁻⁴	1.0x10 ⁻⁴	6.0x10 ⁻⁵	4.0x10 ⁻⁵
Perpendicular	2.2x10 ⁻⁴	1.4x10 ⁻⁵	6.0x10 ⁻⁵	4.0x10 ⁻⁵	2.0x10 ⁻⁵	9.0x10 ⁻⁵	6.0x10 ⁻⁵	3.0x10 ⁻⁵
Transverse								
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>

TECHNOLOGY: Sensor Description

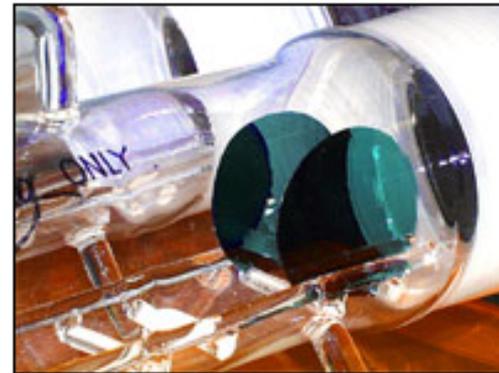
The sensors used in all modern Kulite pressure transducers are dielectrically isolated, silicon-on-silicon devices. This is the fundamental distinction between a Kulite sensor and those employed by most other manufacturers of "silicon" pressure transducers. Kulite sensors consist of **a complex structure of three layers atomically bonded together.**

The **first layer** is of monocrystalline N-type silicon. This layer is micromachined into a mechanical force-summing diaphragm. The thickness of the diaphragm varies with the full-scale pressure range for which it is intended. The thickness is chosen so that this layer will see approximately 350 to 400 micro-inches per inch strain at that full-scale pressure. This is a very conservative level of strain for mono-crystalline silicon.

The **second layer**, which is of silicon di-oxide, is grown right on top of the N-type silicon diaphragm. This layer provides dielectric isolation between the N-type silicon and the P-type silicon of the layer containing the Wheatstone bridge circuit, thus eliminating P-N junctions from the design of the device.

The **third layer** is fusion bonded to the layer of silicon dioxide, at the intermolecular level, through a proprietary, high-temperature process. This layer contains four strain gages of P-type silicon interconnected in a Wheatstone bridge circuit. The strain gages and their interconnections are one continuous integrated circuit of P-type silicon. The individual elements of this circuit are isolated from one another by a field mask of silicon dioxide, which is a continuation of the layer of silicon dioxide separating the layer of N-type silicon from the layer of P-type silicon.

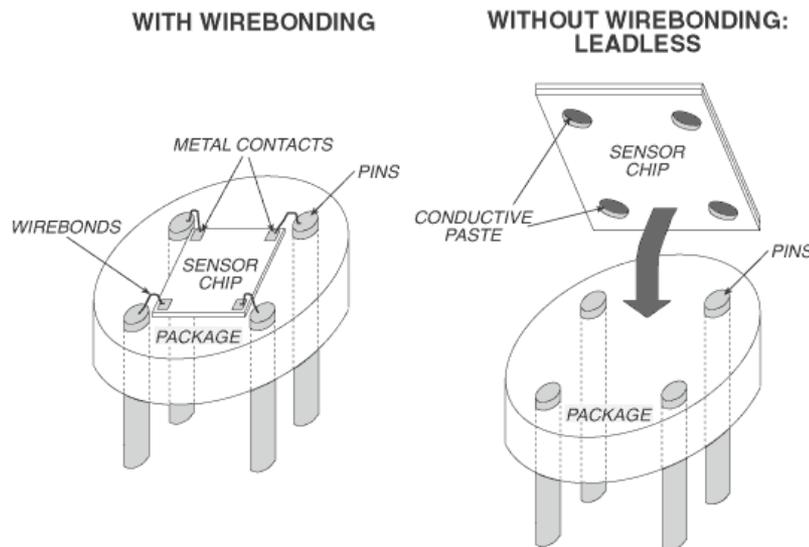
The physical relationship between the locations of the strain gage elements of this third layer and the mechanical diaphragm of the first layer are such that, when pressure is applied, the resulting strain in the diaphragm causes two of the strain gages to go into tension (thereby increasing their resistance) and two of the strain gages to go into compression (thereby decreasing their resistance). The two tension legs are diametrically opposite each other in the Wheatstone bridge schematic. The same is true of the two compression legs. The result is that the applied stress causes an imbalance in the output of the bridge. The magnitude of this imbalance is directly proportional to the magnitude of the stress applied. This is the fundamental operating principle behind all "strain gage" pressure transducers. For the advantages of the Kulite approach to this concept, visit the section of this sight titled [Sensor Benefits](#).



Kulite Leadless Technology - A Description

Historically, the interconnection between the silicon sensor and the rest of the transducer circuit has been accomplished via fine gold wires. The wires are welded to metallized contact pads on the sensor and then to a pin or a printed circuit board elsewhere in the transducer. These wires and their welds are susceptible to failure due to fatigue under conditions of high vibration or rapid pressure cycling. This approach is still employed by all other manufacturers of "silicon" pressure transducers.

In the "leadless" pressure transducer, these fine gold wires - and all the problems associated with them - have been eliminated. The sensor and the header on which it rests are now one monolithic, solid-state device, with gold pins embedded directly in it. Conventional electrical connection is made directly to the back of this sensor-header structure, which can be installed in a wide variety of sensor housings. This allows it to be adapted to a wide variety of applications. Even ultra-miniature pressure transducers based on this technology can be used with any fluid, including conductive fluids, as long as they are not hostile to silicon or glass. They can be used to temperatures as high as 900°F (482°C). For a more detailed description of this technology and its benefits, please visit the section of this site titled [Reference Library](#).



INDUSTRIES: Overview

Kulite provides state-of-the-art transducers to many industries. We are the dominant supplier for many applications and uses, with over four decades of experience in the design of thousands of pressure transducers. It is Kulite's practice to adapt our product to customers requirements - we do not expect you to change your system to fit our transducer - as well as providing catalog designs that cover a range of traditional applications for test and instrumentation.



Aerospace



Automotive



**Industrial
Process**



**Instrumentation
& Measurement**



Marine



Military Systems



**Resource
Exploration/
Production**

Automotive Pressure Sensors

APPLICATION	KULITE P/N	KULITE P/N	APPLICATION	KULITE P/N	KULITE P/N
Aerodynamics	LQ-062	XCL-100	Exhaust System Testing	XTEH-7L-190(M)	WCT-250
	XCQ-062	LQ-125		XTEH-10L-190(M)	WCT-312
	XCL-072	LQ-DC-125	Fuel Pressure	XTL-123B-190(M)	ETM-624-375(M)
	LQ-080	XCQ-152		XTL-173-190(M)	ETM-375(M)
	XCQ-080	EC-2DC		ETM-624-312(M)	HKM-375(M)
XCQ-093		Hydraulics System	ETM-610-312(M)	ETM-624-375(M)	
Air Bag Systems	XTL-123B-190(M)		HKM-375(M)	ETM-614-312(M)	HKM-375(M)
	XTL-123C-190(M)		ETM-375(M)	ETM-621-312(M)	HEM-375(M)
Airspeed	ET-2DC-312(M)		ET-10DC-312(M)	ETM-624-312(M)	ETM-375(M)
	ET-3DC-312(M)		In Cylinder Pressure Measurement	XTEL-CS-190(M)	WCT-250
Brake Pressure/ AntiLock Brake System Testing	XTL-123B-190(M)	ETM-614-312(M)		ETL-CS-190(M)	WCT-312
	XTL-142B-190(M)	ETM-621-312(M)	Intake Manifold	LQ-062	LQ-DC-125
	ETL-173-190(M)	ETM-624-312(M)		XCL-072	XCL-140
	ETL-76A-190(M)	ETM-624-375(M)		LQ-080	XTL-123B-190(M)
	HKM-113-375(M)	ETM-375(M)		XCL-080	ET-5DC-312
HKM-375(M)	ETQ-12-500	XCL-100		ETL-6-312	
ETM-610-312(M)		LQ-125			
Coolant Pressure	XTL-123B-190(M)	ETLR-623-312(M)	Oil Pressure and Temperature	ETL-2T-312(M)	EFL-475
	HKM-375(M)	ETL-624-312(M)		ETL-1T-375(M)	HFL/T-475
	HKM-113-375(M)	ETM-624-312(M)		HKM-1T-375(M)	
	ETM-610-312(M)	ETL-624-375(M)	Steering System Pressure	XTL-123B-190(M)	XTL-139F-190(M)
	ETM-614-312(M)	ETM-624-375(M)		XTL-123C-190(M)	XTL-142B-190(M)
ETM-621-312(M)	ETM-375(M)	Transmission Testing	XTL-140	XTL-140B-190(M)	
Coolant Pressure and Temperature	ETL-2T-312(M)		ETLR/T-624-375(M)	XTL-123B-190(M)	XTL-140C-190(M)
	HKL-1T-375(M)	EFL-475	XTL-123C-190(M)		
ETL-1T-375(M)	HFL/T-475	Dynamometer	ETM-375	DCT-1000	
Engine Oil Pressure	ETQ-12-375(M)		IPTE-1000	ETM-610-312(M)	ETM-624-375(M)
	ETM-614-312(M)	HKM-375(M)	ETM-614-312(M)	HKM-375(M)	
	ETM-621-312(M)	HEM-375(M)	ETM-621-312(M)	HEM-375(M)	
	ETM-624-312(M)	ETM-375(M)	ETM-624-312(M)	ETM-375(M)	
	ETM-370-312(M)		ETM-370-312(M)		

Aircraft Pressure Sensors Applications

AUXILIARY POWER UNIT (APU)

Bleed Air Pressure
Air Inlet Pressure
Main Oil Pressure
P3 Air Pressure
P1 Total Air Pressure
Exhaust Air Pressure
Fuel Filter Delta P Pressure

HYDRAULIC PRESSURE TRANSDUCERS HIGH PRESSURE SEALED GAGE & ABSOLUTE

Actuator Pressure
Accumulator Pressure
Brake Pressure (FDR)
Brake Pressure Anti-Skid
Flap Pressure
Flight Controls Pressure Monitoring
Hydraulic Filters Delta P
Hydraulic Pressure Switch
Hydraulic Pump Pressure
Hydraulic Reservoir
Rudder Actuation
Spoiler Actuation
Landing Gear Pressure
Oleo Pressure & Temperature

PROPULSION / ENGINE

Differential Oil Pressure
Engine Oil, Absolute Pressure
Engine Oil, Gage Pressure
Engine Torque Pressure, Gage
Fuel Filter Pressure
Fuel Pump Pressure
Oil Filter Differential Pressure
Oil Temperature & Pressure
P1 Total Air Pressure, Absolute
P2 Compressor Inlet, Pressure
P2.5 Inlet Pressure, Absolute
P3 Bleed Air Pressure
P3 Compressor Discharge Pressure
Transmission Oil Pressure
Redundant Oil Pressure Delta P
Redundant Fuel Filter Delta P
Starter Air Valve Redundant Pressure

ENVIRONMENTAL CONTROL SYSTEM (ECS)

Air-Conditioning Compressor Discharge Pressure
Air-Conditioning Inlet Pressure Gage & Absolute
Air Duct Differential Pressure
Air Filter Differential Pressure
Cabin Air Pressure Gage & Absolute
De-Ice Hot Air Pressure Switch
De-Ice System Gage Pressure
Oxygen Quantity Pressure Measurement
Oxygen Regulator Pressure
Oxygen, Crew Cabin Pressure
Pneumatic Gage & Absolute Pressure
Potable Water Gage Pressure
Potable Water Level Measurement
Vapor Cooling System Pressure

COMBINATION / DUPLEX

Oil Pressure & Temperature (RTD)
Oil & Fuel Gage Pressure
Oil Pressure & Redundant Pressure
Oil Filter Delta P With Redundant Temperature
Redundant Absolute Oil Pressure
Redundant P3 Air Pressure
Combined Absolute With High Pressure Switch
Oxygen Pressure & Temperature

MISCELLANEOUS PRESSURE TRANSDUCER APPLICATIONS

Tension-Compression Load Cells For Flight Controls
3 Wire Electronic Pressure Switches
Quadruple Duplex Pressure Measurements
TPS Tire Pressure System Transducers
P3 Air Flow Differential Pressure
Oxygen Quantity Measurement
Nitrogen Quantity Measurement
Delta P Low Pressure Filter Pressure
Pitot-Static Air Pressure For UAV

ELECTRONIC (3W) PRESSURE SWITCHES

Low Oil Pressure Delta P Switch
De-Ice Hot Air Pressure Switch
Fuel Pressure Switch
Hydraulic Pressure Switch
Bleed Air Pressure Switch
Thrust Reverser Pressure Switch



Kulite Gas Turbine Transducer Applications

PROPULSION / ENGINE

Engine Oil, Absolute Pressure
Engine Oil, Gauge Pressure
Oil Filter Delta Pressure
Fuel Pump Pressure
Fuel Filter Delta Pressure
P1 Total Air Absolute Pressure
P2 Compressor Inlet Air Pressure
P2.5 Intermediate Air Pressure
P3 Compressor Discharge Air
P5 Engine Exhaust Air Pressure
P125 Fan Air Pressure
Compressor Air Bleed Plenum
Turbine Cooling Air Pressure
Transmission Oil Pressure - Turboshaft
Engine Torque Pressure - Turboshaft
Redundant Oil Pressure
Redundant Fuel Pressure
Redundant Fuel Filter Delta Pressure
Redundant Pressure and Temperature
Starter Air Valve Redundant Pressure
Exhaust Air Pressure

AUXILIARY POWER UNITS (APU)

Main Oil Pressure
P1 Total Air Pressure
P3 Compressor Discharge Pressure
Filter Differential Pressure
Exhaust Air Pressure

POWER GENERATION TURBINES

Air and Fuel Pressures
Compressor Discharge Pressure
Turbine Differential Pressure
Triplex Redundant Transducers
Combination Absolute and Differential
Combustion Instability Transducer

TURBINE TEST / DEVELOPMENT

Small Size, High Frequency Transducers
Acoustics/Noise Sensors
Airfoil Flutter/Vibration Measurements
Surface Mount Sensors (Flat Packs)
Ultra-High Temperature Pressure Sensors
Combustion Instability Measurement
Augmentor Screech and Rumble Sensors
DC and AC Dual Output Transducers
G-Insensitive Pressure Transducers
Ultra High G-Load Applications
High Accuracy Amplified or Unamplified
Digitally Compensated Transducers
Active Engine Control Transducers
Semi-Infinite-Tube Transducers (SIT)
Pitot-Static Pressure Probes
Wireless Output Pressure Sensors

COMBINATION / MULTI-FUNCTION / REDUNDANT

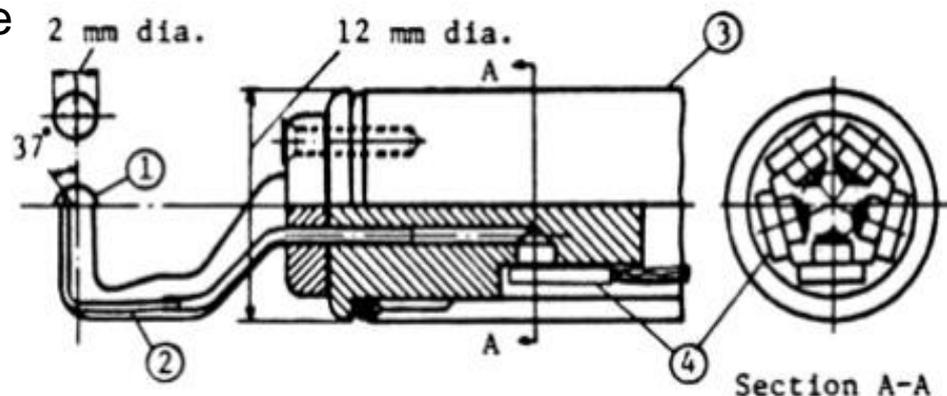
Multiple Absolute and Delta Pressures
Pressure and Temperature (RTD)
Pressure and Pressure Switch Combo
Multiple Redundant Combos

TECHNOLOGY / RESEARCH

Small Size Sensors (1.5mm Diameter)
High Frequency Response
Airfoil Surface Pressures (Flat Packs)
Pitot-Static Pressure Probes
Ultra High Temperature (Cooled and Uncooled)
Flow Angle Probes
Semi-Infinite Tube Transducers (SIT)
Active Flow Control Applications
Ultra High g-Load Applications

Effetti dinamici dei tubi di collegamento –linee di pressione

- ❑ Per migliorare la risposta dei sensori la soluzione più efficace sarebbe montarli a sfioro sulla superficie, andando così a misurare la pressione esterna direttamente.
- ❑ Tale soluzione spesso non è praticabile:
 - Risoluzione spaziale vs dimensione dei sensori
 - Accessibilità della superficie
 - Ambiente di misura
- ❑ I sensori sono spesso installati in posizione remota rispetto alla superficie dove si effettua la misura di pressione, collegati all'ambiente di misura da condotti calibrati di una data dimensione e geometria
- ❑ Tale connessione influenza la risposta in frequenza del sistema di misura



Esempio: sonda dinamica a 5 fori (sviluppata da Matsunaga, 1978)

I sensori montati nel corpo della sonda rilevano la pressione esterna attraverso appositi condotti. Proprio le dimensioni di questi ultimi e della camera che si trova al loro sbocco influenzano la risposta in frequenza del sistema.

Effetti dinamici dei tubi di collegamento –linee di pressione

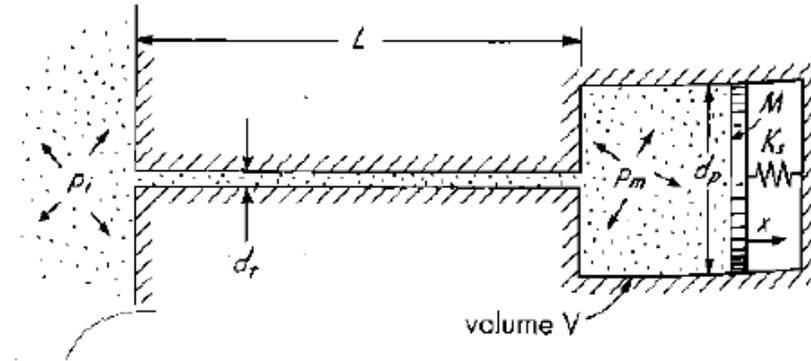
- ❑ Fluido è un gas
 - ❖ comprimibilità del gas è l'elemento elastico preponderante
 - ❖ Il volume della cavità può essere assunto costante
- ❑ Sistema a parametri concentrati
 - ❖ Bassa frequenza, L piccola rispetto a

$$\lambda = c/f \gg L$$

- ❑ Piccole variazioni di pressione, fenomeni viscosi considerati tramite le leggi del moto stazionario
- ❑ p_m e p_i sono le perturbazioni rispetto allo stato medio del fluido,

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f(t)$$

$$f(t) = p_i \frac{\pi d_t^2}{4}$$



M : massa diaframma

K_s : rigidezza del trasduttore

d_p : diametro del pistone

V : volume

p_m : pressione misurata

p_i : pressione reale del flusso

d_t : diametro del tubo.

$x(t)$: spostamento del fluido nella cavità

$f(t)$: forza applicata dalla pressione esterna

Effetti dinamici dei tubi di collegamento –linee di pressione

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f(t)$$

Il termine inerziale è associato alla massa di fluido che viene spostata:

$$M = \frac{\rho \pi d_t^2 L}{4}$$

Il termine di rigidità deriva dalla relazione tra la variazione di pressione all'interno della cavità e la variazione del volume dell'aria dovuta ad uno spostamento Δx , nell'ipotesi di compressione adiabatica del fluido:

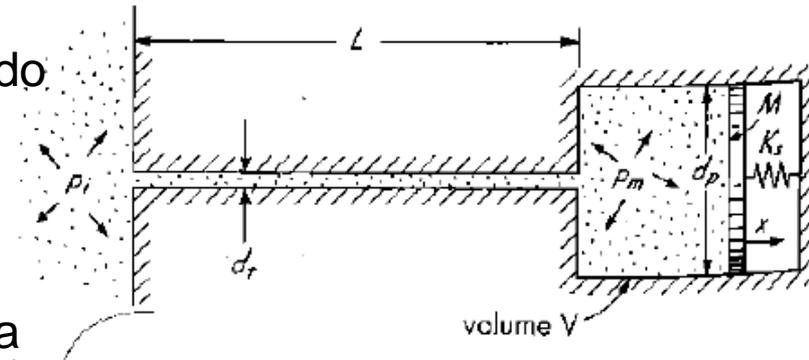
$$\Delta p = p_m = -E_a dV/V = E_a \frac{\pi d_t^2}{4V} \Delta x$$

dove E_a è il modulo di rigidità adiabatica del gas,

$$E_a = -\frac{dp}{\frac{dV}{V}} = c^2 \rho.$$

Il termine di proporzionalità tra la **forza** $\Delta p \frac{\pi d_t^2}{4}$ e lo

spostamento è quindi: $K = \frac{\pi^2 d_t^4 E_a}{16V}$.



M : massa diaframma

K_s : rigidità del trasduttore

d_p : diametro del pistone

V : volume

p_m : pressione misurata

p_i : pressione reale del flusso

d_t : diametro del tubo.

$x(t)$: spostamento del fluido nella cavità

$f(t)$: forza applicata dalla pressione esterna

Effetti dinamici dei tubi di collegamento –linee di pressione

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f(t)$$

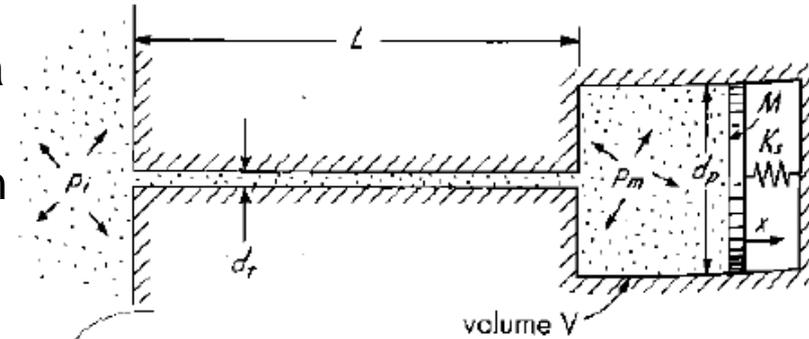
Il termine di smorzamento si può ricavare dalla legge di Hagen-Poiseuille, secondo la quale in un condotto a sezione circolare dove scorre un fluido viscoso in regime laminare, a parità di altri parametri, la resistività idraulica aumenta inversamente al quadrato del raggio:

$$u_{x,av} = \frac{-d_t^2}{32\mu} \frac{dp}{dx}$$

$$\text{da cui, se } \frac{dp}{dx} \approx \frac{\Delta p}{L} \implies \Delta p \frac{\pi d_t^2}{4} = -\frac{32\mu L}{d_t^2} \frac{\pi d_t^2}{4} \implies$$

$$C = 8\pi\mu L$$

Dove μ è la viscosità dinamica ed L la lunghezza del condotto di comunicazione con la cavità di volume V .



M : massa diaframma

K_s : rigidezza del trasduttore

d_p : diametro del pistone

V : volume

p_m : pressione misurata

p_i : pressione reale del flusso

d_t : diametro del tubo.

$x(t)$: spostamento del fluido nella cavità

$f(t)$: forza applicata dalla pressione esterna

Effetti dinamici dei tubi di collegamento –linee di pressione

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f(t)$$

Tale equazione nello spostamento può essere ricondotta ad una analoga nella pressione misurata dal sensore, p_m , introducendo il legame tra queste due grandezze

Si ottiene l'equazione oscillante:

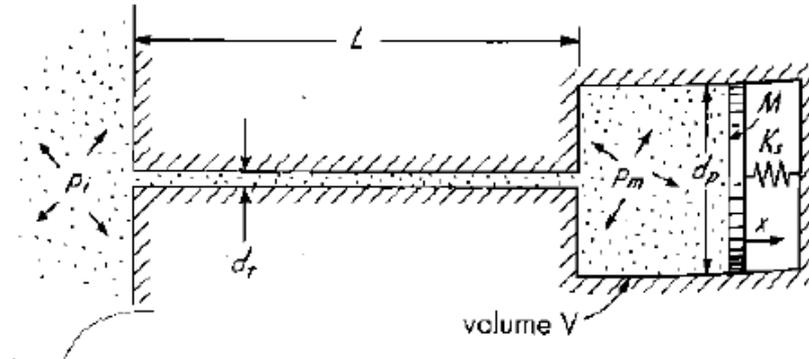
$$\frac{4L\rho V}{\pi E_a d_t^2} \ddot{p}_m + \frac{128\mu LV}{\pi E_a d_t^4} \dot{p}_m + p_m = p_i$$

ovvero:

$$m\ddot{p}_m + c\dot{p}_m + p_m = p_i(t)$$

dove:

$$m = \frac{4LV\rho}{\pi E_a d_t^2} \quad \text{e} \quad c = \frac{128\mu LV}{\pi E_a d_t^4}$$



M : massa diaframma

K_s : rigidezza del trasduttore

d_p : diametro del pistone

V : volume

p_m : pressione misurata

p_i : pressione reale del flusso

d_t : diametro del tubo.

$x(t)$: spostamento del fluido nella cavità

$f(t)$: forza applicata dalla pressione esterna

Effetti dinamici dei tubi di collegamento – linee di pressione

$$mp_m'' + cp_m' + p_m = p_i(t)$$

Supponendo una forzante armonica pura, a regime si avrà $p_m = P_m e^{j\omega t}$, e la funzione di trasferimento tra la pressione esterna e la pressione misurata è:

$$\frac{p_m}{p_i} = \frac{1}{1 + j\omega c - \omega^2 m}$$

$$\left| \frac{p_m}{p_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2 m)^2 + \omega^2 c^2}} \quad \angle \left(\frac{p_m}{p_i} \right) = -\arctg \frac{\omega c}{1 - \omega^2 m}$$

La risposta in frequenza, inizialmente in fase rispetto a p_i ed unitaria, cresce in ampiezza fino ad un massimo che si ottiene in corrispondenza della pulsazione di risonanza:

$$\omega_r = \omega_n \sqrt{1 - 2\xi^2} \quad \text{dove} \quad \omega_n = \frac{d_t c}{2} \sqrt{\frac{\pi}{LV}}$$

ed il cui valore dipende dal fattore di smorzamento:

$$\xi = \frac{32\mu}{cd_t^3 \rho} \sqrt{\frac{LV}{\pi}}$$

Effetti dinamici dei tubi di collegamento – linee di pressione

$$mp_m'' + cp_m' + p_m = p_i(t)$$

$$\omega_r = \omega_n \sqrt{1 - 2\xi^2} \approx \omega_n = \frac{d_t c}{2} \sqrt{\frac{\pi}{LV}}$$

- ❑ La pulsazione di risonanza:
 - cresce con il diametro del condotto di collegamento d_t e con la velocità del suono nel mezzo, c
 - decresce all' aumentare della lunghezza del condotto e del volume della cavità nella quale è posto il sensore di pressione.
- ❑ Dato che la risposta del sensore si mantiene in fase per pulsazioni della pressione esterna inferiori a quella di risonanza, che delimita quindi il campo di linearità dello strumento, per realizzare una sonda con un'alta risposta in frequenza sarà necessario disporre di volumi limitati delle cavità interne e linee di pressione brevi rispetto al diametro, in quanto questi elementi agiscono come dei filtri passa-basso rispetto alle pressioni lette.
- ❑ Per pulsazioni della pressione esterna superiori a quella di risonanza la risposta in ampiezza tende a zero, e la pressione letta dal sensore risulta sfasata rispetto alla forzante.