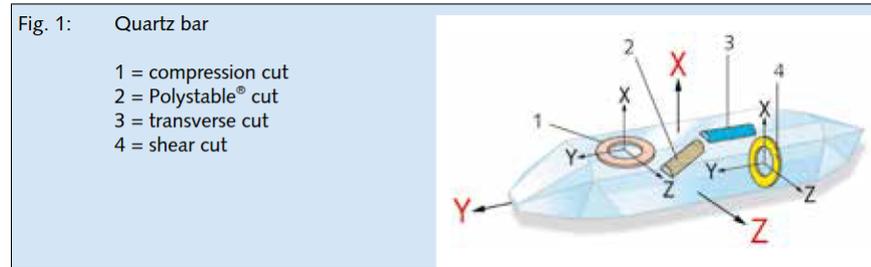
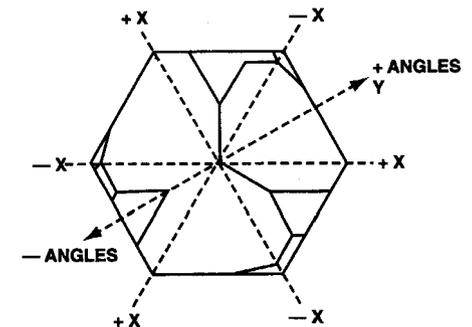
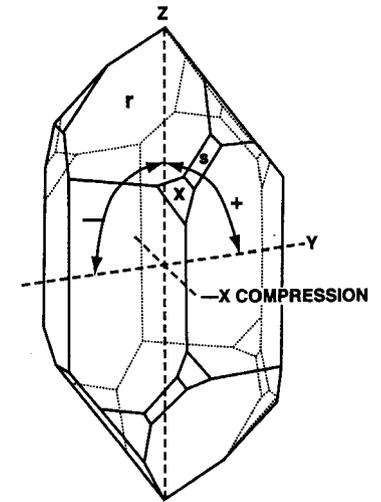


Trasduttori piezoelettrici



L'effetto piezoelettrico fu scoperto da Jaques e Pierre Curie nel 1880 ed è una caratteristica di certi cristalli naturali (quarzo, tormalina...) o sintetici (solfato di litio, ammonio di-idrogenato fosfato...) , di ceramiche ferroelettriche polarizzate (titanato di bario, zirconato titanato di piombo PZT...) e di particolari film di polimeri, che permette loro di sviluppare una carica quando vengono deformati elasticamente. E' un fenomeno di deformazione reversibile e si verifica su scale dell'ordine dei nanometri.

Si definisce piezoelettricità una polarizzazione elettrica prodotta da sforzi meccanici in determinate classi di cristalli, che è proporzionale allo sforzo stesso ed ha un segno direttamente o inversamente variabile con essi. Tale effetto è definito come **effetto piezoelettrico diretto** .



Inoltre gli stessi materiali rispondono con la produzione di uno sforzo, che si palesa con una variazione dimensionale, quando vengono sottoposti ad una polarizzazione elettrica. In questo caso si parla di **effetto piezoelettrico inverso** ed è un secondo aspetto della stessa proprietà del materiale (esempi applicativi: sistemi sonar per l'esplorazione attraverso rilievi acustici, strumenti di prova industriali non distruttivi di tipo ultrasonico, microattuatori...) .

L'**assenza di un centro simmetria** è condizione necessaria affinché si manifesti la piezoelettricità, assente in materiali conduttori e strutturalmente simmetrici.

In un **cristallo**, questa carica si manifesta quando un'azione meccanica provoca la **comparsa di un dipolo elettrico in ciascuna molecola**, spostando il centro delle cariche positive e negative. La rottura dell'equilibrio elettrostatico produce la polarizzazione.

Il cristallo deformato si comporta come un condensatore a cui è applicata una differenza di potenziale. Se le due facce vengono collegate ad un circuito elettrico viene generata una corrente.

Natural Crystals



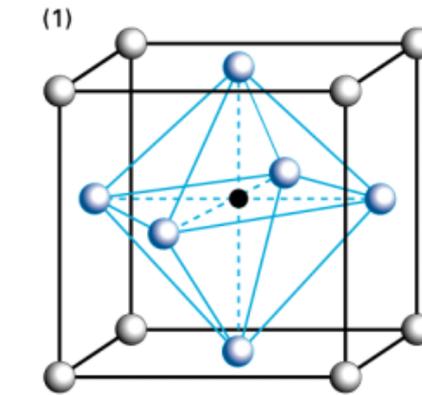
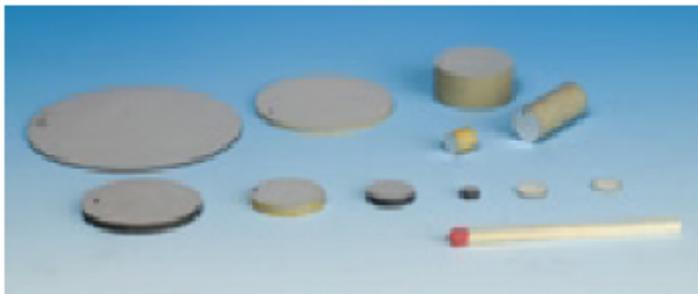
Quartz



Tourmaline

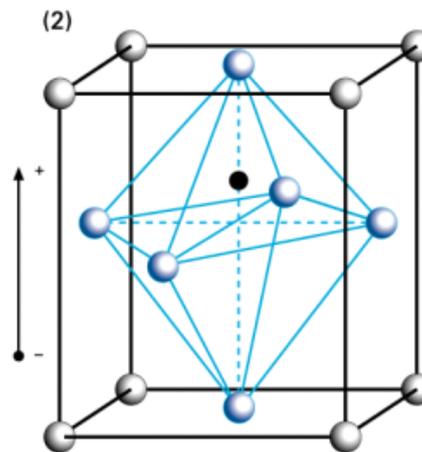


Quindi, a causa della loro naturale struttura asimmetrica, materiali cristallini, come il quarzo, presentano l'effetto piezoelettrico senza la necessità di alcun tipo di trattamento, mentre le **ceramiche piezoelettriche** (come ad esempio il titanato di bario o lo zirconato titanato di piombo-PZT) devono essere **artificialmente polarizzate** per mezzo di un intenso campo elettrico esterno, il cui valore ne influenza fortemente la sensibilità.

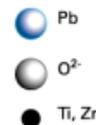


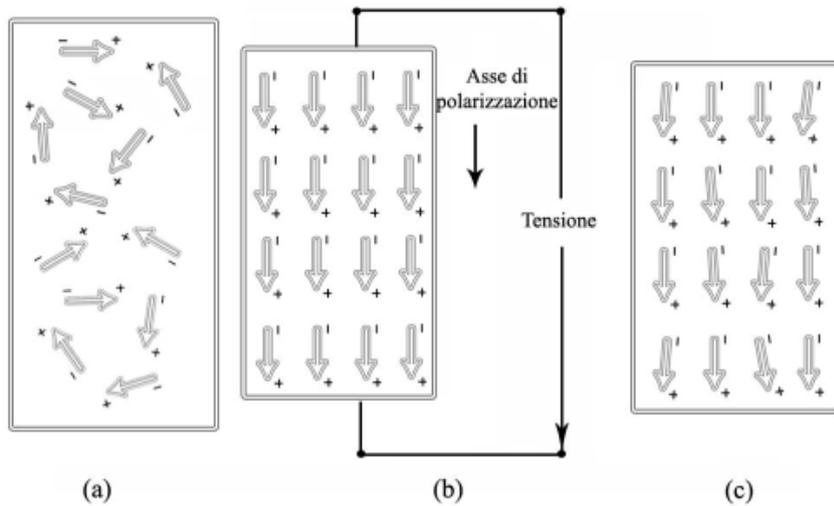
- Cella elementare di ceramica piezoelettrica:

a) configurazione cubica al di sopra della temperatura di Curie;



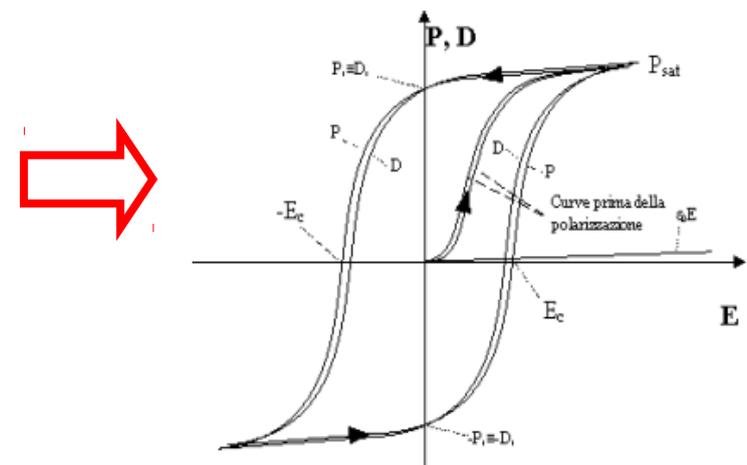
b) configurazione tetraedrica al di sotto della temperatura di Curie





Attraverso un processo di miscelazione di materiali ferroelettrici si ottengono delle paste in cui i singoli microcristalli sono ferroelettrici e possiedono una spontanea polarizzazione. Tuttavia la combinazione disordinata di questi microcristalli in una polvere di varia composizione e granulometria non possiede un momento di dipolo elettrico rilevabile a livello macroscopico.

In particolare, queste ceramiche presentano, in modo analogo ai materiali ferromagnetici, la possibilità di essere polarizzate permanentemente. In sostanza esse si possono schematizzare come costituite da zone aventi polarizzazione spontanea, che possono essere **parzialmente orientate tramite l'applicazione di un campo elettrico esterno**. Se si graficizza la polarizzazione elettrica del materiale in funzione di un campo elettrico variabile si ottiene un ciclo di isteresi completo. Quello che conta ai fini della piezoelettricità è la **polarizzazione residua** che si ha alla rimozione del campo elettrico esterno.



Condizione necessaria affinché la polarizzazione abbia successo, è il **raggiungimento della temperatura di Curie** durante il processo di esposizione al campo elettrico e il successivo raffreddamento del materiale, sempre in presenza del campo. Così facendo, i domini tendono ad allinearsi nella direzione più vicina a quella del campo, producendo un momento di dipolo risultante ed un allungamento del pezzo nella stessa direzione.

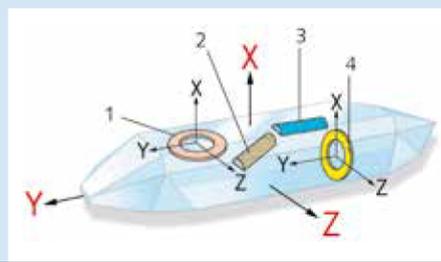
Dopo la rimozione del campo esterno, i dipoli non sono più in grado di tornare nella originaria posizione casuale, ma risultano come congelati in una direzione preferenziale. Se viene applicata una forza esterna di trazione o compressione in grado deformare elasticamente il pezzo, si ottiene una variazione nel momento di dipolo, che induce una tensione tra gli elettrodi, opportunamente realizzati sulle superfici normali all'asse di polarizzazione.

La temperatura di Curie è la **temperatura sopra la quale un materiale perde le sue proprietà ferroelettriche**, quindi questo limita la temperatura massima alla quale questo materiale può essere utilizzato.





Fig. 1: Quartz bar
 1 = compression cut
 2 = Polystable® cut
 3 = transverse cut
 4 = shear cut



Significant Material Properties (Compression)

Piezoelectric Material	Charge Coefficient	Elastic Constant	Relative Dielectric Constant	Curie Temperature	Temperature coefficient of sensitivity
Quartz	2.31 pC/N	86.7 GN/m ²	4.54	573 °C	-0.03 %/°C
Tourmaline	1.93 pC/N	91.8 GN/m ²	7.00	600–800 °C*	-0.02 %/°C
PZT	330 pC/N	66.6 GN/m ²	1500	350 °C**	0.13 %/°C

* Varies significantly

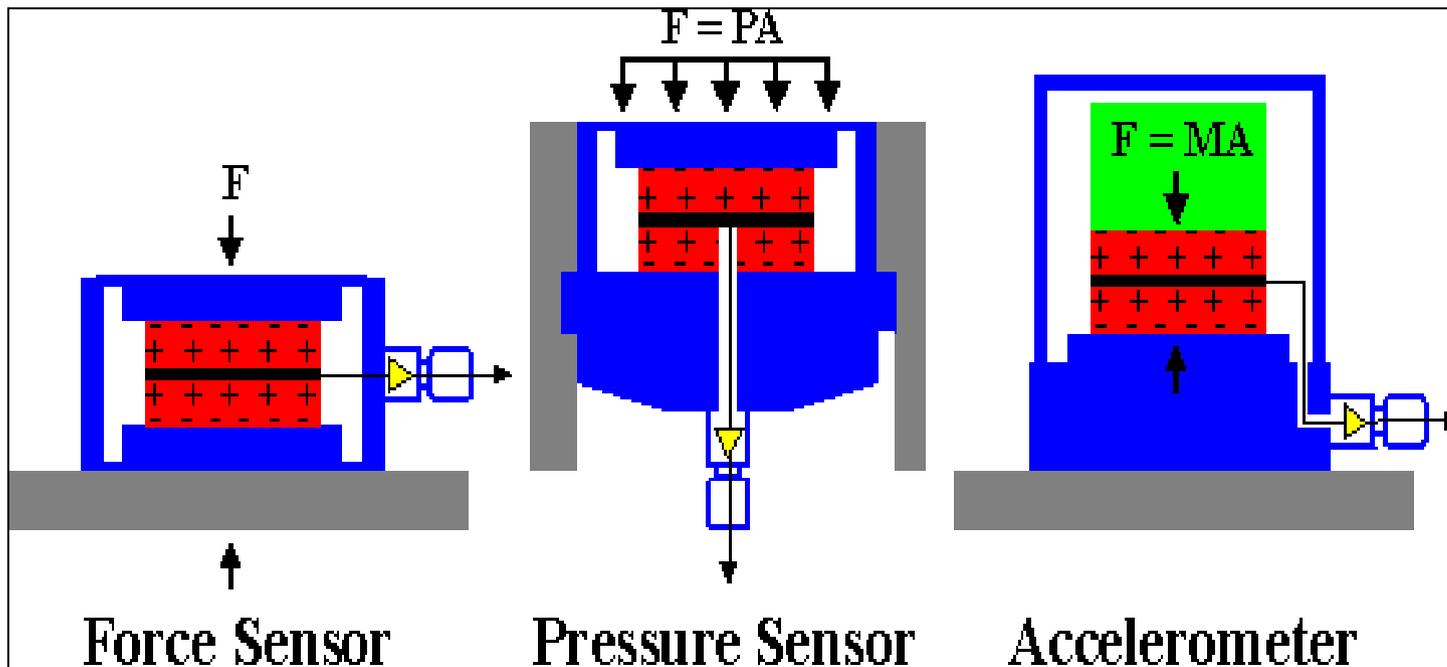
** Higher rated options available with lower charge coefficients

Se si utilizzano cristalli naturali come il quarzo, scegliendo la direzione di taglio nel monocristallo con una certa orientazione, si può sfruttare l'effetto piezoelettrico nella realizzazione di trasduttori di forza accelerazione e pressione. In particolare, questo materiale presenta caratteristiche vantaggiose quali:

- elevata rigidità e resistenza meccanica, che garantiscono piccole deformazioni elastiche durante la compressione;
- velocità di risposta (prontezza)
- eccellente linearità a fronte di un ampio range di carico;
- resistenza allo shock termico (con opportune protezioni)

-Hanno ampia applicazione nella misura di urti, vibrazioni, pressioni/forze ad elevata dinamica, ma non forniscono alcuna uscita in risposta a sollecitazioni costanti.

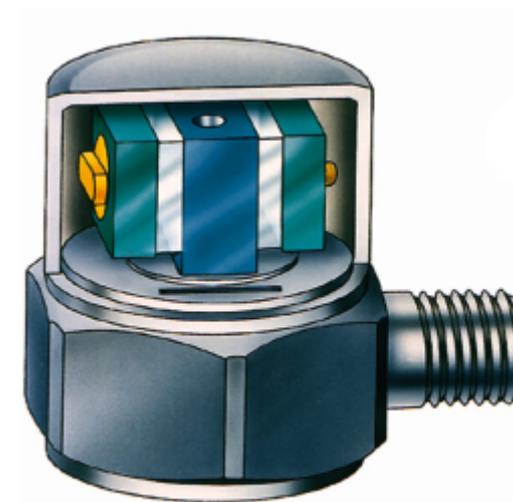
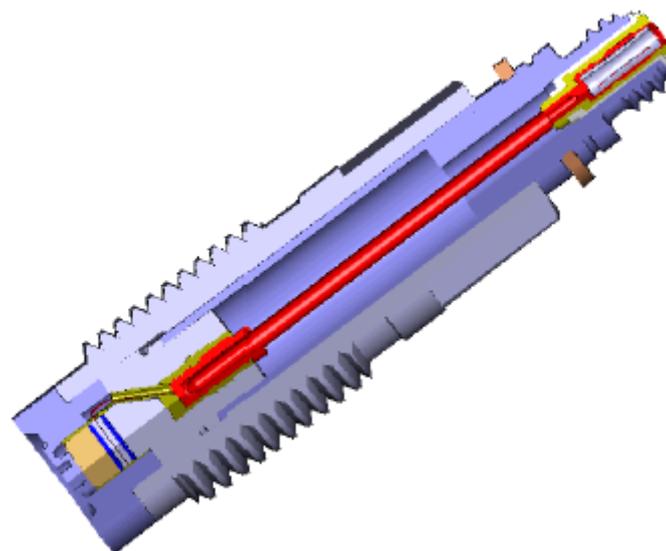
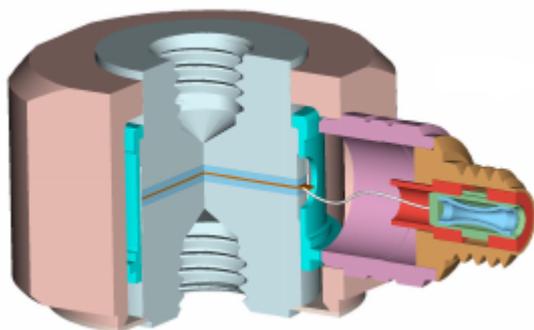
In un **accelerometro piezoelettrico**, per esempio, una massa è collegata ad un cristallo piezoelettrico che a sua volta è connesso alla struttura (case) dell'accelerometro. Quando il corpo dell'accelerometro è soggetto a vibrazione la massa si oppone per inerzia e comprime il cristallo generando delle cariche. Questa forza di compressione per la legge di Newton $F=ma$ risulta proporzionale all'accelerazione a cui è soggetto il corpo.



Sensibilità:
pC/N o mV/N

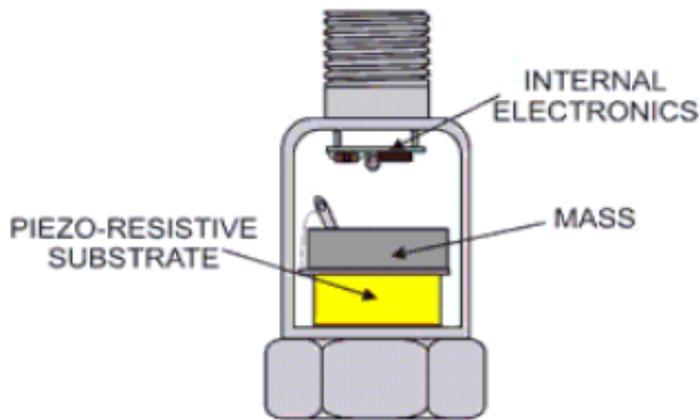
Sensibilità:
pC/bar o
mV/bar

Sensibilità:
pC/m/s² o
mV/m/s²



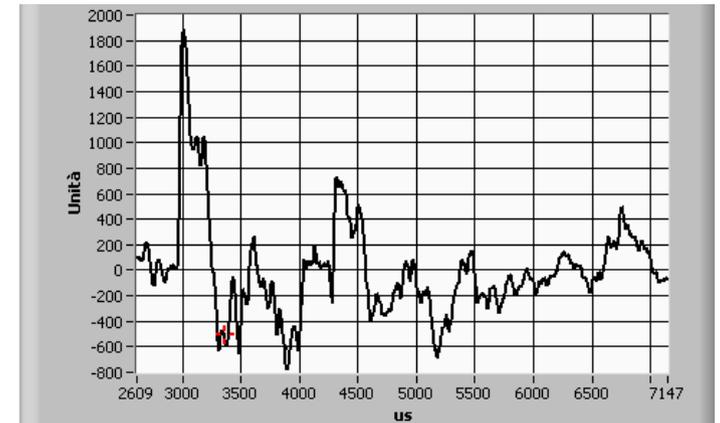
Ceramic Crystals	Quartz Crystals
Man made piezo electric crystals	Natural piezo electric crystals
Higher output sensitivity	Lower output sensitivity
Less expensive	More expensive
Higher pyro-electric effect at elevated temperatures	Lower pyro-electric effect at elevated temperatures
Higher crystal decay rates at elevated temperatures	No crystal decay rates with time or temperature
Lower temperature of operation	Higher temperature operation

Accelerometro piezoelettrico a compressione - "single ended"

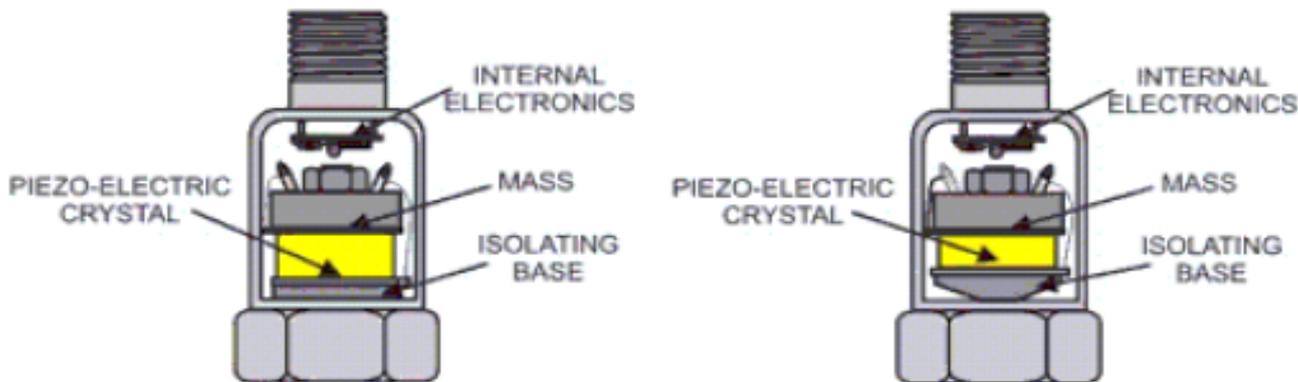


A single ended compression accelerometer

In questa tipologia il cristallo piezoelettrico è fissato alla base dell'accelerometro e la massa sismica è montata sul cristallo.



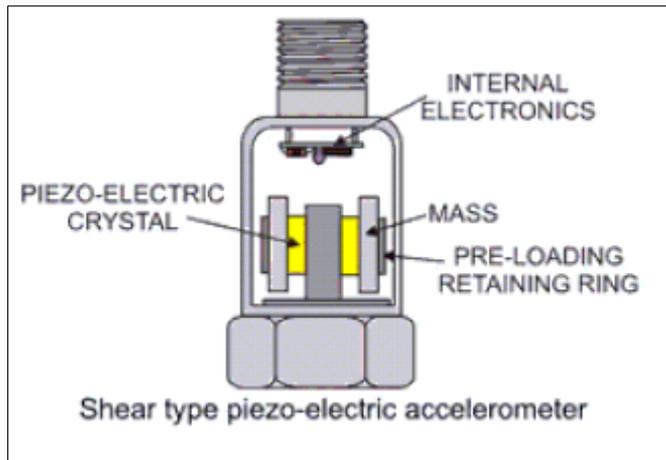
Accelerometro piezoelettrico a compressione isolato



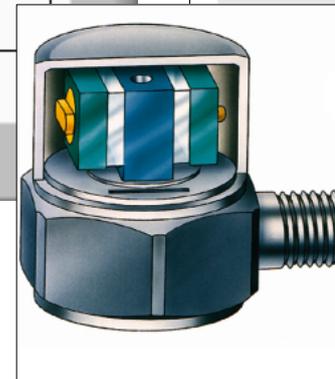
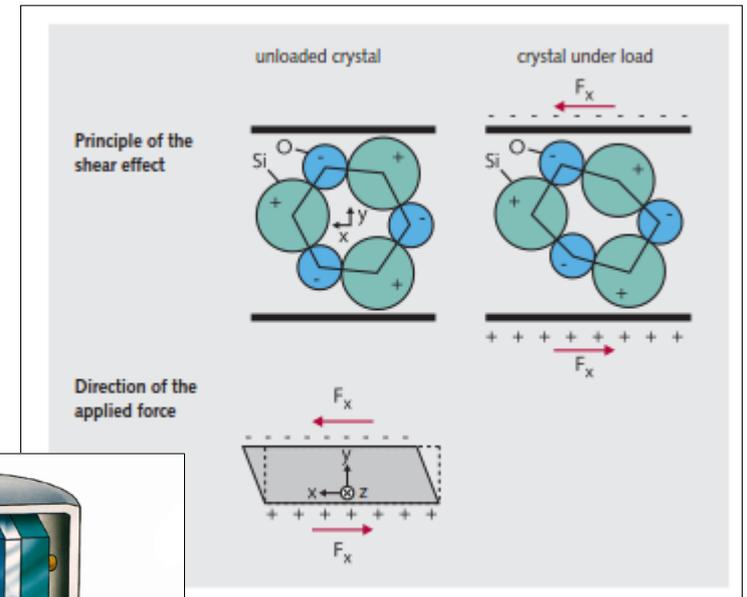
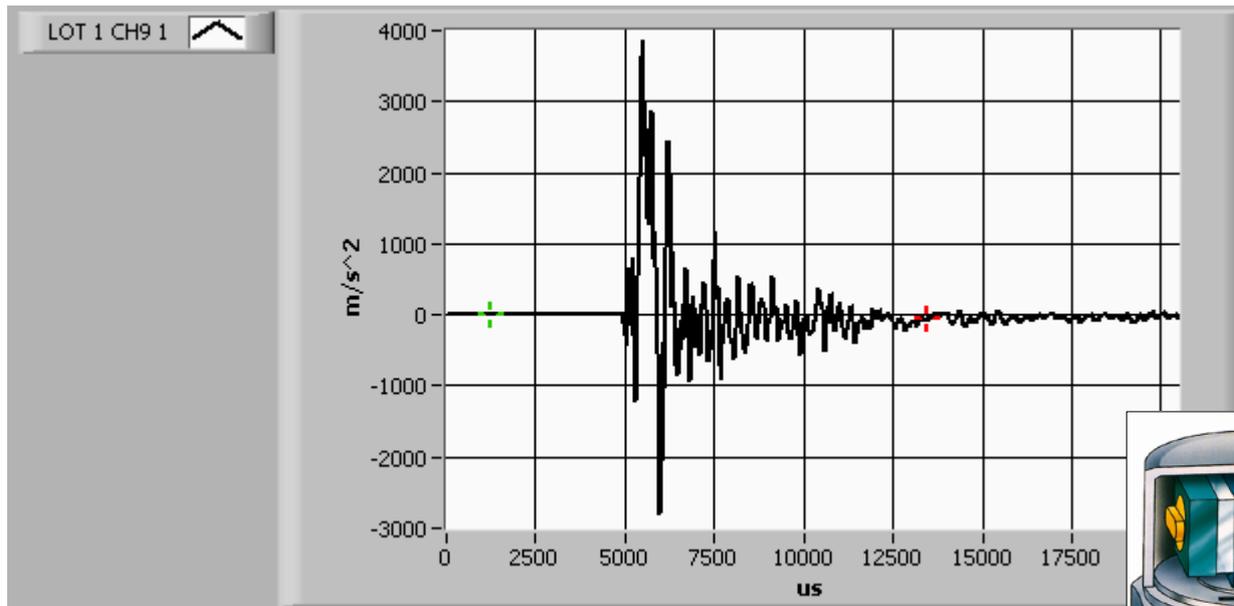
Isolated compression accelerometers

La tipologia single-ended può essere sensibile alla deformazione della base di appoggio, quindi, per limitare il problema il cristallo viene isolato dalla base producendo un appoggio su una rondella oppure minimizzando l'area di contatto tra piezo e base.

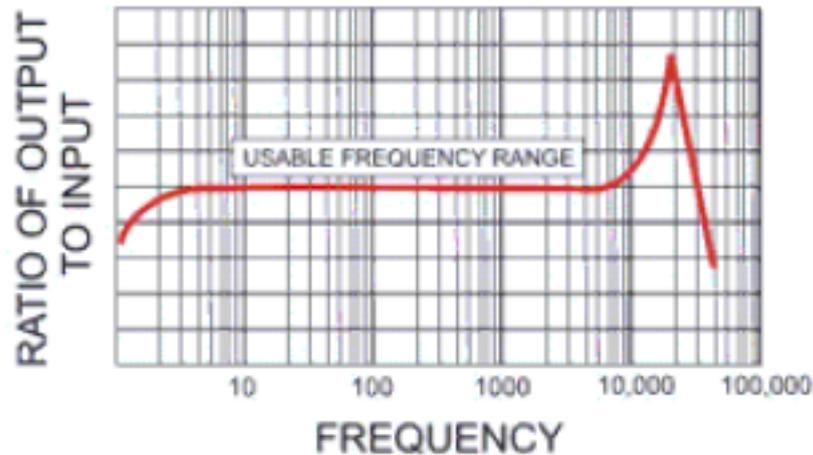
Accelerometro piezoelettrico a taglio



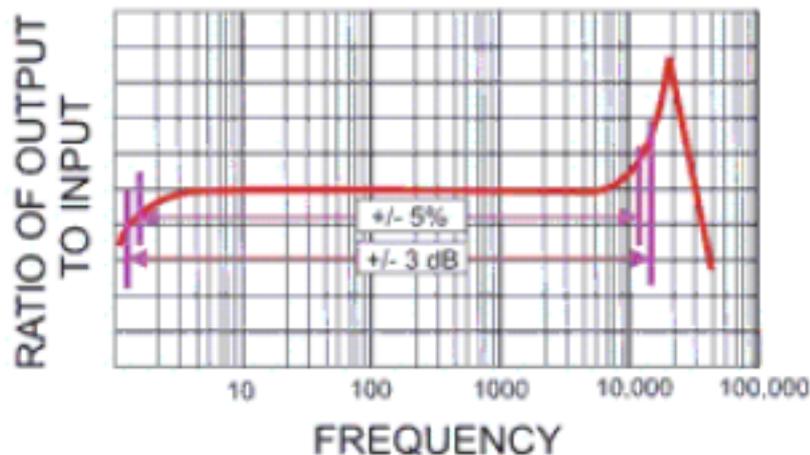
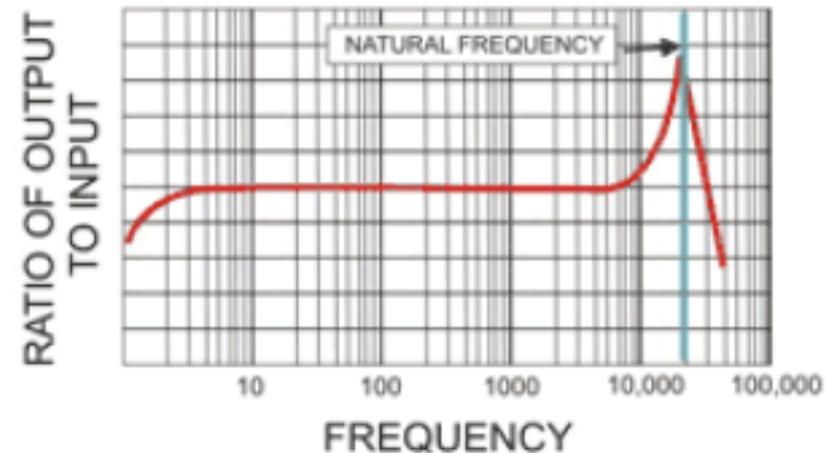
In un accelerometro piezoelettrico a taglio la massa sismica sollecita il cristallo a taglio anziché a compressione. Vengono utilizzati in applicazioni in cui si verificano importanti distorsioni della base dovute a transienti termici oppure ad una flessibilità notevole della base stessa.



Range di frequenze utili trasduttori piezoelettrici



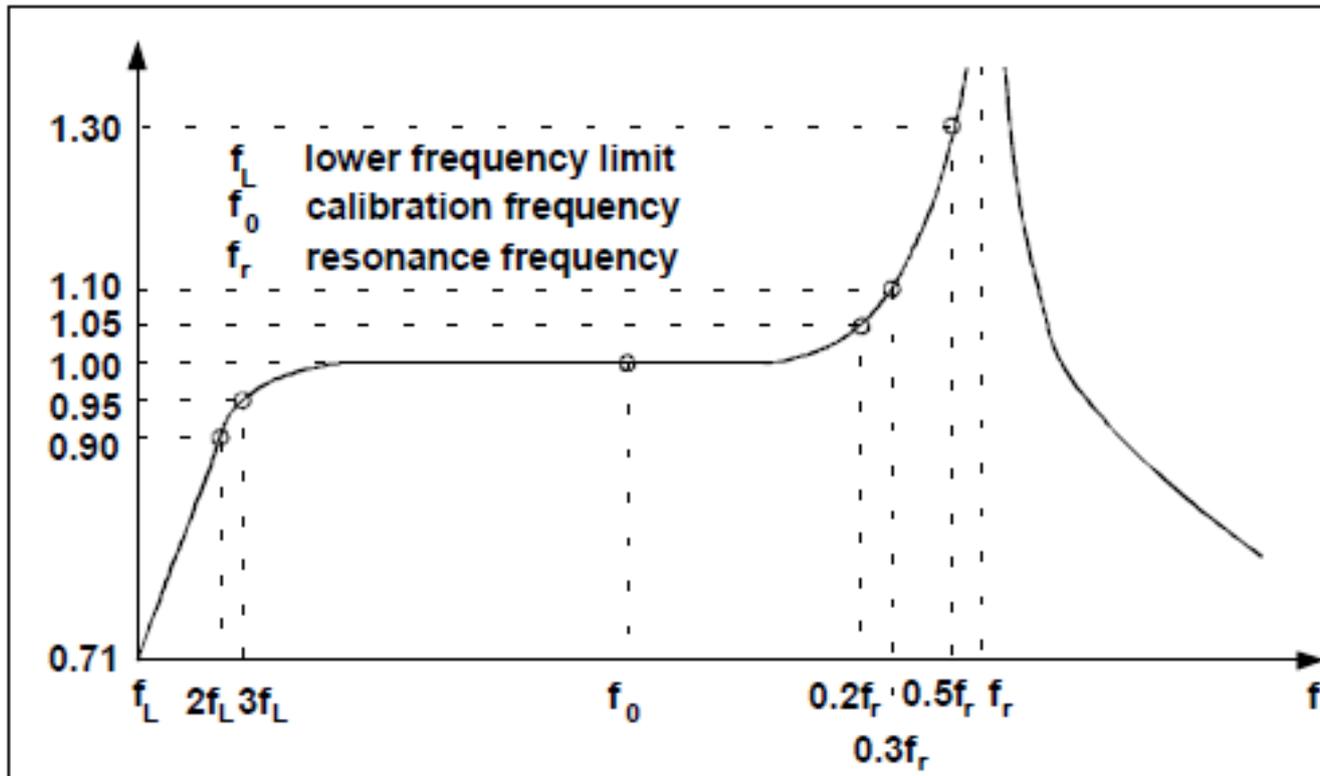
Typical Piezo-electric frequency response curve



$$f_N = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}$$

f_N = Natural frequency
 K = Stiffness
 M = Mass

La parte utilizzabile della risposta in frequenza è quella piatta che va fino circa 1/3-1/2 della frequenza propria del sensore. Viene anche specificata indicandola come la parte di curva che sta tra il “roll off” del 5/10% o +/- 3 dB.

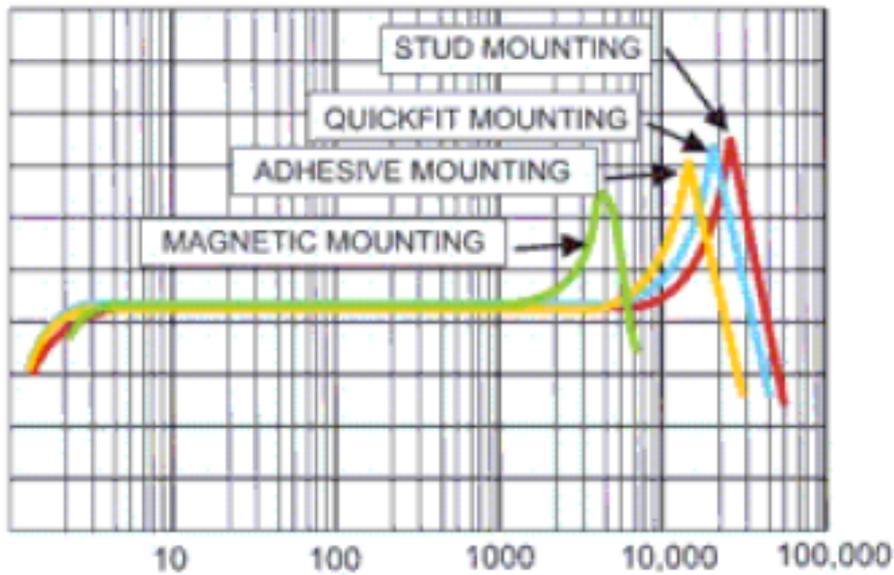


Presentano ampi segnali di tensione in uscita a fronte di ridotte deformazioni, piccole dimensioni, ottima linearità, ampia dinamica di lavoro e frequenze proprie molto alte (caratteristica necessaria per ottenere misure accurate di fenomeni impulsivi).

In genere non è previsto alcuno smorzamento (il fabbricante non lo riporta nelle caratteristiche tecniche e viene considerato nullo al più pari a 0.01), fatto accettabile in quanto la frequenza propria è molto elevata.

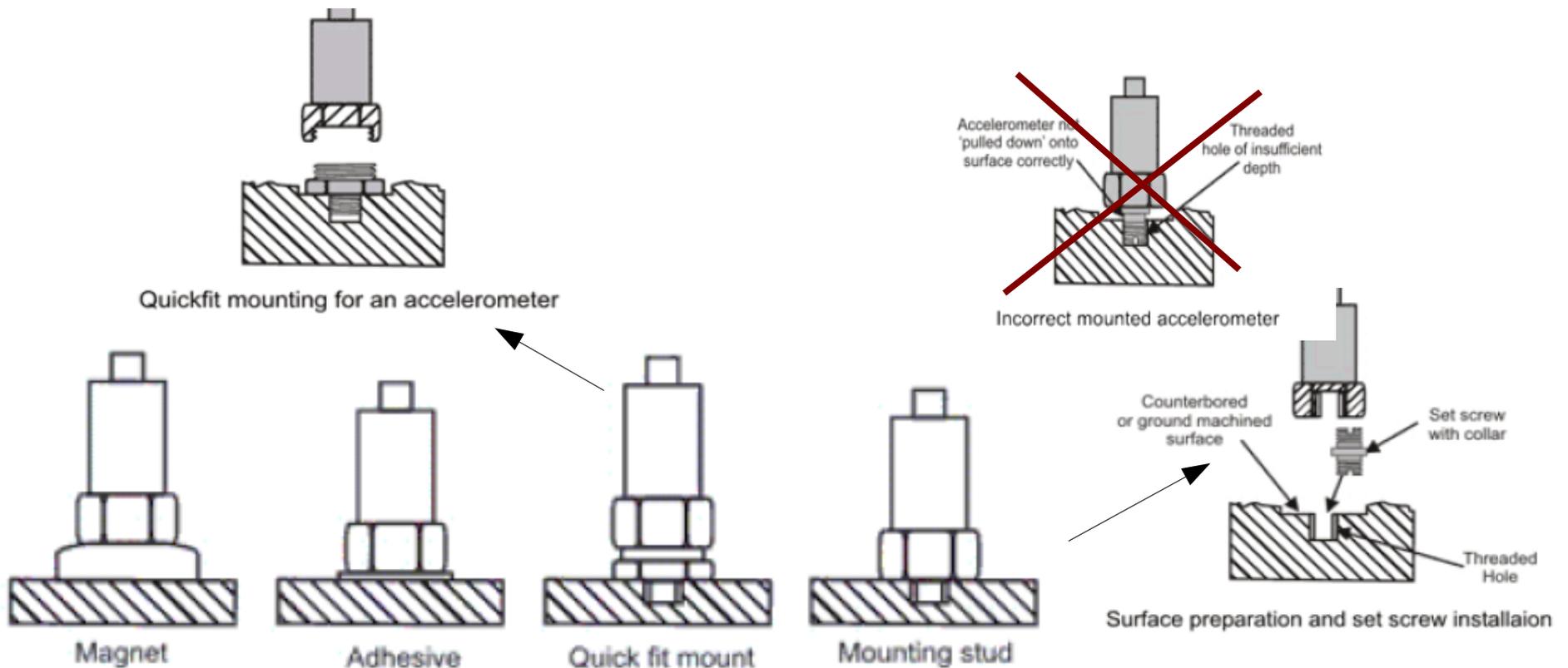
Il range di lavoro è circa: $3/\tau < \omega < 0.2\omega_n$ dove τ è dato dalla costante di tempo del circuito RC equivalente.

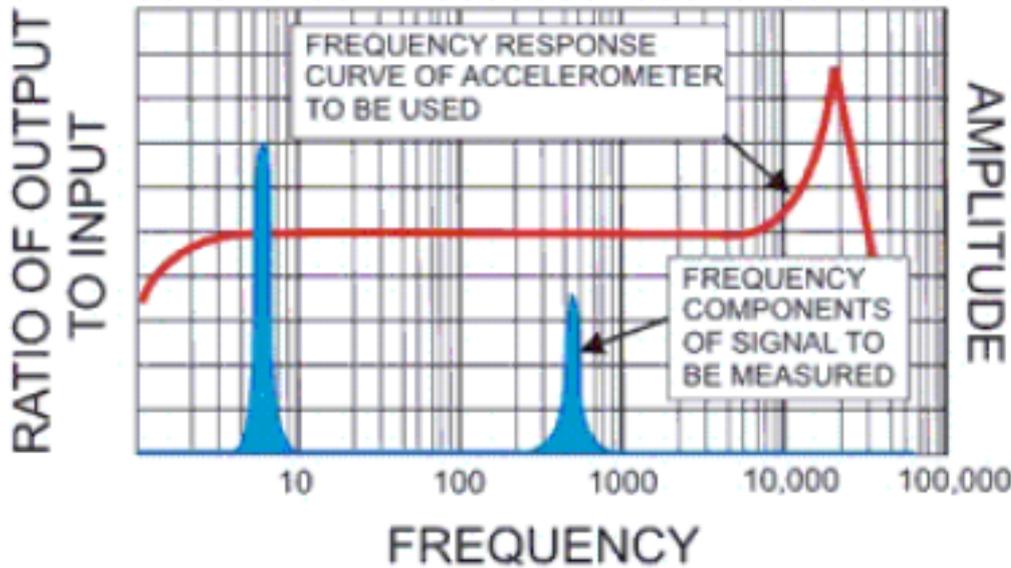
Frequenza propria del trasduttore montato



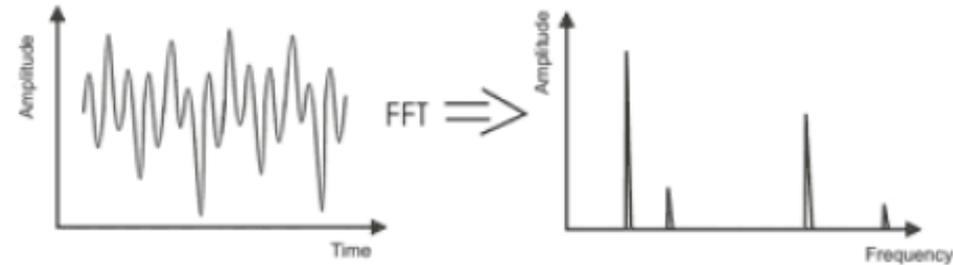
Criticità nel montaggio:

- secondo le specifiche tecniche del costruttore (perni filettati, colla, cera, fissaggi magnetici...) per assicurare che le prestazioni ottenute dall'accelerometro siano conformi alle caratteristiche tecniche pubblicate
- gli accelerometri per shock siano montati preferibilmente con una vite (stud), secondo le caratteristiche costruttive, su una superficie piana, pulita e con buona finitura superficiale.

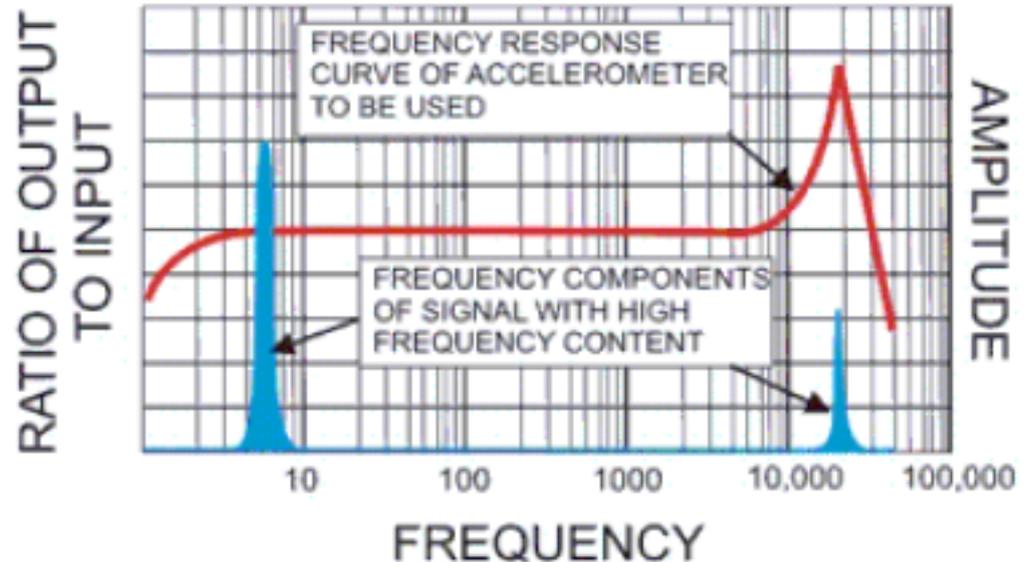




Natural frequency sufficiently high to capture all frequencies in signal

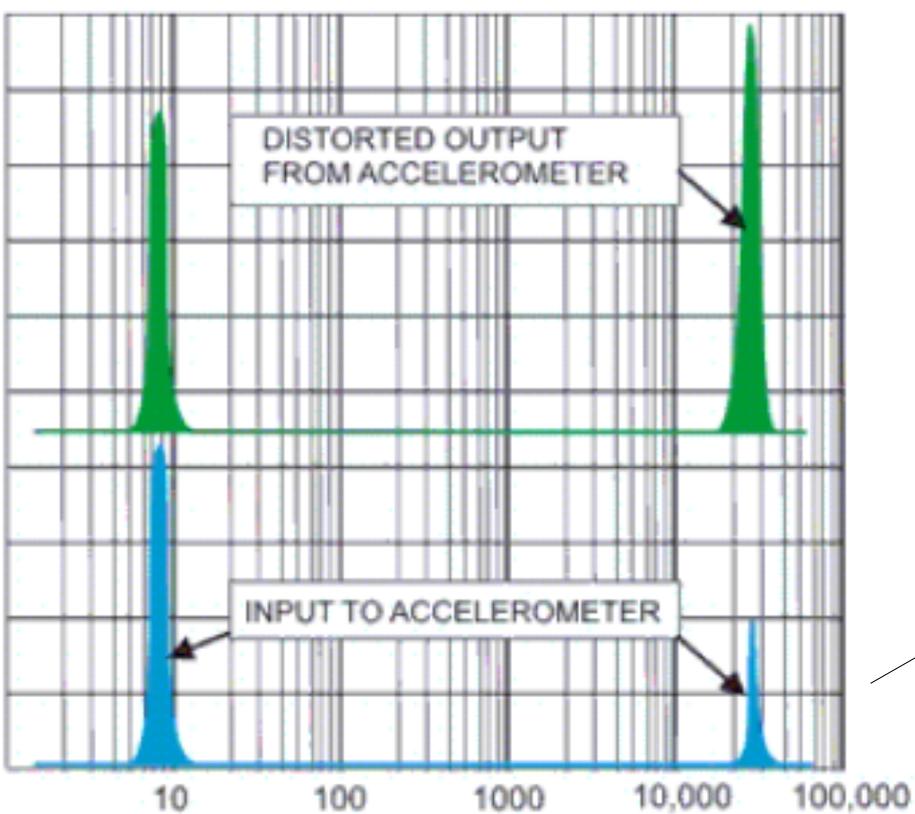


La frequenza propria del sensore piezoelettrico in generale deve essere sufficientemente elevata da poter permettere la misura di tutte le componenti armoniche del segnale senza distorsione. Per ottenere ciò è necessario mantenersi sufficientemente lontani dalla frequenza propria del sensore.



Frequencies to be measured approach the natural frequency of the accelerometer

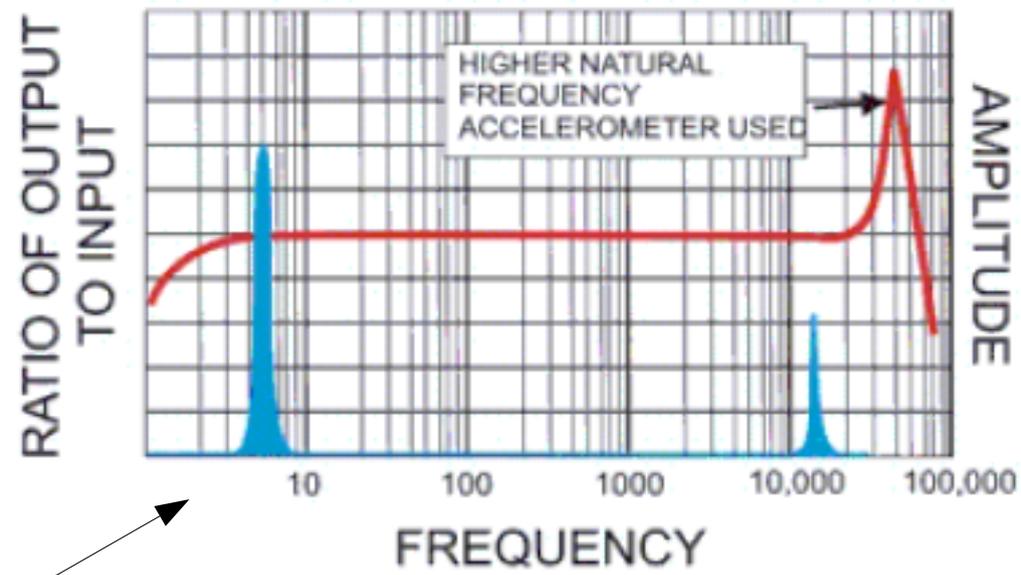
AMPLITUDE



FREQUENCY

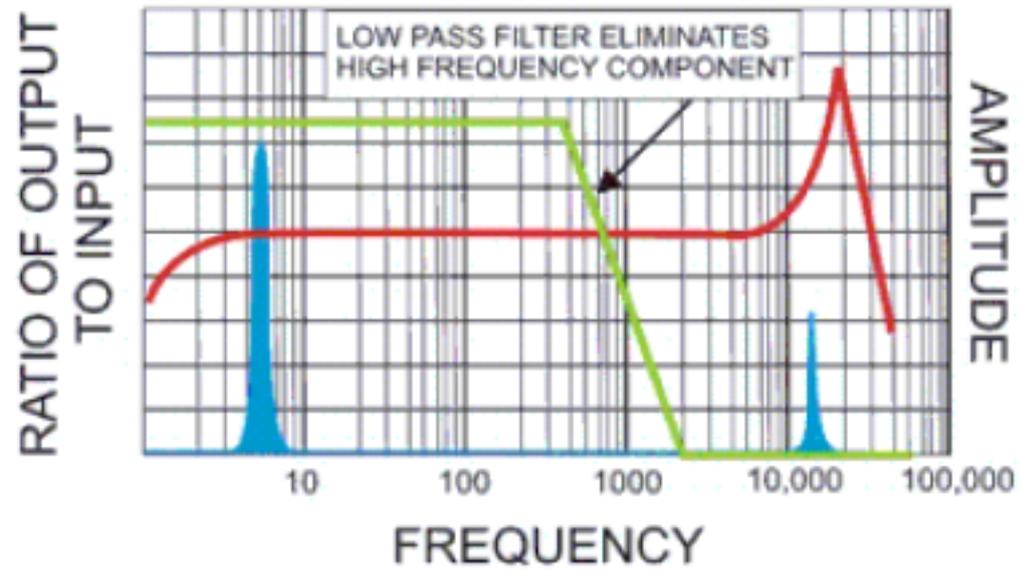
Acceleration signal is misrepresented by non-unity gain of the higher frequencies

Soluzione A



A higher natural frequency accelerometer solves the problem of measuring high frequency accelerations

Soluzione B



A low pass filter removes high frequency components of the measured signal

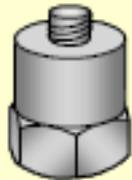
Qual è l'accelerometro adatto alle mie esigenze?

Accelerometer Type	Advantages	Disadvantages
Single ended compression	<ol style="list-style-type: none"> 1. Robust 2. Highest natural frequency 3. High shock resistance 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Poor base strain characteristics
Isolated base compression	<ol style="list-style-type: none"> 1. Robust 2. High natural frequency 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Better base strain performance
Shear	<ol style="list-style-type: none"> 1. Best base strain performance 2. Best temperature transients immunity 3. Smallest size 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Less robust 2. Lower shock resistance
Charge output	<ol style="list-style-type: none"> 1. High temperature operation 2. Suitable for radiation environments 3. Small size 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Requires local charge amplifier 2. Susceptible to tribo-electric effect
Piezo-resistive	<ol style="list-style-type: none"> 1. Measures down to zero Hz 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Limited high frequency response
Strain Gage based	<ol style="list-style-type: none"> 1. Measures down to zero Hz 2. High shock resistance 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Limited high frequency response

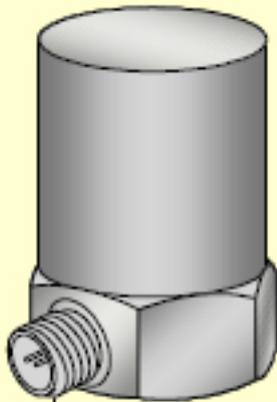
Loading the Test Object



0,1 pC/ms⁻²
0.65 g \implies M > 7 g

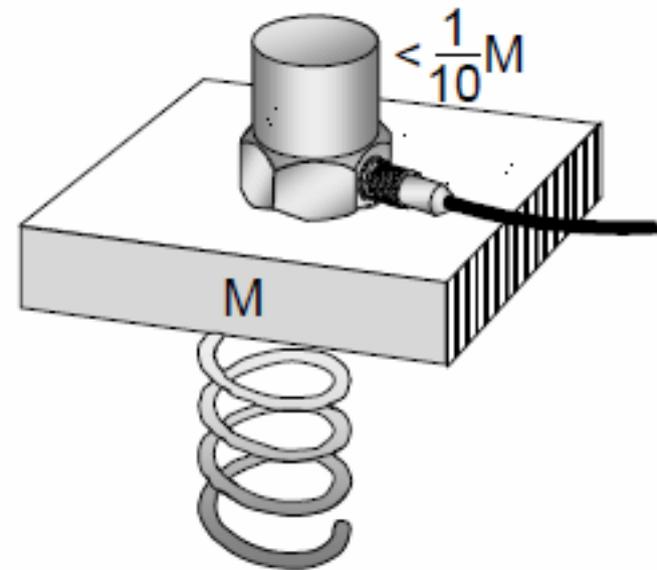


10 pC/ms⁻²
54 g \implies M > 600 g

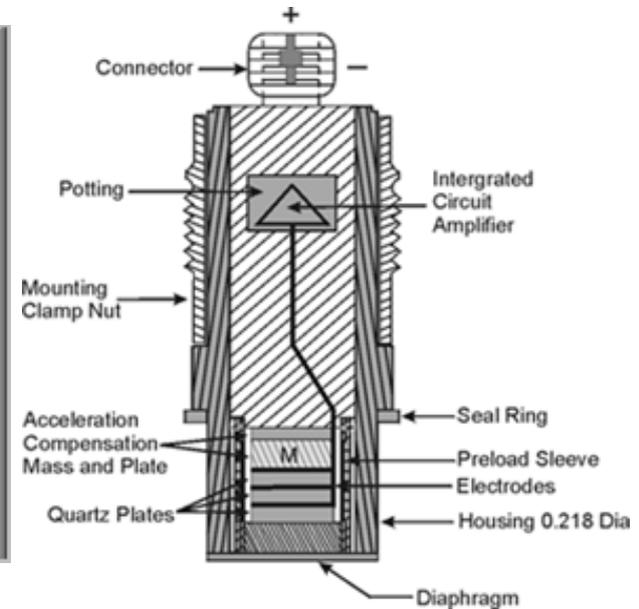
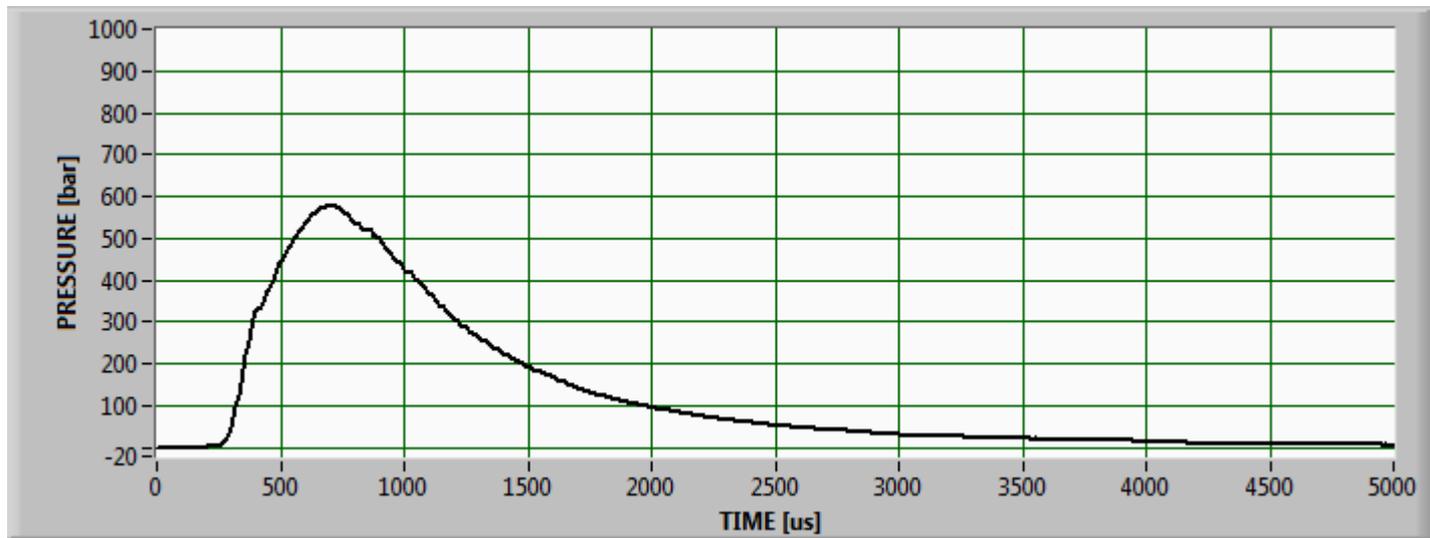


1000 pC/ms⁻²
470 g \implies M > 5 kg

Dynamic Mass



Trasduttori di PRESSIONE piezoelettrici



SET UP CHANNEL N.9

Fondoscala della misura
1000 bar

Sensibilità Trasduttore
2.135 pC/bar

Filter type
Bessel 20kHz

Frequenza filtro hardware (Hz)
20000

Soglia
89.2561 bar

Seqno
Inverting

CARICA TRASDUTTORE

NOME FILE TRASDUTTORE

RIMUOVI TRASDUTTORE

Montaggio Trasduttore
TANGENTIAL

SALVA ED APPLICA

SAMPLING CONDITION SETTINGS

Lunghezza frame in campioni
500

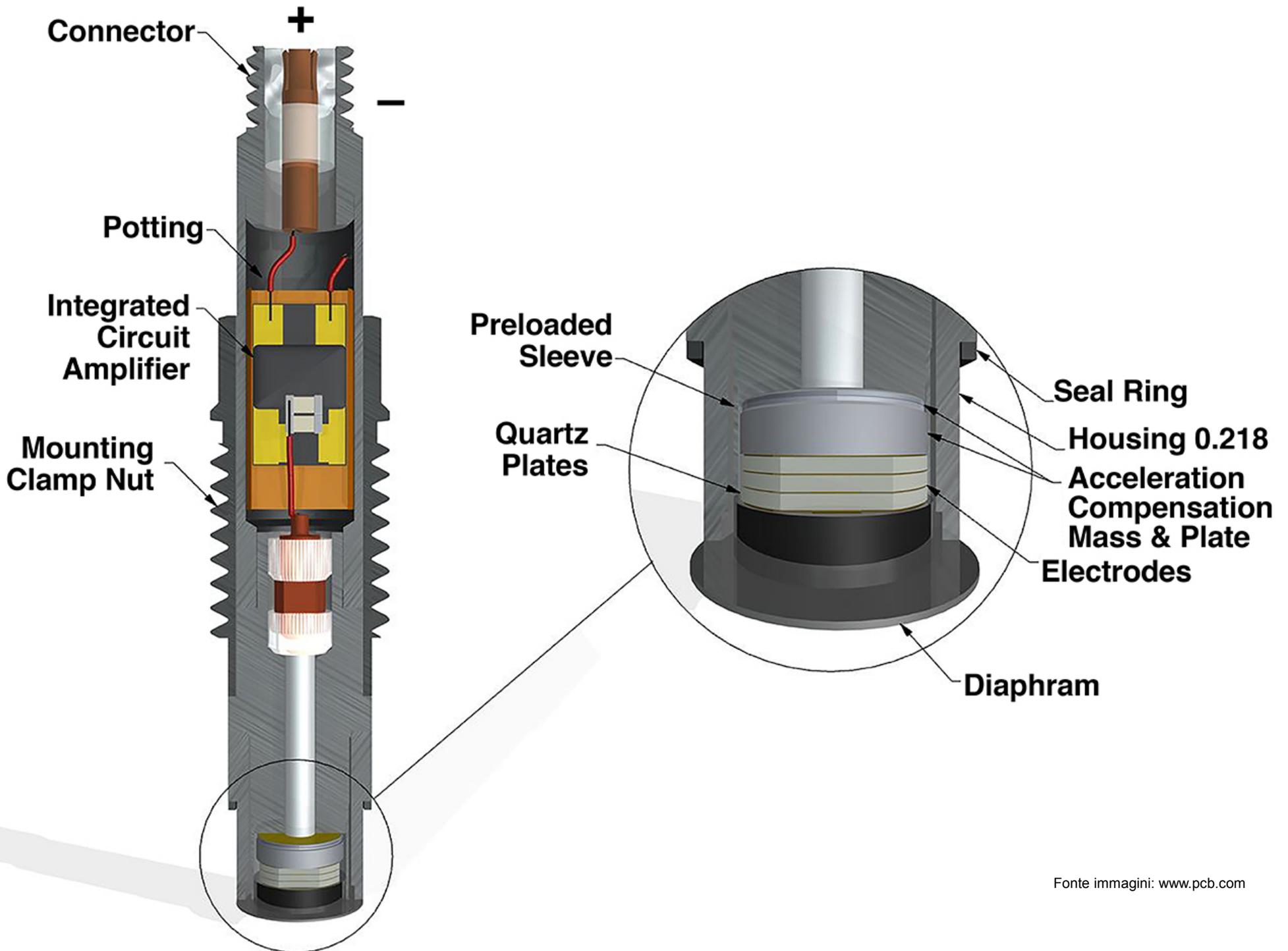
Intervallo campionamento (us)
10

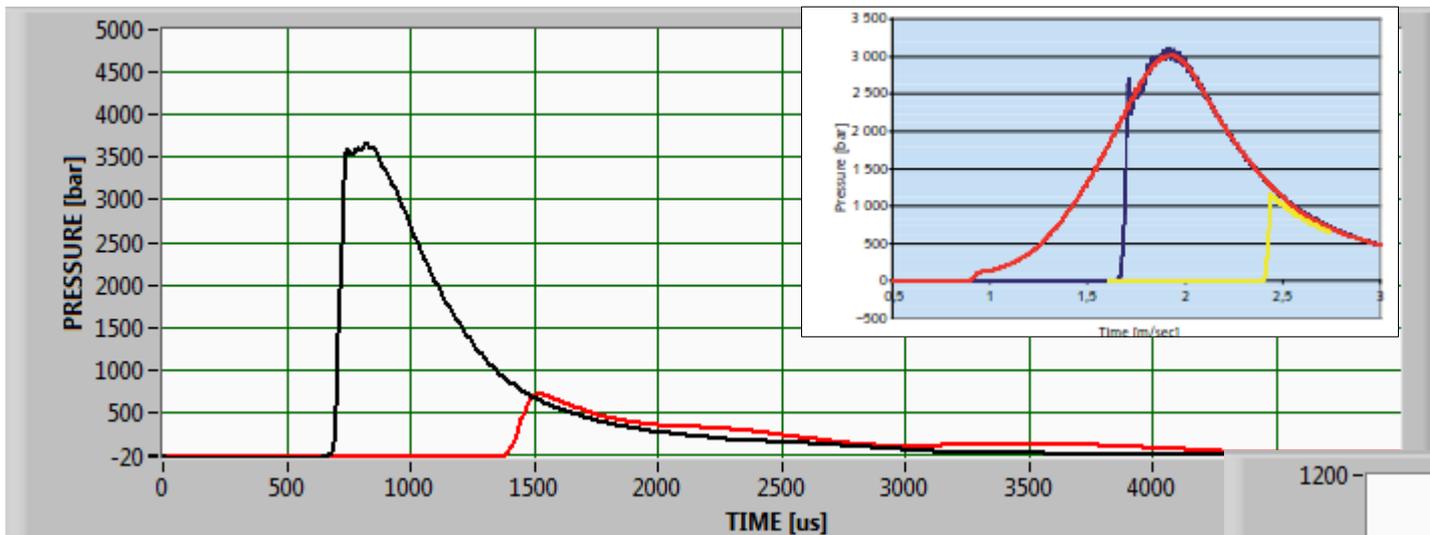
Posizione trigger (-pre + post)
0

Visualizza-Somma

Applica

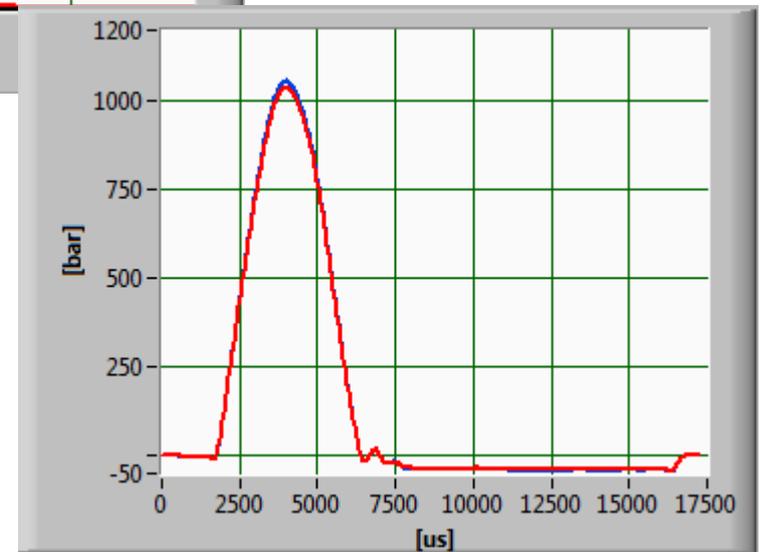
Trasduttori di PRESSIONE piezoelettrici





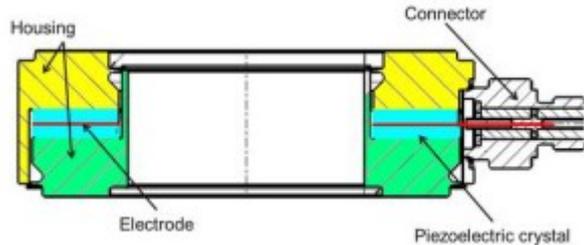
Technical Data

Range	bar	0 ... 6000
Calibrated partial range	bar	0 ... 600
Overload	bar	6 600
Sensitivity	pC/bar	-1,4
Natural Frequency	kHz	>240
Rise time	µs	1
Linearity for all ranges	%FSD	±1
Acceleration sensitivity		
axial	bar/g	<0,002
transverse	bar/g	<0,005
Shock resistance		
axial	g	25 000
transverse	g	10 000
Temperature coefficient of the sensitivity	%/°C	±0,02
Operating temperature range	°C	-50 ... 200
Capacitance	pF	≈8
Insulation resistance at 20 °C	Ω	>10 ¹¹
Tightening torque	N·m	20
Weight	g	1,2



I trasduttori di pressione piezo generalmente sono dotati di filetto, avvitati in un'apposita sede e tirati con una coppia di serraggio (Nm) nota che dipende dal produttore e dal modello di sensore.

Trasduttori di FORZA piezoelettrici (celle di carico)



Frequentemente i sensori di forza piezoelettrici sono costituiti da due dischi di cristalli con frapposto un elettrodo a foglio. Quando si applica la forza si genera una carica elettrica proporzionale alla forza applicata. Hanno un'alta frequenza di risonanza che, in linea di principio, è molto favorevole alle applicazioni dinamiche o quasi statiche.

Applicazioni tipiche: prove sui materiali, macchine di prova, macchine per la misura d'impatto, viti di serraggio, punzonatura, per la misurazione della forza nei sistemi robotici, per il monitoraggio delle presse, le punzonatrici, e per i processi di giunzione.

Le celle di carico piezoelettriche **triassiali** sono sensori in grado di misurare una forza dinamica o quasi statica nelle 3 direzioni x, y, z. Sono caratterizzate da un'ampia gamma di frequenza utilizzabile. Questi sensori vengono impiegati per misurare la forza di taglio durante la lavorazione, le forze d'impatto nei crash test, per rilevazione di forze di attrito e vibrazioni, per la misurazione delle forze di vibrazione sui componenti aerospaziali ma anche sulle forze agenti direttamente sui prodotti nei processi industriali.



Trasduttori di FORZA piezoelettrici-Esempio di dinamometri stazionari e rotativi

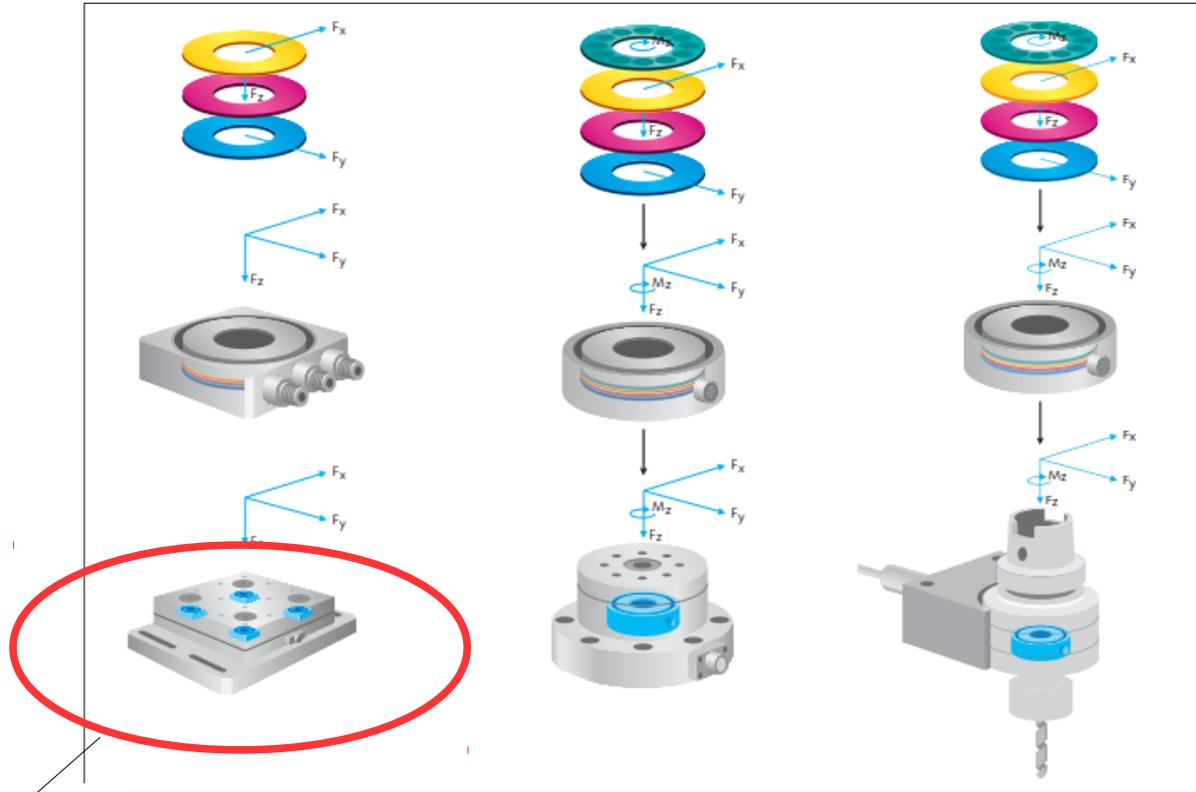
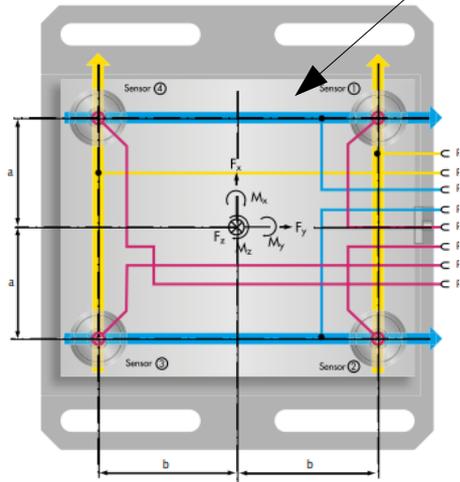


Diagram of vertically pretensioned dynamometers



Diagram of horizontally pretensioned dynamometers



Stationary 3-component dynamometers contain four 3-component force sensors that are installed in the structure of the dynamometer under high pretension. The outputs of the four sensors are interconnected in such a way that, in addition to the conventional 3-component force measurement, the force/torque measurement ($F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$), is also made possible. The torques are calculated from force components. The structure of the sensors and the dynamometer excludes ground loop problems to a large extent.

- Advantages of Stationary Dynamometers**
- Very versatile
 - Exceptionally robust
 - Non-rotating coordinate system

Stationary 4-component dynamometers contain only one multi-component sensor. This is also installed in the structure under high pretension. The measurement of the three force components (F_x, F_y, F_z) is accomplished through stacking of measurement elements with respective sensitive directions. The direct measurement of the torque M_z is enabled by a multitude of shear-sensitive crystals that are aligned tangentially around the vertical axis of the sensor.

Depending on their design, rotating dynamometers are equipped with a 2-component or a 4-component sensor. These are tensioned under high pretension between the spindle adapter and the tool holder of the RCD. The structure of the 4-component sensor used is similar to that of the sensor that is installed in stationary 4-component dynamometers, although this sensor is completely rotation-symmetrical in order to prevent unbalance.

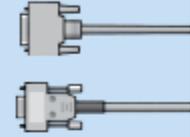
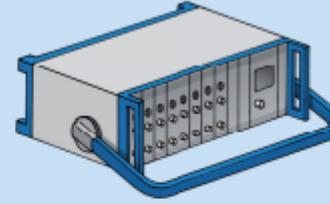
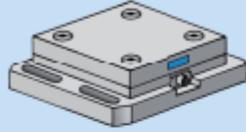
- Advantages of Rotating Dynamometers**
- Direct measurement of the torque M_z
 - Measurement very close to the tool
 - No influencing of the dynamics by changes in the mass of the workpiece

Measuring

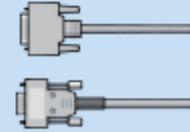
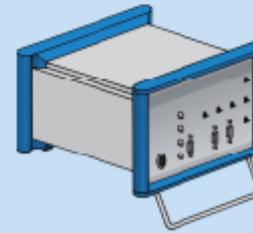
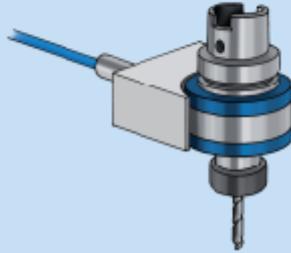
Connecting

Amplifying

Stationary Dynamometers

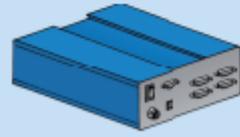
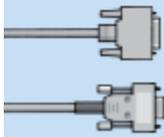
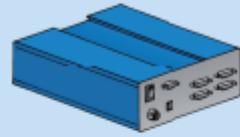
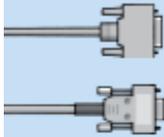


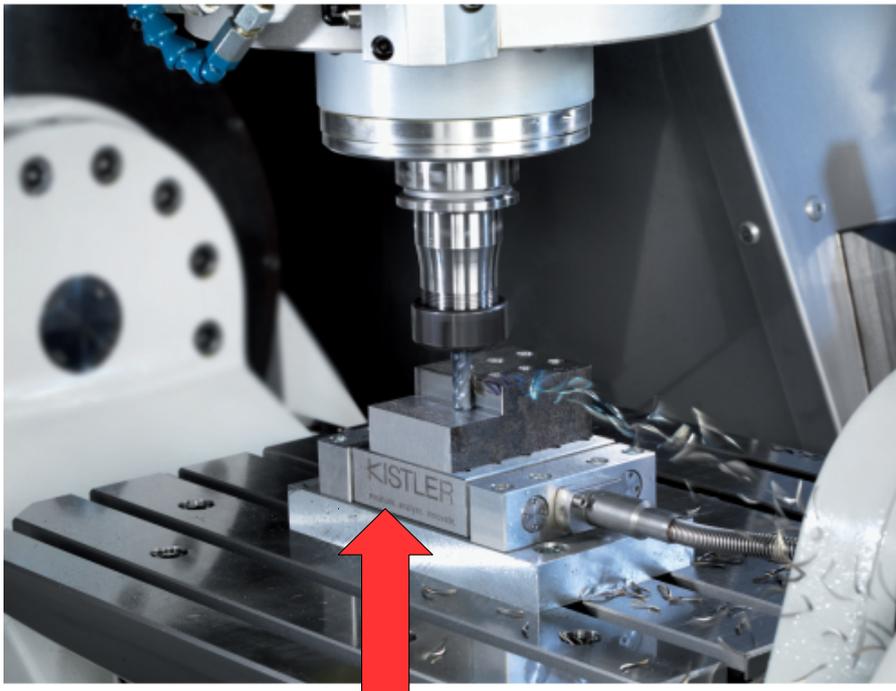
Rotating Dynamometers



Acquiring

Analyzing

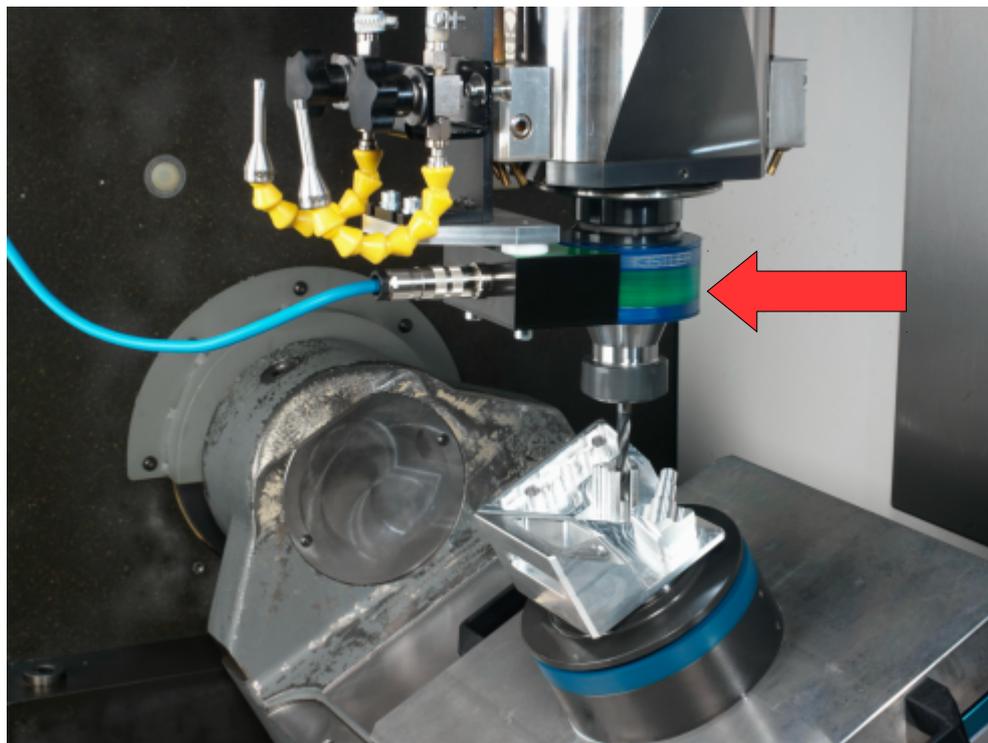




Fresatura di particolare in acciaio ad elevata durezza controllata attraverso dinamometro stazionario

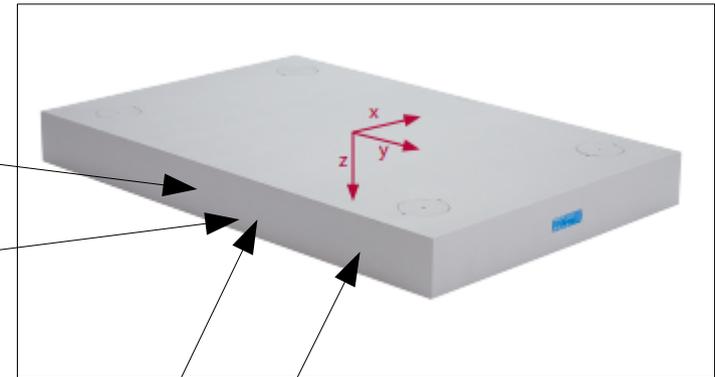


Fresatura di particolare in acciaio ad elevata durezza controllata attraverso dinamometro stazionario



Foratura con dinamometro rotativo

Trasduttori di FORZA piezoelettrici-Esempio pedana strumentata



Analisi biomeccanica
Es: Forza/potenza partenza/virata

System Overview

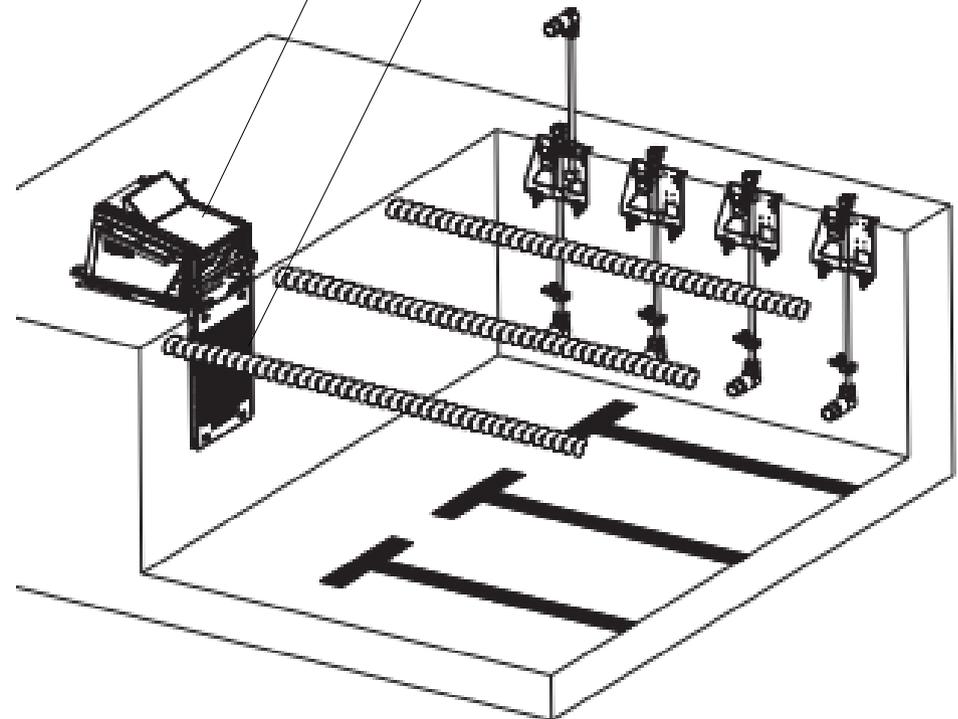
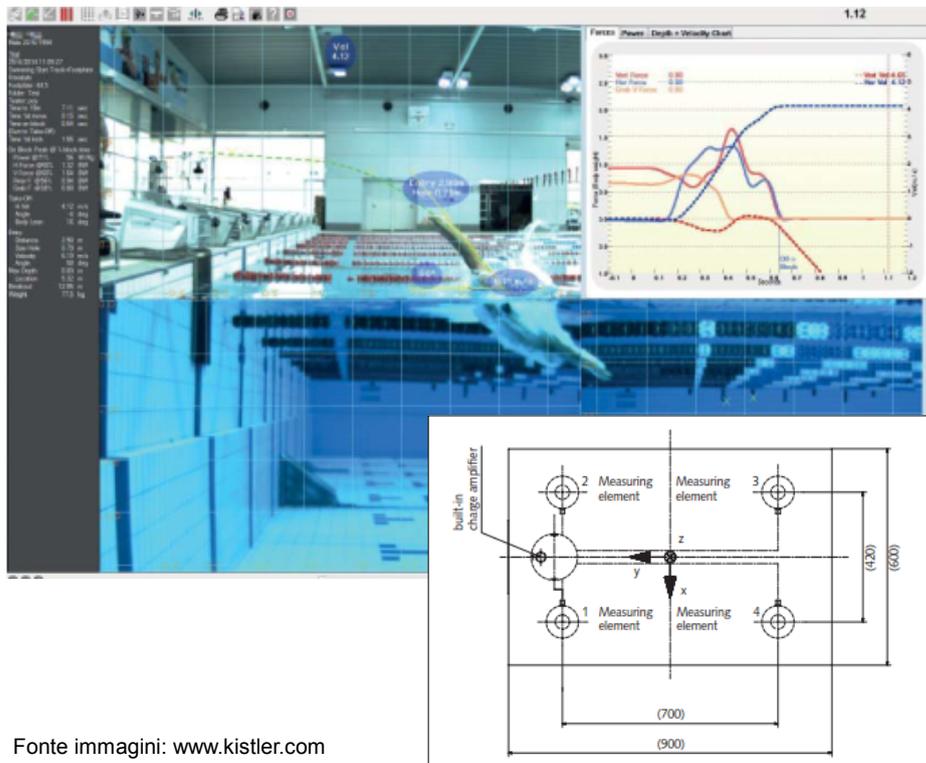
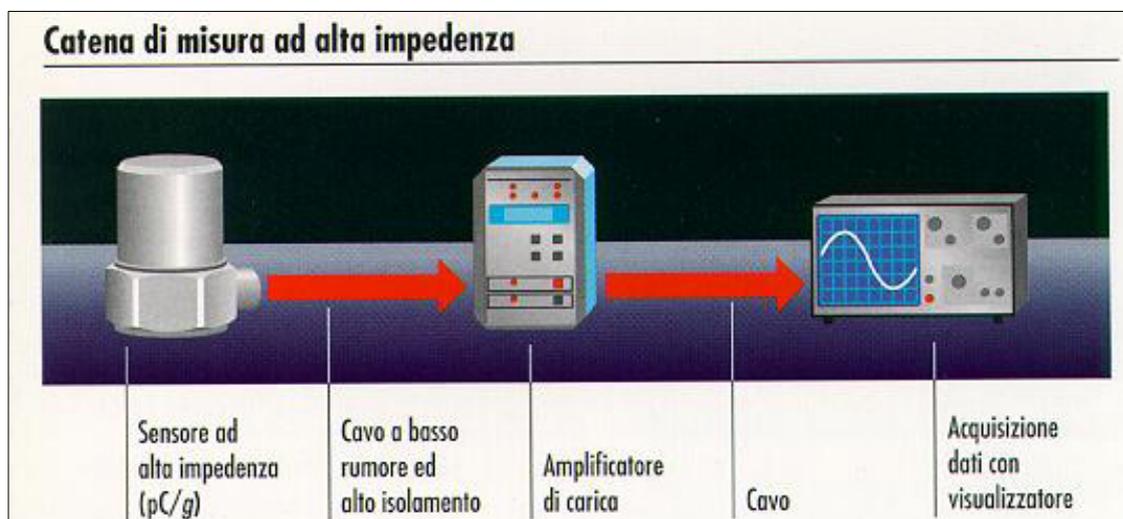


Fig. 1: Force measurement and cameras in swimming pool



Trasduttori piezoelettrici in carica-condizionamento

Affinché sia possibile convertire le cariche generate nel cristallo piezoelettrico in una differenza di potenziale misurabile e registrabile è necessario che il cristallo piezoelettrico sia inserito all'interno di un apposito circuito. Negli sensori piezoelettrici convenzionali con uscita in carica, questo circuito è esterno al trasduttore piezoelettrico e si trova all'interno di un amplificatore di carica (o preamplificatore) collegato in serie con esso. Questo tipo di catena di misura viene chiamata ad "alta impedenza".

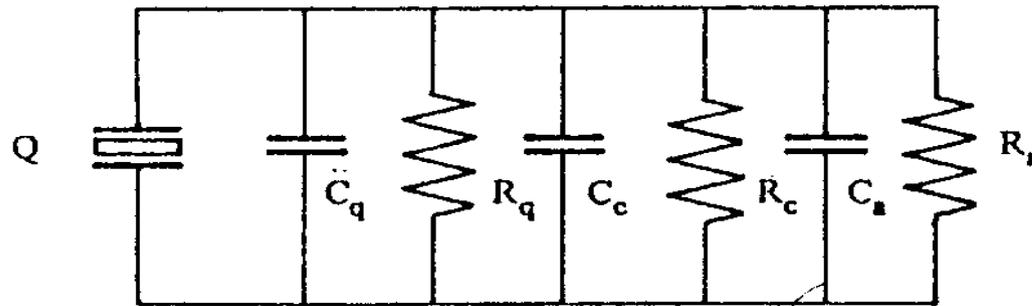


Typical Measuring Chain			
			Standard signal output 0 ... 5 V or 0 ... 10 V
Pressure sensor and accessories (recommended to use with cable Type 1619AA0,5)	Connection cable up to 100 m is possible	Charge amplifier for piezo- electric sensors and coupler for Piezotron sensors	Data acquisition, display and data analysis

I cavi di collegamento tra il sensore e l'amplificatore di carica costituiscono un elemento molto delicato della catena di misura e devono essere ad alto isolamento e basso rumore, inoltre la loro lunghezza non può eccedere qualche metro.

La catena di misura è detta ad alta impedenza poiché l'amplificatore per potere rilevare la differenza di potenziale prima che il condensatore (il cristallo) si scarichi deve avere una impedenza d'ingresso del primo stadio dello stesso ordine di grandezza dell'impedenza di uscita del cristallo ($>10 \text{ G}\Omega$). Qualora infatti le cariche abbandonano gli elettrodi si riduce la sensibilità del sensore e si commette un rilevante errore nella misura.

Dette rispettivamente C_q , C_c , C_a e R_q , R_c , R_a le capacità e le resistenze dell'elemento piezoelettrico, del cavo di collegamento e dello stadio d'ingresso dell'amplificatore, uno schema semplificato del circuito reale è rappresentato nella seguente figura.

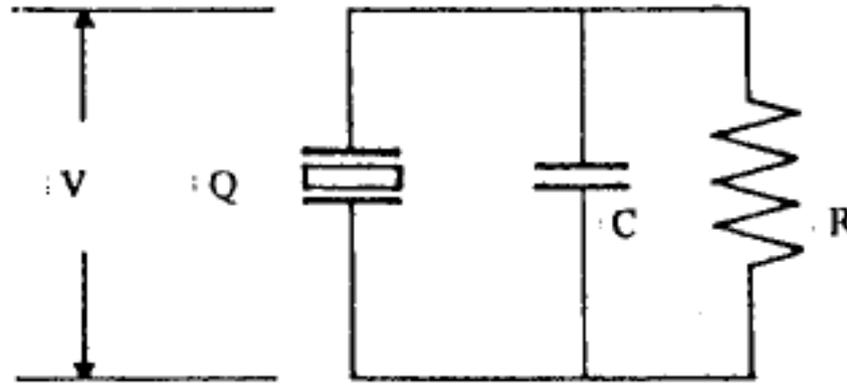


Assumendo:

$$C = C_q + C_c + C_a$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_q} + \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_a}$$

si ottiene il seguente circuito equivalente:



La tensione V all'uscita dal trasduttore piezo all'istante t , detta V_0 la d.d.p. all'istante iniziale, vale:

$$V = V_0 e^{-\frac{t}{RC}}$$

Se il prodotto RC non è molto maggiore del periodo del segnale da misurare, il condensatore si scarica, rendendo impossibile la misura o falsandola. Poiché il cavo ed i suoi connettori hanno una capacità finita, piccola e variabile con la lunghezza del cavo stesso, è indispensabile che l'impedenza d'ingresso dell'amplificatore sia la più elevata possibile.

Si spiega in questo modo anche la difficoltà di misurare con un sensore piezoelettrico segnali a bassa frequenza e l'impossibilità di misurare accelerazioni statiche a frequenza nulla.

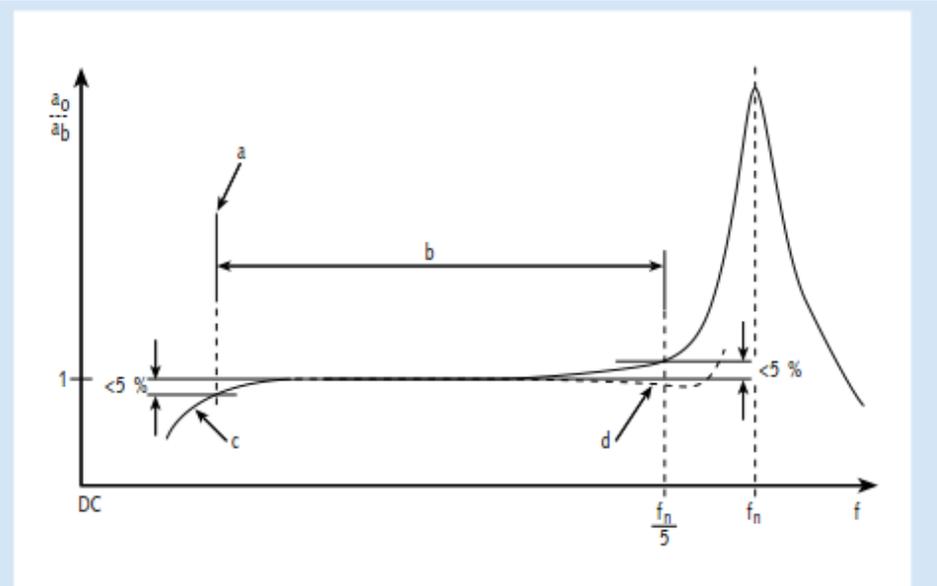
L'amplificatore di carica dovrà poi rendere disponibile la differenza di potenziale in un circuito in uscita ad impedenza relativamente bassa, per potere consentire il collegamento con la strumentazione di analisi del segnale (es.: analizzatore di spettro) o con un convertitore A/D.

La maggior parte dei preamplificatori hanno una o più funzioni ausiliarie:

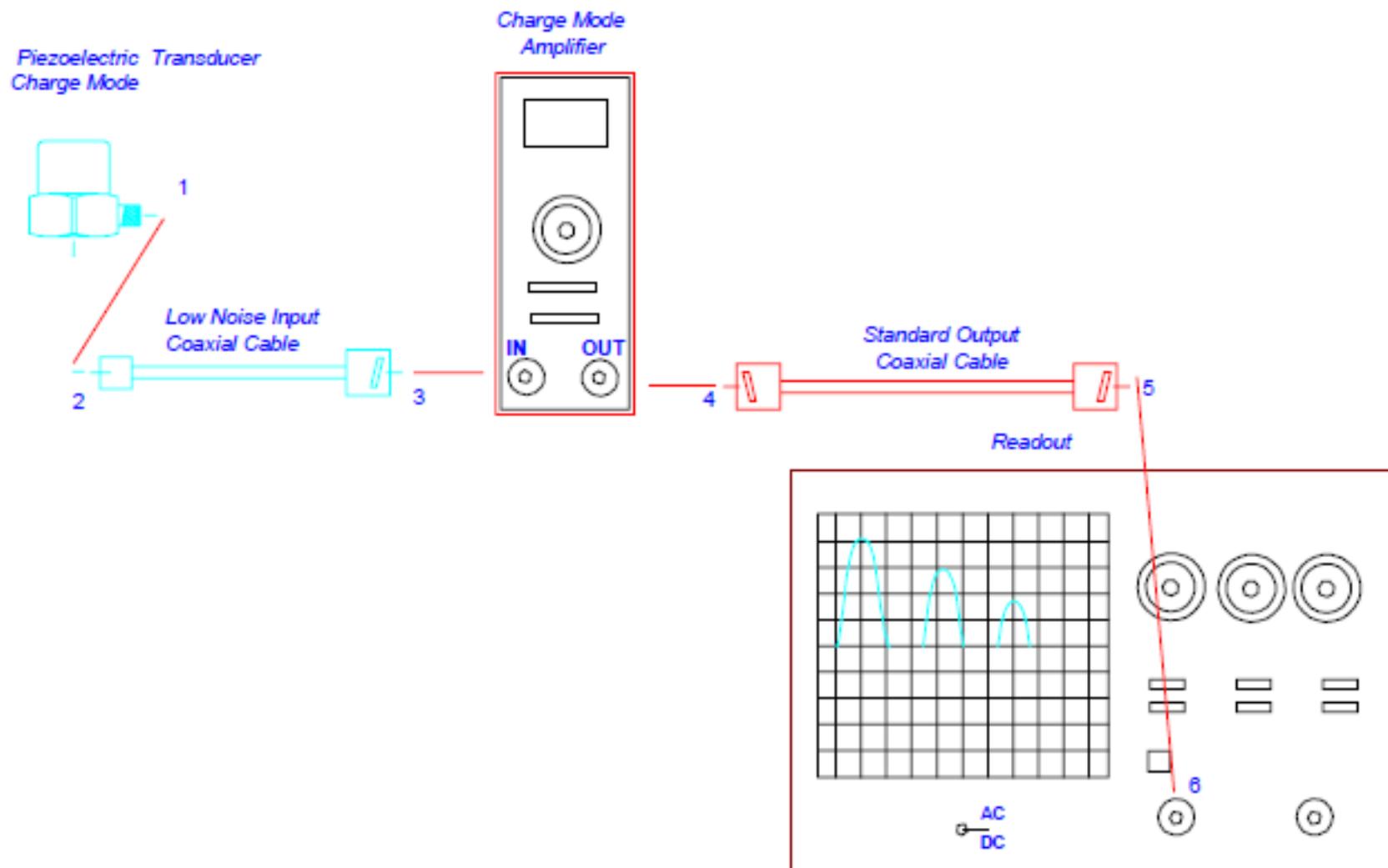
- possibilità di selezionare su di essi la sensibilità del trasduttore;
- regolazione del guadagno;
- integratore elettronico, per convertire l'uscita proporzionale all'accelerazione in segnali di velocità o di spostamento;
- filtri passa-basso, passa-alto o passa-banda, per selezionare i limiti inferiore e superiore di frequenza del segnale in uscita;
- indicatori di sovraccarico e delle condizioni della batteria

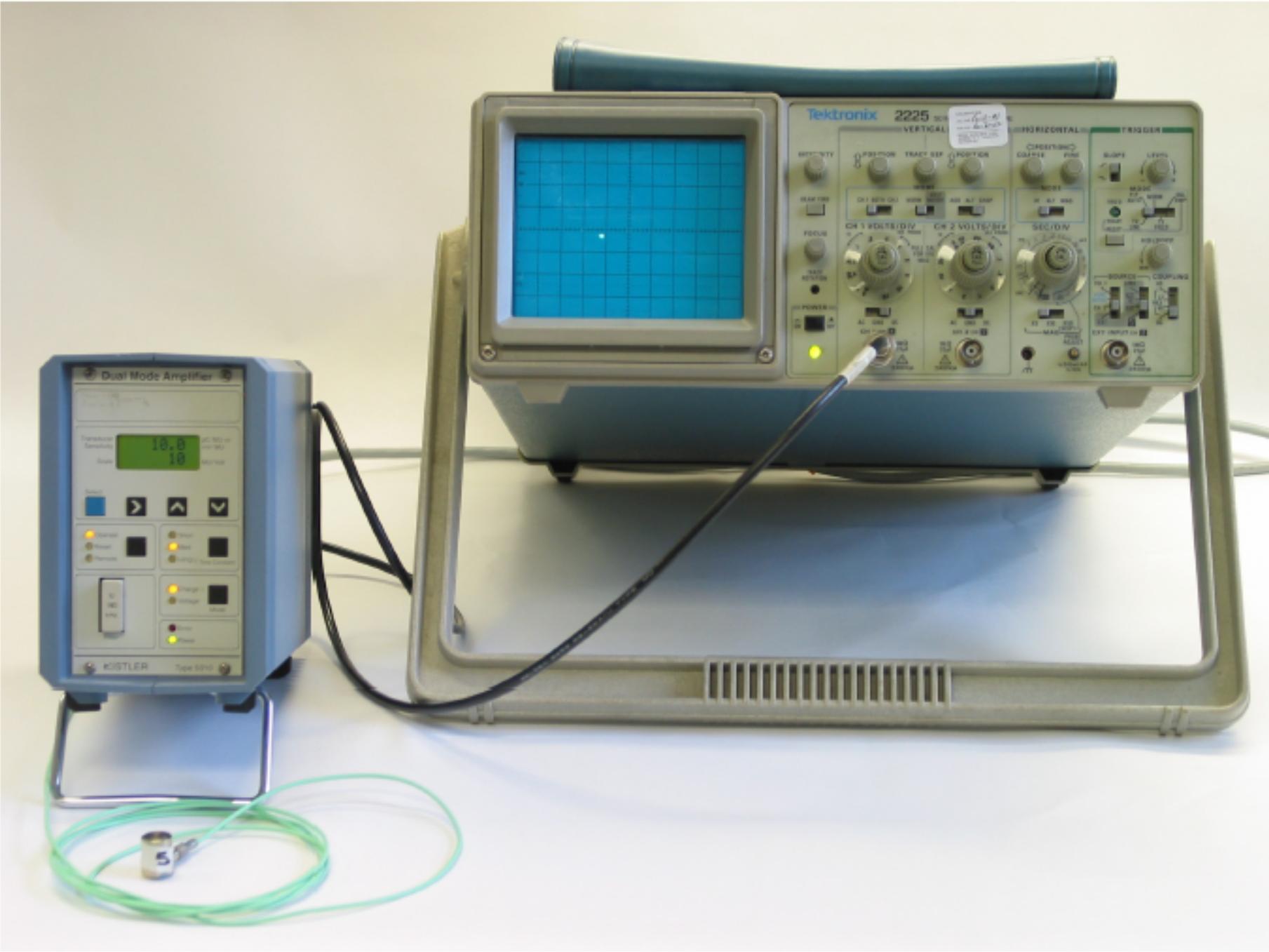
Fig. 3: Typical frequency response curve

- a = low frequency limit determined by RC roll-off characteristics
- b = usable frequency range
- c = HP filter
- d = LP filter



TYPICAL CHARGE MODE CONNECTION (No Internal Electronic)





Trasduttori piezoelettrici ICP (IEPE-Isotron-Piezotron)

Sono disponibili modelli con microelettronica incorporata, ossia con amplificatori di carica montati all'interno dell'involucro del sensore, detti ICP(Integrated Circuit piezoelettric) - IEPE che devono essere alimentati (tramite cavo opportuno).

In questo modo il segnale di uscita viene fornito direttamente in Volt e può essere collegato direttamente ad un oscilloscopio oppure ad un analizzatore di segnale.

I trasduttori piezoelettrici ICP non necessitano pertanto di preamplificatore esterno, ma solo di un alimentatore esterno a corrente continua. Il segnale in uscita dal trasduttore è in questo caso una differenza di potenziale e la catena di misura è detta a bassa impedenza.

L'alimentatore esterno o accoppiatore può avere anche la funzione di amplificare il segnale attraverso un guadagno regolabile.

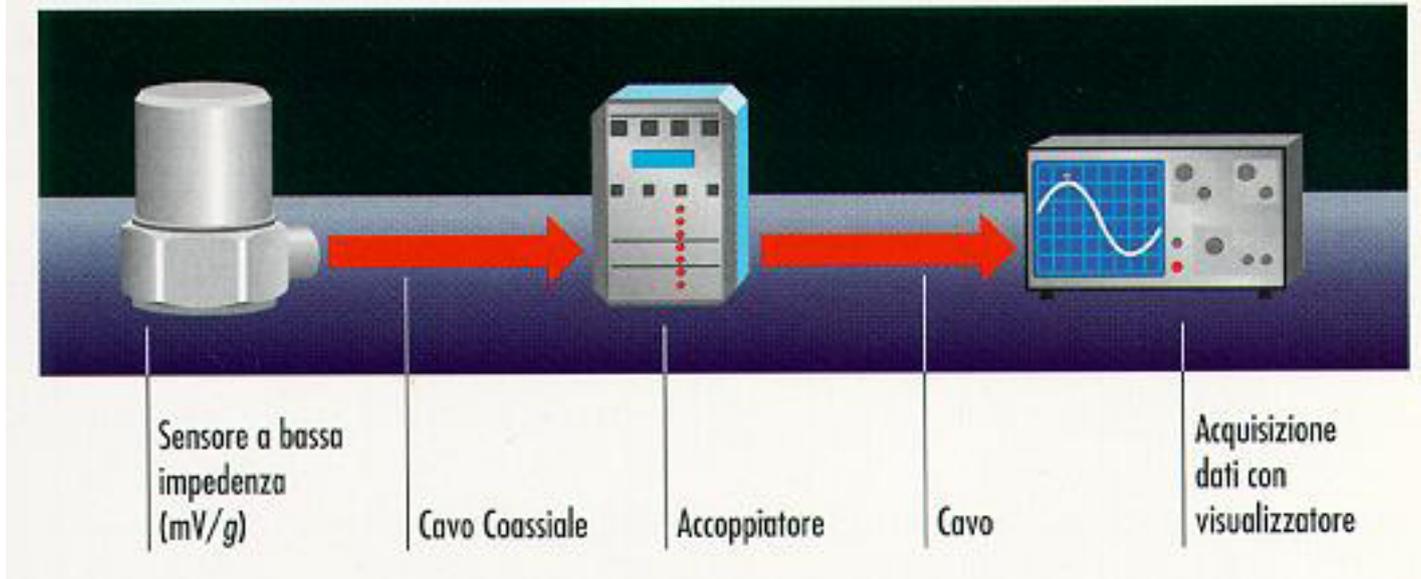
Vantaggi:

- Semplici da utilizzare- complessivamente più economici
- Trasmissione a bassa impedenza
- Sensibilità più elevate
- Riduzione del rumore generato dal cavo (RUMORE TRIBOELETTTRICO)-cavi più lunghi
- Costi più bassi
- Numerosi recenti sistemi di acquisizione hanno i condizionatori per ICP integrati

Svantaggi:

- Ridotto campo di temperature di utilizzo (elettronica microcircuitale soffre la T più del solo sensore)
- Condizionamento del segnale meno versatile (non si può agire su RC)

Catena di misura a bassa impedenza

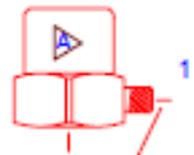


Nei trasduttori ICP o anche detti IEPE, il segnale in uscita dal trasduttore è una tensione e pertanto la sensibilità del trasduttore si misura in $\text{mV}/(\text{m}/\text{s}^2)$ (milliVolt al metro secondo quadro) o in mV/g (milliVolt al g).

Typical Measuring Chain			
			Standard signal output 0 ... 5 V or 0 ... 10 V
Pressure sensor and accessories (recommended to use with cable Type 1619AA0,5)	Connection cable up to 100 m is possible	Charge amplifier for piezo- electric sensors and coupler for Piezotron sensors	Data acquisition, display and data analysis

TYPICAL LOW IMPEDANCE CONNECTION (Internal Electronic)

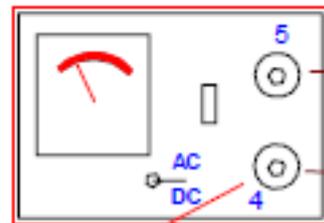
Piezoelectric Transducer
With Internal Electronics



Standard Input
Coaxial Cable

3

AC/DC Mode Coupler



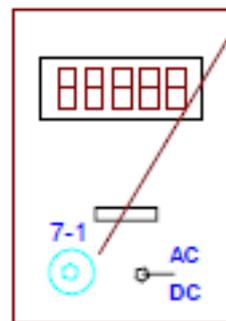
6

5-1

Standard Output
Coaxial Cable

6-1

Digital Voltmeter



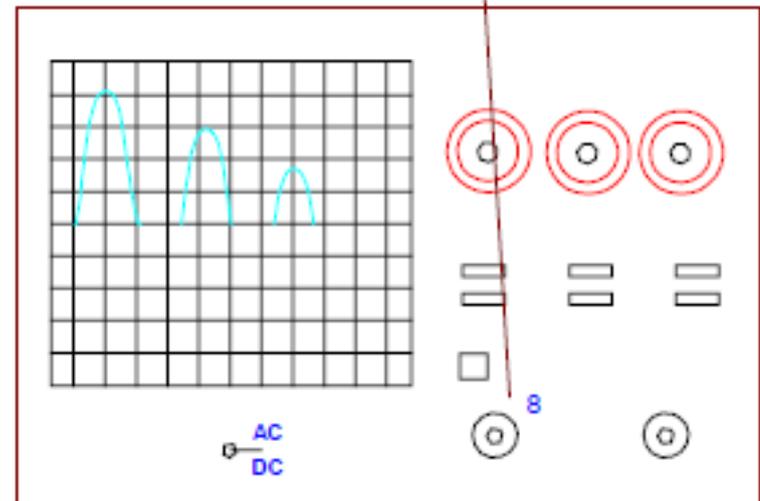
7-1

AC
DC

Standard Output
Coaxial Cable

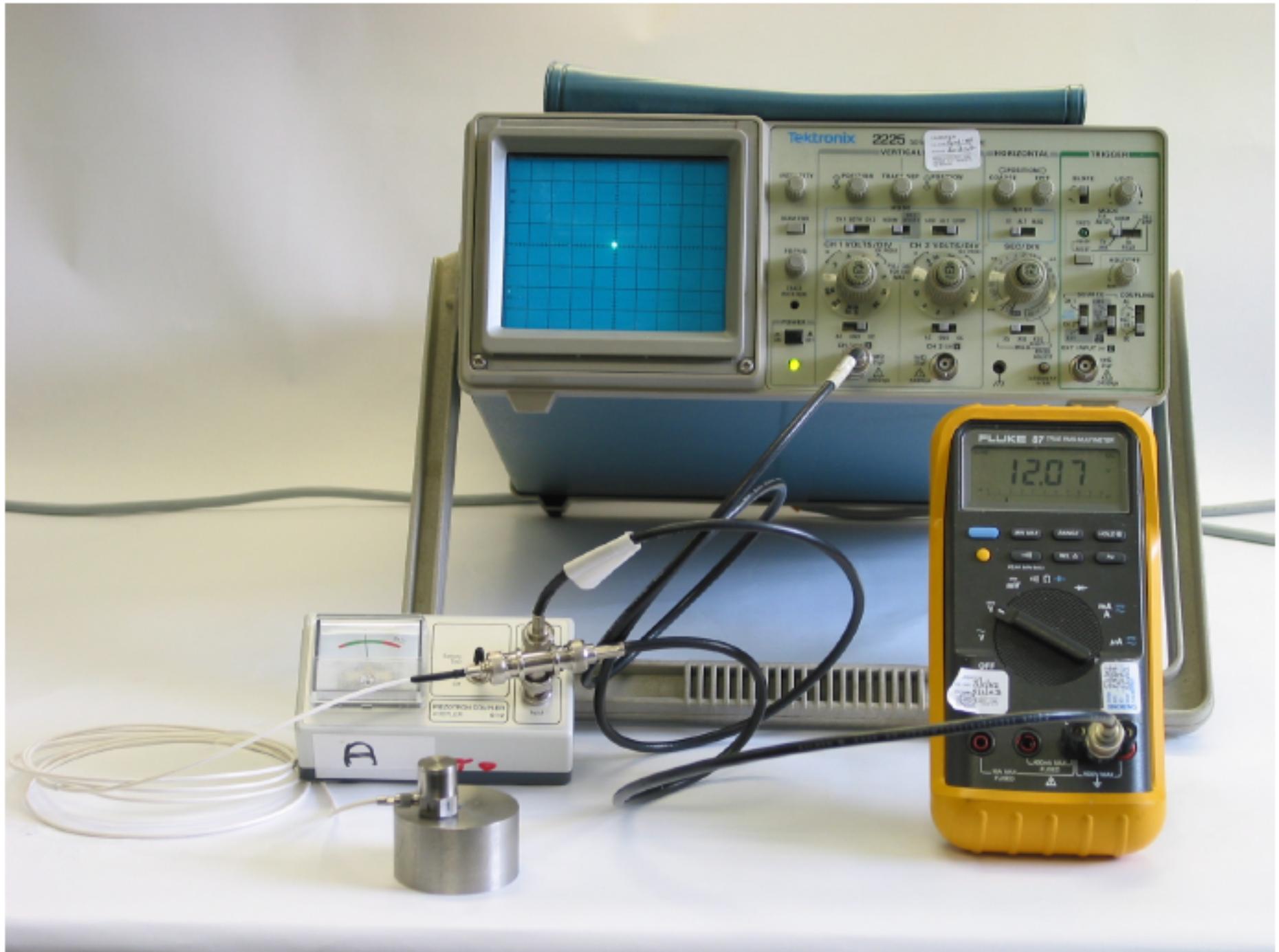
7

Readout



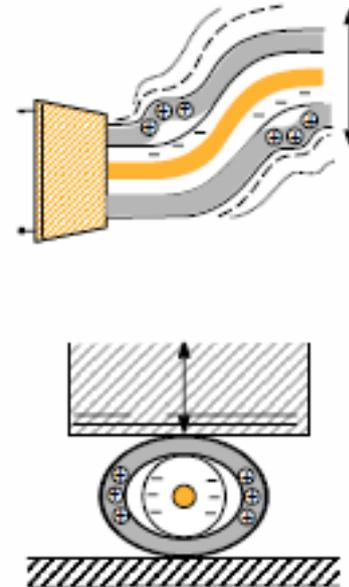
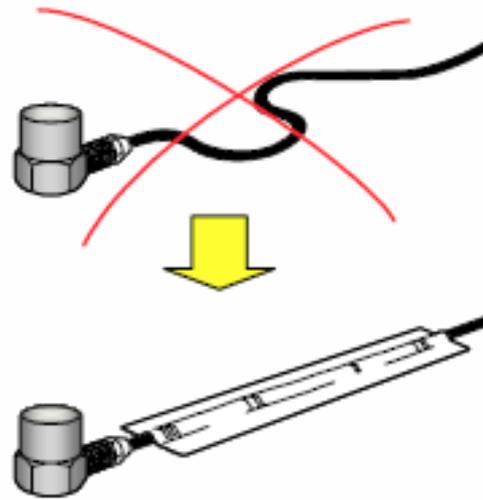
8

AC
DC



Rumore triboelettrico

Triboelectric Noise



Viene indotto nel cavo dal movimento meccanico del cavo stesso, si evita nastrandolo e incollando il cavo il più vicino possibile al sensore (operazione non sempre fattibile);