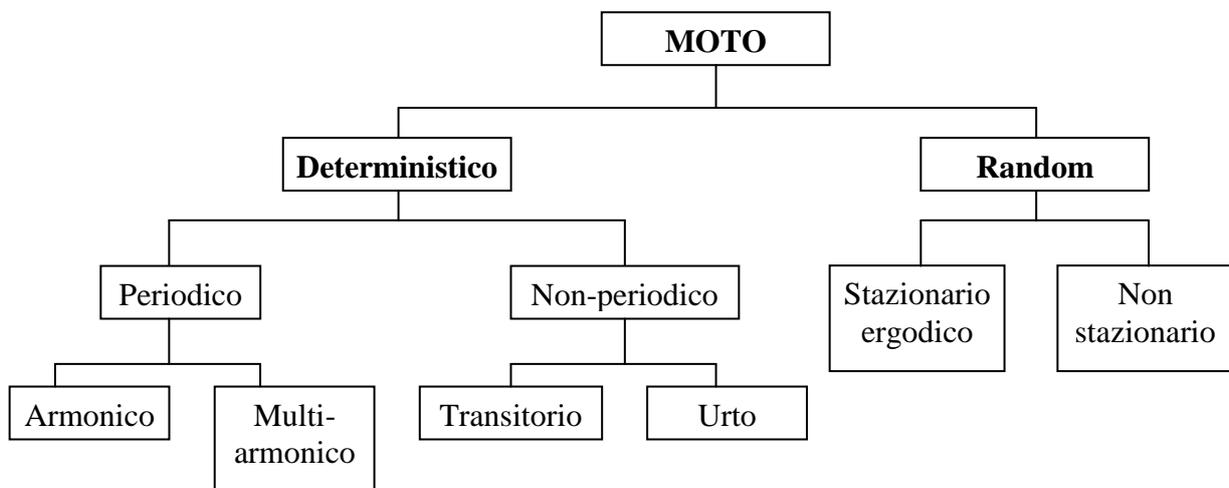


# MISURA DELLE VIBRAZIONI

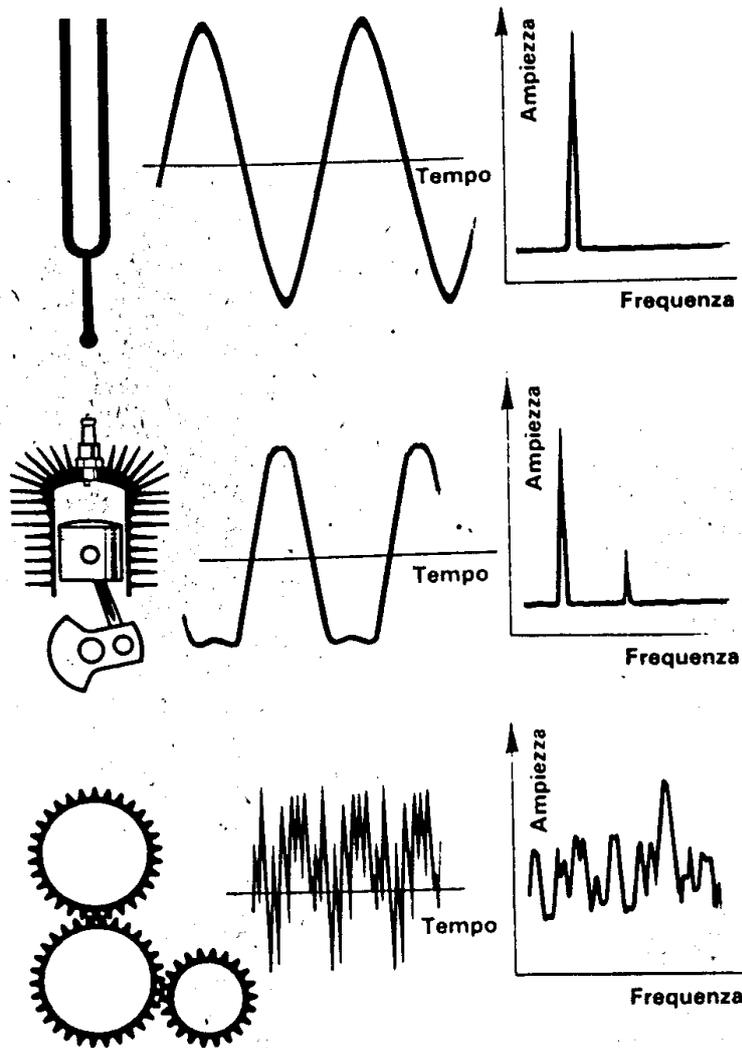
## 1. Introduzione

Un corpo vibra quando descrive intorno ad una posizione di riferimento un moto oscillatorio i cui parametri (ampiezza, valore medio, etc.) non sono in generale costanti nel tempo. La natura di una vibrazione può essere prevedibile a partire dalla conoscenza di precedenti ricorrenze, il fenomeno è in tal caso deterministico, o può essere caratterizzata dall'avere solamente alcune proprietà che seguono leggi statistiche, si parla in tal caso di moto stocastico o di vibrazioni random.



Tra i moti oscillatori deterministici periodici rientrano, ad esempio, le vibrazioni generate dalle macchine, in relazione alla tipologia, sono caratterizzate da componenti armoniche con pulsazioni multiple della velocità di rotazione degli alberi rotanti all'interno della macchina. Tra i moti random con caratteristiche stazionarie rientrano, ad esempio, il moto ondoso, il vento o la variazione altimetrica dovuta alle irregolarità dell'asfalto nei profili stradali. Tra i fenomeni non-periodici rientrano gli urti nelle varie forme o le vibrazioni che si manifestano nei transitori di avvio o di arresto delle macchine. Alle vibrazioni deterministiche si sovrappongono di solito delle vibrazioni casuali, che potranno essere considerate come disturbi (o *rumore*).

I segnali di vibrazione, deterministici o random, presentano solitamente molteplici componenti armoniche aventi differente frequenza e fase; la rappresentazione di una vibrazione nel dominio del tempo consente solo di stimare alcuni parametri di sintesi (picco, picco-picco, RMS, etc.) e l'analisi in frequenza si rende indispensabile per potere stimare il contributo fornito dalle singole armoniche.



Le misure di vibrazioni possono venire effettuate con modalità e scopi diversi:

- a) **misura del livello di vibrazione:** viene rilevato il livello di vibrazione di un sistema meccanico o il livello di vibrazione trasmesso al corpo umano, per confrontarlo con il valore ammesso da norme di sicurezza o di igiene del lavoro, o per valutare le sollecitazioni meccaniche indotte;
- b) **misura dell'eccitazione:** vengono misurate forze o momenti che possono costituire delle **forzanti**, cioè azioni che applicate ad un sistema in grado di vibrare lo pongono in vibrazione;
- c) **misura della risposta di un sistema ad un'eccitazione nota:** questo tipo di misura viene effettuata per identificare sperimentalmente funzione di risposta in frequenza di un corpo o un sistema di corpi e di stimarne le frequenze proprie e i modi propri di vibrare (Experimental Modal Analysis).

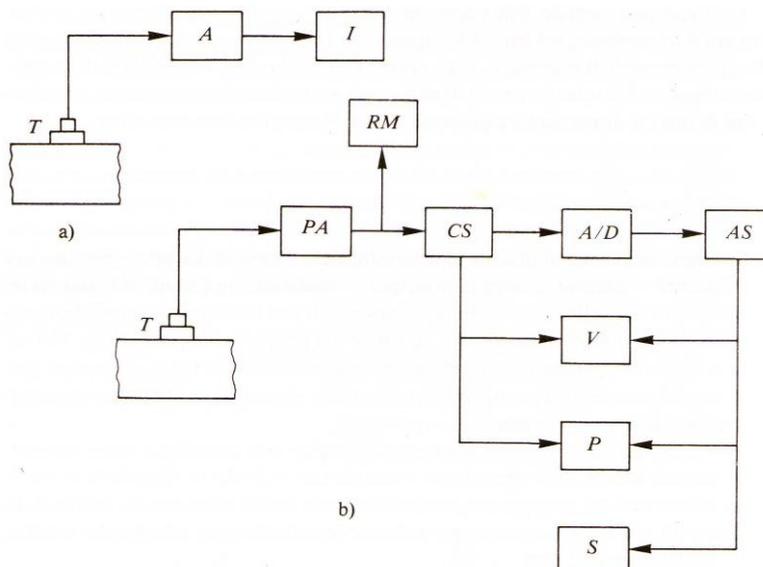
## 2. La catena di misura

Le misure di vibrazioni possono essere talvolta effettuate con strumenti abbastanza semplici, come i vibrometri a mano, ma usualmente richiedono una strumentazione relativamente complessa, che comprende almeno un *Trasduttore*, un *Amplificatore* e un *Indicatore*.

Il trasduttore è uno strumento sensibile allo spostamento, alla velocità o all'accelerazione, in grado di avere in uscita una tensione (o altra grandezza elettrica) proporzionale al valore istantaneo della grandezza in ingresso. La grandezza elettrica in uscita dal trasduttore viene prima amplificata e poi inviata ad uno strumento che ne indica il valore, o meglio, essendo opportunamente tarato, indica direttamente il valore della grandezza (spostamento, velocità, accelerazione) rilevata dal trasduttore.

Una *catena di misura* completa è solitamente costituita dai seguenti componenti:

- Trasduttore,
- Pre-Amplificatore,
- Condizionatore di Segnale,
- convertitore Analogico / Digitale,
- Analizzatore di Segnale,
- altri dispositivi (Visualizzatore, Stampante, Plotter...).



a) Catena di misura con trasduttore (T), amplificatore (A), indicatore (I).

b) Catena di misura completa, con trasduttore(T), pre-amplificatore (PA), condizionatore di segnale (CS), convertitore analogico-digitale (A/D), analizzatore di segnale (AS), registratore magnetico (RM), visualizzatore (V), plotter (P), stampante (S).

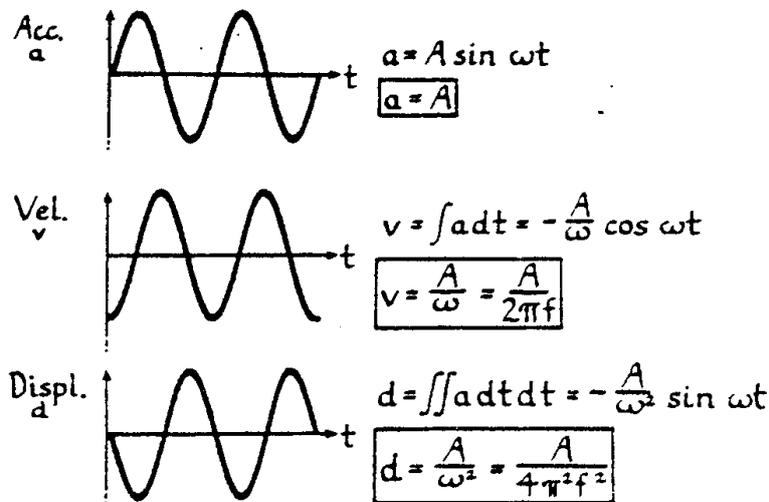
Il *segnale* (cioè la grandezza elettrica il cui valore è proporzionale a quello della grandezza rilevata) proveniente dal *trasduttore T* viene dapprima amplificato dal *pre-amplificatore PA*, e successivamente inviato ad un apparato CS, che lo tratta variamente, di solito amplificandolo ulteriormente e compiendo eventuali altre operazioni, come il filtraggio in frequenza o l'integrazione. Il filtraggio in frequenza può essere effettuato sia con filtri analogici (in cui il segnale in ingresso è continuo) sia con filtri digitali posti a valle del convertitore A/D e interni all'apparato AS. L'operazione di filtraggio in frequenza sul segnale in ingresso consente il passaggio solo di specifiche armoniche nel segnale in uscita. Un filtro passa-basso, ad esempio, permette il passaggio solo delle componenti a frequenza inferiore ad un valore imposto (frequenza di taglio del filtro). Un filtro passa-banda consente di filtrare tutte le armoniche al di fuori di una banda di frequenza assegnata. I filtri passa-banda analogici vengono utilizzati per effettuare l'analisi in frequenza in banda larga calcolando un parametro del segnale (di solito il valore RMS) per ciascuna banda in frequenza e fornendo la tipica rappresentazione del segnale attraverso istogrammi in banda d'ottava o 1/3 di banda d'ottava. L'analisi in frequenza in banda stretta (Fast Fourier Transform) viene effettuata a valle del convertitore A/D dopo che il segnale è stato quantizzato.

L'eventuale presenza aggiuntiva di un apparato integratore permette il passaggio dall'accelerazione alla velocità e/o dalla velocità allo spostamento.

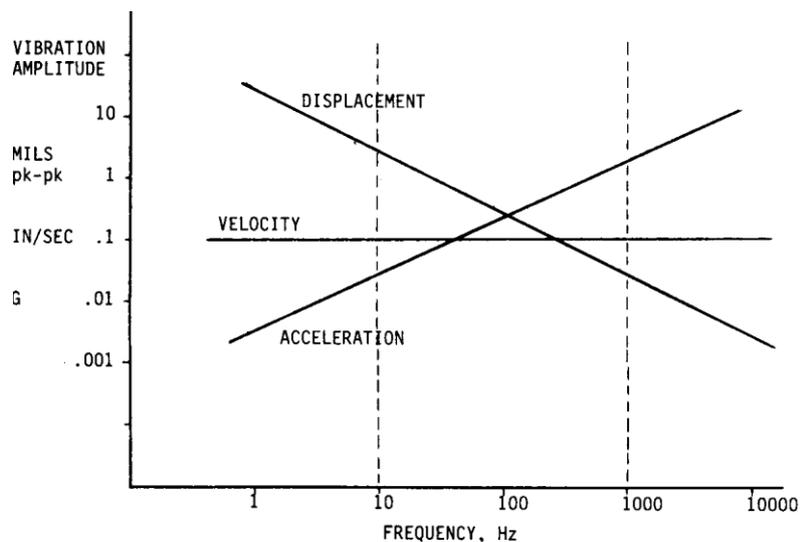
Il segnale condizionato viene di solito inviato ad un *convertitore analogico digitale A/D*, che ne esegue il campionamento ad una frequenza scelta dall'utente ( $f_s=1/\Delta t$ , sampling rate), rilevandone il valore numerico a intervalli regolari  $\Delta t$  di tempo. Il segnale proveniente dal trasduttore è un *segnale "analogico"* continuo, il cui andamento è analogo a quello della grandezza misurata; il *convertitore A/D* rileva il valore istantaneo del segnale a intervalli regolari di tempo, trasformandolo in un insieme discreto di numeri (*segnale "digitale"*) che possono essere gestiti ed elaborati da un calcolatore. Il segnale giunge infine *all'analizzatore di segnale AS*, il quale può operare sul segnale analogico mediante circuiti elettronici (filtri, derivatori, integratori); se invece il segnale è stato digitalizzato dal *convertitore A/D*, l'analizzatore è costituito da un calcolatore, che analizza il segnale campionato trattandolo come un insieme di dati numerici di ingresso, compiendo su di esso le più svariate operazioni matematiche.

### 3. Scelta della grandezza da misurare

Per stimare una vibrazione si può scegliere di misurare lo spostamento o le sue derivate prima e seconda, velocità e accelerazione. La scelta del parametro da misurare dipende dal range di frequenza del fenomeno. Con riferimento ad una singola armonica, qualunque sia il parametro considerato, rimangono inalterati forma e periodo della vibrazione, mentre si verifica una variazione di ampiezza e di fase. Quando si eseguono misure mediate nel tempo, si trascura la fase e le relazioni tra i tre parametri vengono stabilite unicamente dalla pulsazione  $\omega=2\pi f$ .



La seguente figura mostra un grafico della velocità ad andamento costante per tutto lo spettro di frequenze, con le corrispondenti curve di spostamento e accelerazione.

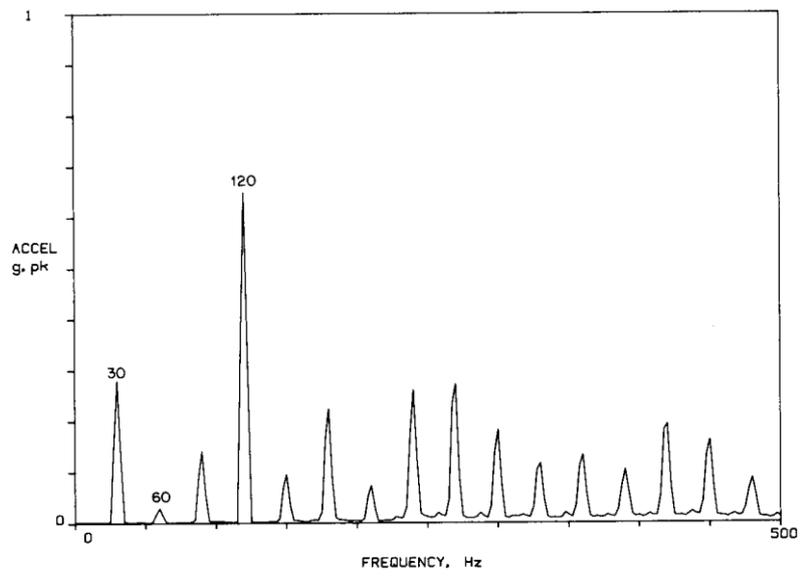
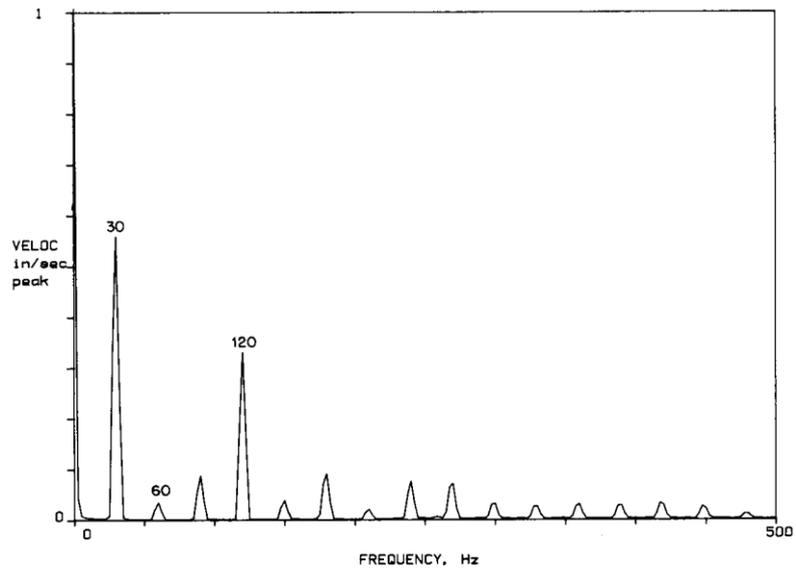
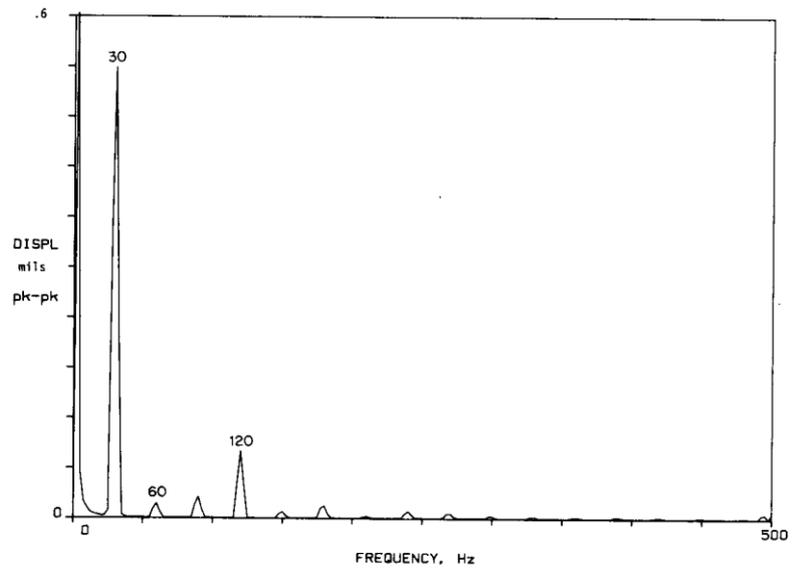


L'ampiezza di vibrazione in termini di spostamento accentua le componenti a bassa frequenza rispetto a quelle ad alta frequenza. Viceversa, l'accelerazione enfatizza le componenti ad alta frequenza. Le tre curve coprono un intervallo di frequenza da 1 a 1000 Hz, che coincide con il l'intervallo di interesse delle vibrazioni meccaniche.

Per misure a bassa frequenza (<1 Hz ) conviene sempre rilevare spostamenti; mentre per misure ad alta frequenza (>100 Hz) conviene sempre rilevare accelerazioni.

Le normative ISO che valutano gli effetti delle vibrazioni sul corpo umano (ISO 2631-1 – Evaluation of human exposure to whole body vibration) o sul sistema mano-braccio (UNI EN ISO 5349-1 – Vibrazioni meccaniche - Misurazione e valutazione dell'esposizione dell'uomo alle vibrazioni trasmesse alla mano) impongono la misura dell'accelerazione come grandezza di riferimento per stimare la vibrazione, rispettivamente nel range 0.5-80 Hz nel caso del corpo intero (ad esclusione degli effetti legati al “mal di mare”) e nel range 8-1000 Hz per il sistema mano-braccio. In tutti i campi in cui la misura delle vibrazioni è effettuata in relazione agli effetti sul corpo umano la grandezza misurata è sempre l'accelerazione. La stima degli effetti delle vibrazioni sull'integrità strutturale degli edifici (UNI 9916:2004 – Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici) si basa invece sulla misura della velocità nell'intervallo di frequenza 1-250 Hz.

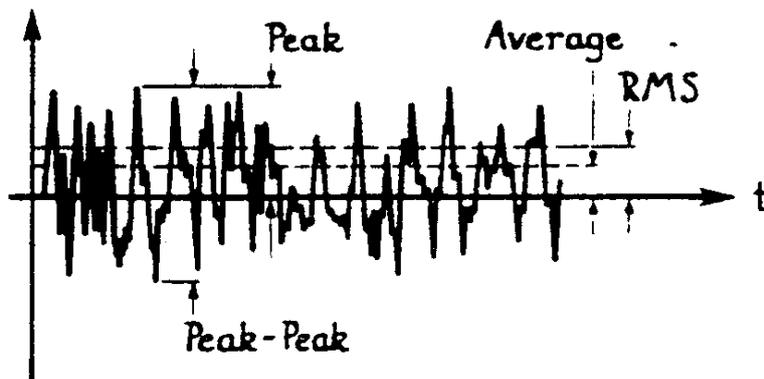
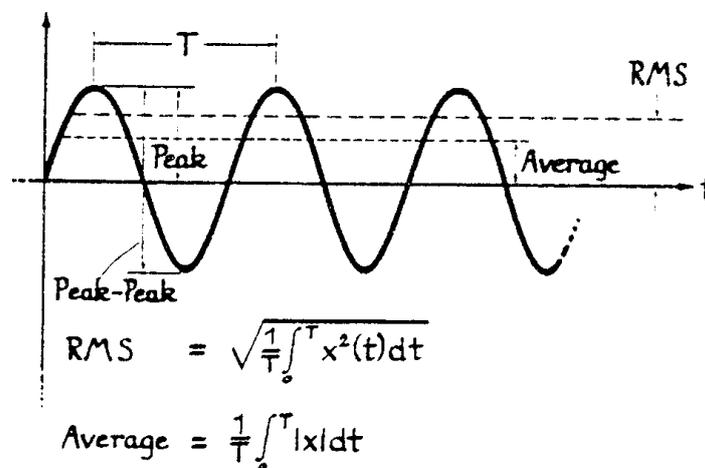
A titolo di esempio, nelle seguenti figure è mostrato lo spettro in frequenza dello stesso fenomeno vibratorio rappresentato rispettivamente in termini di spostamento, velocità e accelerazione. Si noti la variazione dell'ampiezza dei picchi a 30 e a 120 Hz; alcuni picchi sopra i 120 Hz, non visibili nel diagramma degli spostamenti, compaiono in quello delle accelerazioni. Il picco a 60 Hz ha approssimativamente la stessa ampiezza in tutti i diagrammi e può quindi essere assunto come riferimento nello spettro di frequenza.



#### 4. Livelli di vibrazione nel dominio del tempo

L'analisi di un segnale di vibrazione espresso in termini di accelerazione nel dominio del tempo viene condotta calcolando diversi parametri di sintesi, che ne consentono la quantificazione del livello da confrontarsi con i livelli di riferimento eventualmente normati. Questi parametri sono:

- **picco-picco (peak-to-peak)**, indica l'escursione massima dell'onda (sollecitazione massima, gioco meccanico)
- **picco (peak)**, indica l'escursione massima positiva o negativa della vibrazione (urti di breve durata);



- **RMS (Root Mean Square = valore medio efficace)**, è la misura più significativa di ampiezza in quanto tiene conto della storia dell'onda nel tempo e dà un valore di ampiezza direttamente correlata al contenuto energetico della vibrazione:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

dove con  $x(t)$  si è indicato l'andamento del segnale in funzione del tempo e  $T$  è la durata del segnale stesso. Nel caso di una grandezza sinusoidale di ampiezza  $A$  il suo valore efficace RMS vale:

$$RMS = \frac{A}{\sqrt{2}} \approx 0,707A$$

Nel caso di segnali digitali costituiti da  $N$  campioni il valore RMS si valuta mediante la seguente espressione:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$$

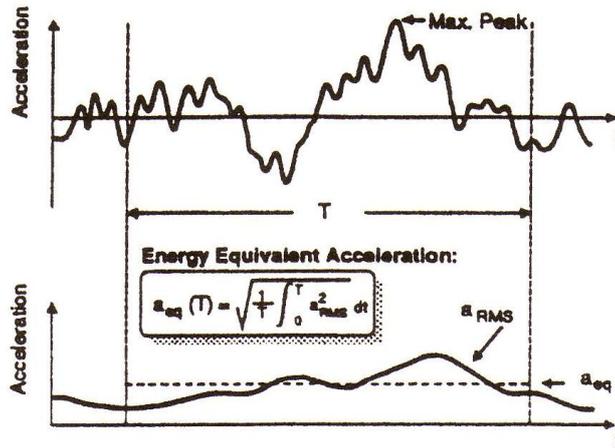
- **valore medio (Average)**, tiene conto della storia dell'onda nel tempo ma ha scarso interesse pratico non essendo correlato ad alcuna grandezza fisica:

$$Avg = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt} \quad \text{per segnali continui}$$

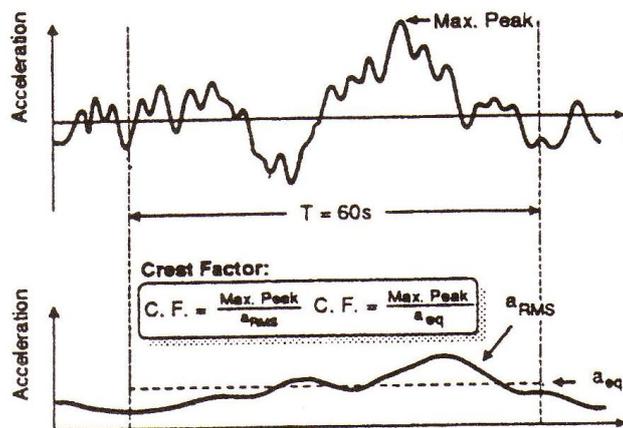
$$Avg = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad \text{per segnali discreti}$$

Con esplicito riferimento alle misure di accelerazione, la durata  $T$  della misura viene suddivisa solitamente in intervalli  $T_i$  per ciascuno dei quali viene calcolato il corrispondente valore RMS. La base di misura per il calcolo del valore di RMS in media mobile è solitamente di 1 s. In tal modo è possibile plottare l'andamento del valore RMS nel tempo e verificarne la correlazione con eventuali picchi locali di ampiezza. Si definisce  **$a_{eq}$ , l'accelerazione equivalente all'energia della vibrazione**, la media lineare del valore efficace calcolata in un intervallo di tempo  $T$ :

$$a_{eq} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_{RMS}^2(t) dt}$$



Il **fattore di cresta** viene definito come il rapporto tra il valore di picco e il valore RMS o il rapporto tra il valore di picco e il valore di  $a_{eq}$ . Fenomeni a carattere impulsivo (urti) presenteranno fattori di cresta rilevanti e il picco massimo o il valore picco-picco saranno gli indici maggiormente correlati al disturbo.



I *livelli di vibrazione* possono essere espressi, oltre che in unità metriche, in grandezze logaritmiche; la scala impiegata è quella del *decibel* (dB). Esso è dato dal logaritmo del rapporto tra il livello efficace quadrato misurato ed un livello di riferimento standard, pertanto è una grandezza adimensionale:

$$dB = 10 \text{Log} \left( \frac{x^2}{x_{rif}^2} \right) = 20 \text{Log} \left( \frac{x}{x_{rif}} \right)$$

$x$  = livello efficace misurato;

$x_{rif}$  = livello di riferimento.

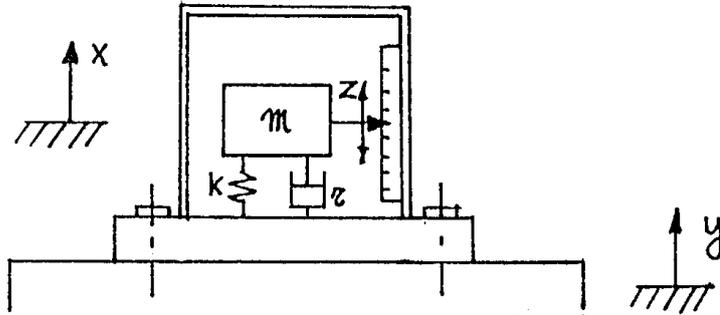
In tabella sono riportati i livelli di riferimento per i parametri accelerazione, velocità e forza, secondo lo standard ISO/DIS 1683-2.

Grandezza	Definizione	Livelli di riferimento ISO
Livello accelerazione vibrazione	$L_a = 20 \log_{10}(a/a_0) \text{ dB}$	$a_0 = 10^{-6} \text{ m/s}^2$
Livello velocità vibrazione	$L_v = 20 \log_{10}(v/v_0) \text{ dB}$	$v_0 = 10^{-9} \text{ m/s}$
Livello vibrazione di forze	$L_F = 20 \log_{10}(F/F_0) \text{ dB}$	$F_0 = 10^{-6} \text{ N}$

L'impiego di scale logaritmiche per la rappresentazione delle vibrazioni è molto diffuso nella pratica di misura se il segnale è espresso in banda larga (banda d'ottava o 1/3 di banda d'ottava), in particolare se occorre applicare particolari filtri di pesatura in frequenza come quelli imposti dalle normative ISO 2631 e 5349. Uno dei vantaggi offerti è quello di poter comprimere entro una scala ragionevolmente ridotta una gamma di valori molto estesa; si sortisce, infatti, l'effetto di dilatare sul grafico le frequenze o i valori di ampiezza più bassi e di comprimere quelli più elevati, dando così la stessa percentuale di risoluzione sull'intero grafico, pur mantenendo le dimensioni entro limiti ragionevoli.

## 5. Trasduttori per la misura delle vibrazioni

Il seguente disegno mostra l'elemento base di un trasduttore per la misura delle vibrazioni.



L'equazione del moto espressa in coordinate relative ( $z=x-y$ ) è del tipo:

$$m\ddot{z} + r\dot{z} + kz = -m\ddot{y}$$

Assumendo uno spostamento armonico del vincolo  $y = Y e^{i\Omega t}$  si ottiene una soluzione a regime di tipo armonico:  $z = \text{Re}(Z e^{-i\phi} e^{i\Omega t}) = Z \cos(\Omega t - \phi)$

avente ampiezza di spostamento:

$$\frac{Z}{Y} = \frac{m\Omega^2}{\sqrt{(k - m\Omega^2)^2 + (r\Omega)^2}} = \frac{a^2}{\sqrt{(1 - a^2)^2 + (2ah)^2}}$$

ampiezza di accelerazione:

$$\frac{Z}{\Omega^2 Y} = \frac{1}{\omega_0^2 \sqrt{(1 - a^2)^2 + (2ah)^2}}$$

angolo di fase:

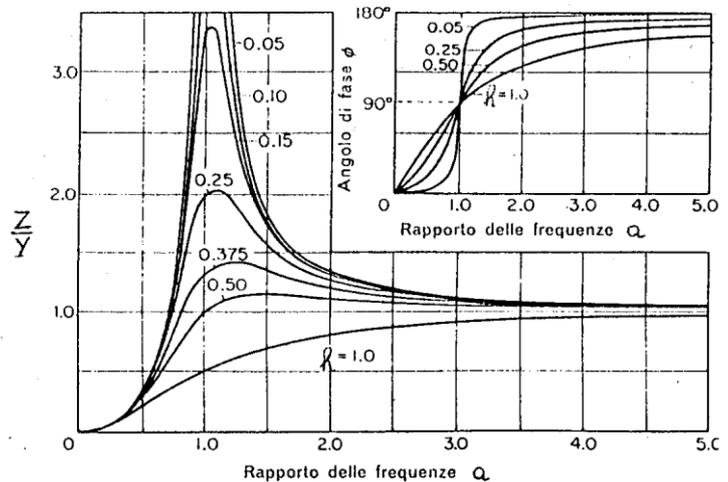
$$\phi = \arctan \frac{r\Omega}{k - m\Omega^2} = \arctan \left( \frac{2ah}{1 - a^2} \right)$$

essendo:

$$a = \frac{\Omega}{\omega_0} \text{ il parametro adimensionale di frequenza}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ la pulsazione propria dello strumento}$$

$$h = \frac{r}{r_{crit}} = \frac{r}{2m\omega_0} \text{ il parametro adimensionale di smorzamento}$$



Per  $a \gg 1$  (zona detta sismografica), ovvero  $\Omega \gg \omega_0$ , il rapporto  $Z/Y$  tende all'unità indipendentemente dal valore di  $h$ . In questo caso lo spostamento relativo ha ampiezza  $Z$  uguale a quella  $Y$  del corpo a cui è connesso il trasduttore ma è in opposizione di fase, ovvero l'ampiezza dello spostamento assoluto  $x$  della massa sismica tende a zero.

Uno strumento siffatto, avente  $\omega_0$  molto ridotta e funzionante sempre a frequenza superiore alla propria risonanza, è chiamato vibrometro o sismografo. Dovendo risultare  $\omega_0 \ll \Omega$  la massa dello strumento deve essere considerevole e ciò comporta un errore di inserzione inaccettabile se la massa del corpo di cui si vuole misurare la vibrazione è piccola. Inoltre la rigidezza  $k$  deve essere sufficientemente piccola per potere stimare lo spostamento relativo senza incorrere in errori di misura. La misura dello spostamento relativo tra la massa sismica e la cassa dello strumento può essere effettuata mediante trasduzione meccanica (in disuso) o mediante trasduzione elettrica (vibrometri capacitivi, induttivi, estensimetrici, velocimetri).

Per  $a \ll 1$  e  $\omega_0 \gg \Omega$  segue che:

$$Z = \frac{\Omega^2 Y}{\omega_0^2} = \frac{\text{accelerazione}}{\omega_0^2}$$

$Z$  è proporzionale all'accelerazione del corpo e tale strumento viene chiamato **accelerometro**. Se si vuole un accelerometro con grande banda passante è necessario utilizzare una massa molto piccola ed una rigidezza molto elevata, rendendo difficoltoso il rilevamento di  $Z$ .

Questo problema è stato ovviato utilizzando il fenomeno della piezoelettricità e misurando la forza trasmessa dall'elemento elastico smorzante invece dello spostamento. Riscrivendo opportunamente l'equazione del moto si ottiene:

$$m\ddot{z} + m\dot{y} = -r\dot{z} - kz = F$$

Ovvero la forza trasmessa attraverso dall'elemento molla smorzatore è data dalla somma dei due termini inerziali dovuti all'accelerazione relativa della massa e all'accelerazione assoluta del vincolo. Se lo strumento opera in zona quasi statica ( $a \ll 1$  e  $\omega_0 \gg \Omega$ ) l'accelerazione relativa della massa è trascurabile e dunque l'accelerazione assoluta del corpo di cui si vuole misurare la vibrazione si ottiene come rapporto tra la forza misurata e la massa sismica:

$$\ddot{y} = \frac{-r\dot{z} - kz}{m} - \ddot{z} \approx \frac{F}{m}$$

## 6. Piezoelettricità

La piezoelettricità è la proprietà di alcuni cristalli di generare una differenza di potenziale quando sono soggetti ad una deformazione meccanica. Tale effetto è reversibile e si verifica su scale dell'ordine dei nanometri. Il funzionamento di un cristallo piezoelettrico è abbastanza semplice: quando viene applicata una pressione (o decompressione) esterna, si posizionano, sulle facce opposte, cariche di segno opposto. Il cristallo si comporta come un condensatore al quale è stata applicata una differenza di potenziale. Se le due facce vengono collegate ad un circuito elettrico esterno, viene quindi generata una corrente elettrica detta corrente piezoelettrica. Al contrario, quando si applica una differenza di potenziale al cristallo, esso si espande o si contrae.

Si consideri un cristallo di quarzo tagliato in direzione opportuna. Sollecitando il cristallo con due forze  $F$  di compressione (o trazione o taglio) nascono sulle facce maggiori cariche elettriche proporzionali alla sollecitazione:

$$Q = d_{ij} F$$

$d_{ij}$  = costante piezoelettrica

Come detto, il cristallo si comporta come un condensatore con le due cariche  $+Q$  e  $-Q$  affacciate:

$$Q = CV$$

La capacità del condensatore è uguale a:  $C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d}$

essendo

$\epsilon_0$  = costante dielettrica del vuoto;  $\epsilon_r$  = costante dielettrica relativa del quarzo;

$S$  = superficie delle facce;  $d$  = distanza tra le facce.

Collegando il condensatore all'interno di un circuito elettrico la differenza di potenziale tra le due facce risulta proporzionale alla forza applicata e dunque all'accelerazione del corpo da misurare:

$$V = d_{ij} \frac{F}{C} = d_{ij} \frac{d}{\epsilon_0 \epsilon_r S} F = d_{ij} \frac{d}{\epsilon_0 \epsilon_r S} m\ddot{y}$$

## 7. Schema costruttivo di un accelerometro piezoelettrico con uscita in carica

L'elemento piezoelettrico è disposto in modo che quando il gruppo viene fatto vibrare la massa "m" applica all'elemento piezoelettrico una forza proporzionale all'accelerazione di vibrazione. Dunque, la carica a capi del condensatore in uscita dall'accelerometro è proporzionale all'accelerazione del corpo da misurare:

$$Q = d_{ij} m \ddot{y}$$

La costante di proporzionalità, detta sensibilità del trasduttore, è dipendente linearmente dalla costante di proporzionalità del materiale piezoelettrico e dall'entità della massa sismica.

L'elemento piezoelettrico è usualmente una ceramica ferroelettrica polarizzata artificialmente (come il Titanato di bario, BaTiO<sub>3</sub>, o lo Zirconato Titanato di Piombo, PZT). L'accelerometro può essere realizzato, come quello rappresentato nella seguente figura, per misurare le vibrazioni solo lungo un'asse (solitamente individuato dall'asse del cilindro, se il trasduttore ha forma cilindrica, o indicato da una freccia applicata ad una delle facce del trasduttore, se questo ha forma cubica). L'elemento piezoelettrico può essere sollecitato a compressione o a taglio. Esistono anche accelerometri triassiali al cui interno vengono disposti più cristalli sollecitati lungo tre direzioni mutuamente ortogonali.

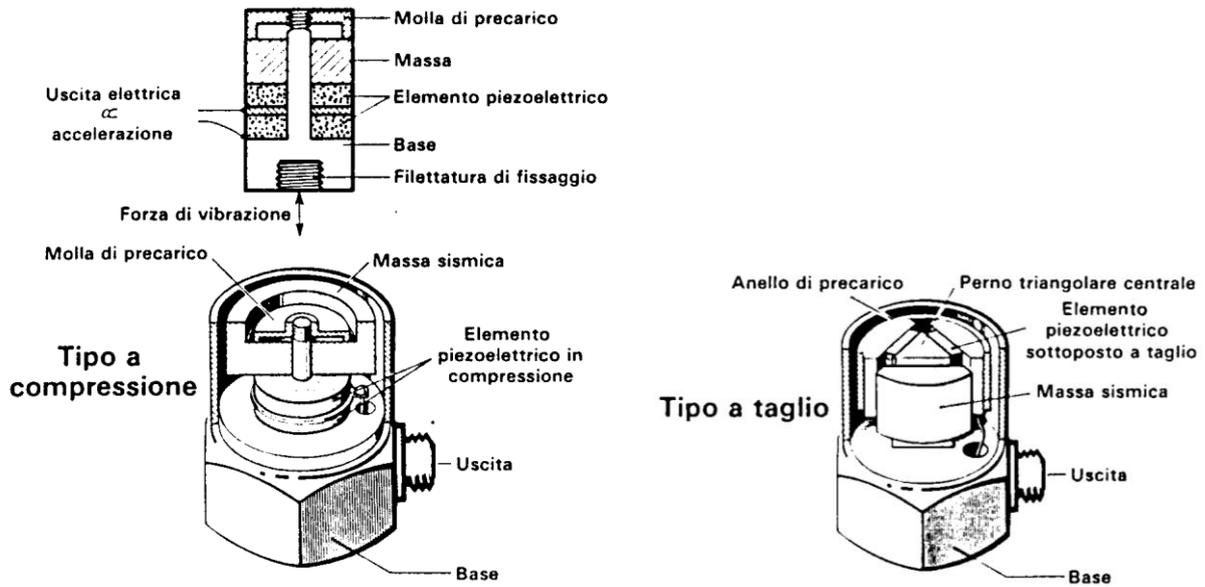
L'accelerometro piezoelettrico offre molteplici vantaggiose caratteristiche, quali:

- ha una ampia banda passante (1-30000 Hz) come meglio spiegato in seguito;
- è robusto e affidabile, con caratteristiche stabili per lunghi periodi di tempo;
- può resistere a sollecitazioni di shock molto elevate;
- non contiene parti mobili soggette ad usura.

Di contro presenta alcune limitazioni di utilizzo, quali:

- impossibilità nel misurare accelerazioni statiche;
- difficoltà nelle misure a frequenza inferiore a 1 Hz (solo alcuni tipi riescono ad arrivare con specifico condizionamento a frequenze di 0.1-0.2 Hz);
- nei tipi convenzionali con uscita in carica, i cavi di collegamento sono un elemento critico della catena di misura per i motivi illustrati in seguito.

## Accelerometri monoassiali



040123



040122



## Accelerometri triassiali



040130



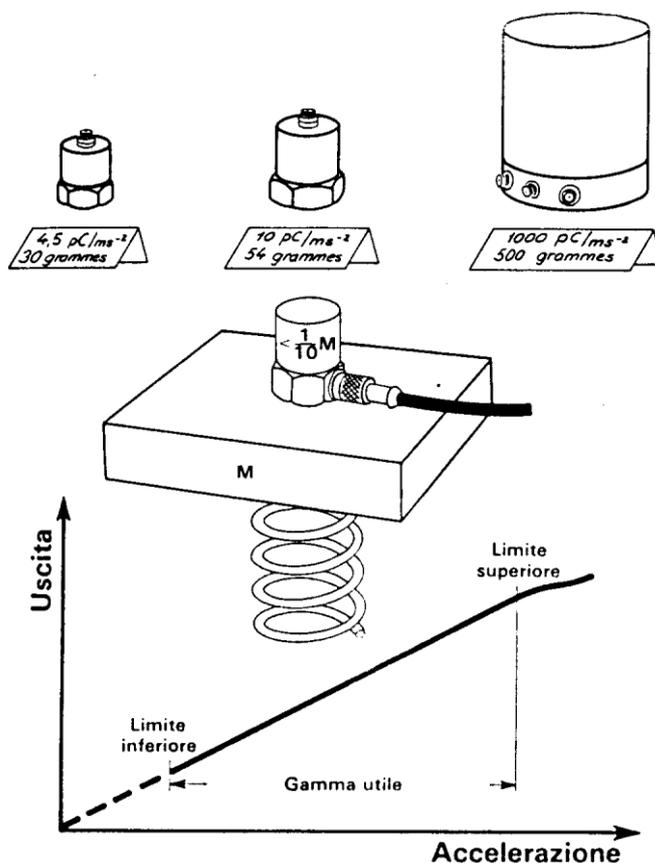
## 8. Caratteristiche degli accelerometri piezoelettrici con uscita in carica

Di seguito sono descritte le principali caratteristiche di un accelerometro piezoelettrico con uscita in carica.

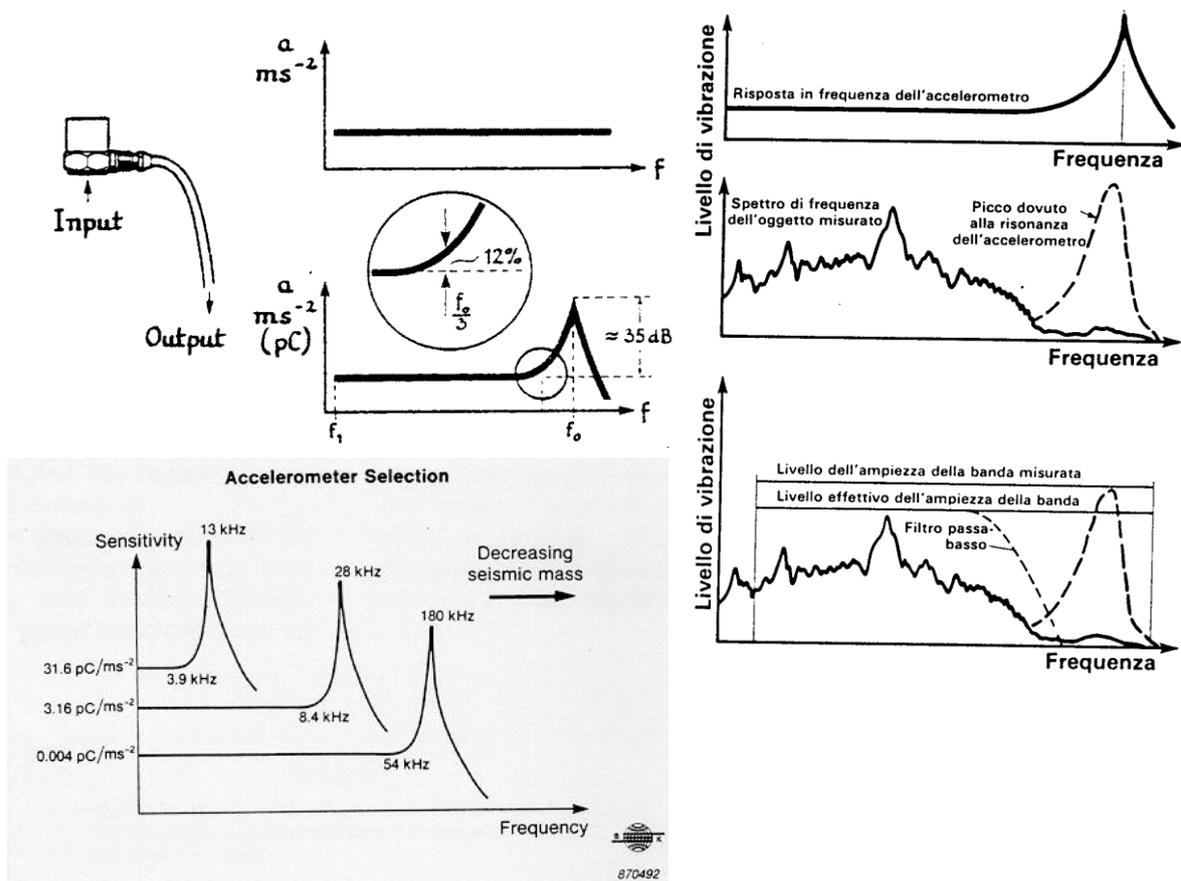
**Sensibilità** [ $\text{pC}/(\text{m}/\text{s}^2)$ ]: la sensibilità cresce al crescere delle dimensioni del gruppo piezoelettrico e della massa sismica (strumento più pesante e ingombrante); per ovviare a ciò il segnale in uscita viene inviato ad un preamplificatore, che ha la funzione di realizzare il circuito elettrico per trasformare le cariche in d.d.p. e amplificare il segnale. Nei tipi per impiego generico la sensibilità varia tra 1 e  $10 \text{ pC}/\text{ms}^{-2}$ .

**Massa** [g]: non deve superare  $1/10$  della massa della parte vibrante sulla quale è montato l'accelerometro, per non modificare le proprietà dinamiche del corpo da misurare.

**Gamma dinamica**: l'accelerometro fornisce in uscita un segnale elettrico direttamente proporzionale all'accelerazione in un campo dinamico molto ampio ( $1:10^8$ ). Il limite inferiore (LI) è imposto dal rumore elettrico introdotto dai cavi e dal circuito amplificatore ( $\text{LI}=1/100 \text{ m}/\text{s}^2$  negli strumenti per impiego generico). Il limite superiore (LS) è determinato dalla resistenza strutturale dell'accelerometro ( $\text{LS}=50000\text{-}100000 \text{ m}/\text{s}^2$  negli strumenti per impiego generico).

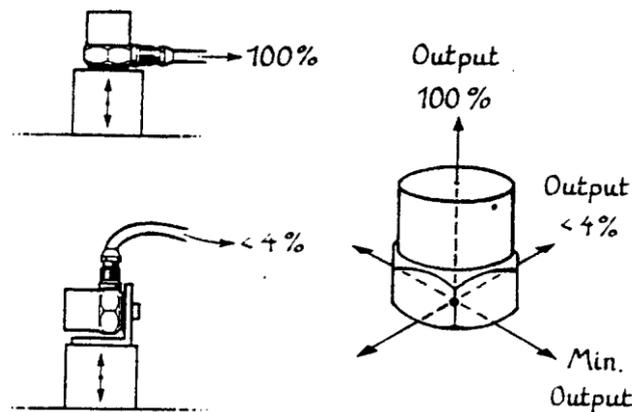


**Gamma in frequenza o banda passante:** il segnale in uscita si mantiene costante al variare della frequenza, a partire da frequenze di 1-2 Hz (per strumenti di impiego generico) fino ad un limite imposto dalla risonanza dell'accelerometro, in corrispondenza della quale si ha un aumento del segnale. Come regola pratica un accelerometro si può utilizzare fino ad un terzo della sua frequenza di risonanza, considerando anche l'eventuale riduzione di frequenza dovuta al montaggio (come specificato nel paragrafo seguente). In tal caso l'errore è inferiore al 12% circa ( $f_0=20-30$  kHz, per impiego generico). Se la vibrazione da misurare contiene delle componenti nella zona intorno alla frequenza risonante si otterrà una misura non corretta. Questo problema viene superato scegliendo un accelerometro che abbia una banda passante sufficientemente ampia e utilizzando un filtro passa-basso (solitamente compreso nel preamplificatore) per tagliare i segnali indesiderati provocati dal picco di risonanza dello strumento.



L'impiego alle basse frequenze è limitato dalle caratteristiche del circuito in cui è inserito il cristallo come condensatore, dai cavi di collegamento, dalle fluttuazioni della temperatura ambiente e dal taglio operato dal preamplificatore. Generalmente, solo con i tipi con il cristallo sollecitato a taglio e con speciali circuiti di condizionamento si può scendere al di sotto di 1Hz (anche fino a 0.2 Hz), mentre per i tipi standard il limite inferiore di frequenza si attesta intorno a 1.5-2 Hz.

**Sensibilità trasversale:** la massima sensibilità di un accelerometro monoassiale si ha perpendicolarmente alla sua base di appoggio (asse di sensibilità). Anche trasversalmente un accelerometro presenta una certa sensibilità che è inferiore al 4% della sensibilità massima. La direzione di minima sensibilità trasversale viene solitamente indicata sull'accelerometro con un punto di vernice rossa.



## 9. Conversione della carica in differenza di potenziale

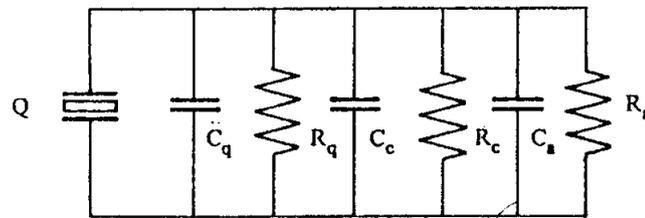
Affinché sia possibile convertire le cariche generate nel cristallo piezoelettrico in una differenza di potenziale misurabile e registrabile è necessario che il cristallo piezoelettrico sia inserito all'interno di un apposito circuito. Negli accelerometri piezoelettrici convenzionali con uscita in carica, questo circuito è esterno all'accelerometro 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" per i motivi descritti in seguito.



I cavi di collegamento tra l'accelerometro 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 dell'accelerometro 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.

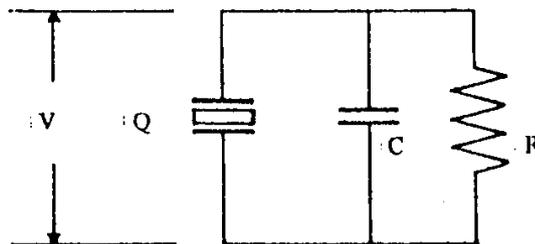


Assumendo:

$$C = C_q + C_c + C_a$$

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

si ottiene il seguente circuito equivalente:



La tensione  $V$  all'uscita dell'accelerometro all'istante  $t$ , detta  $V_0$  la d.d.p. all'istante iniziale, vale:

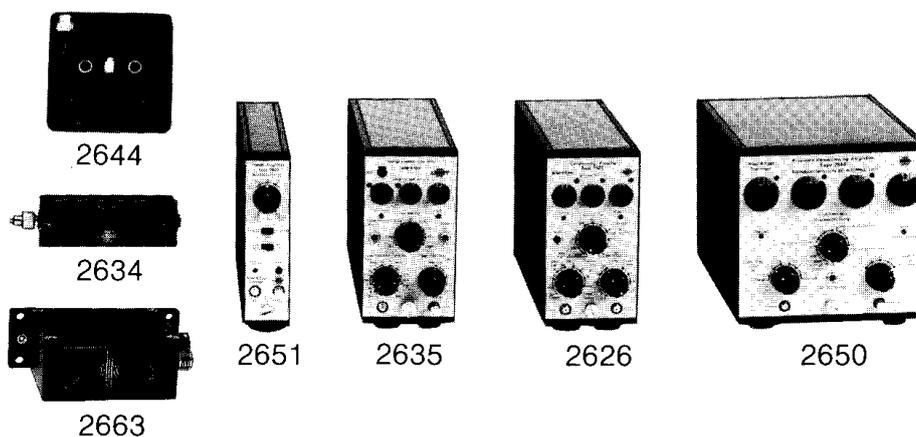
$$V = V_0 e^{-\frac{t}{RC}}$$

Se il prodotto  $RC$  non è molto maggiore del periodo del segnale da misurare, il condensatore si scarica, rendendo impossibile o falsando la misura. 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 accelerometro 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:

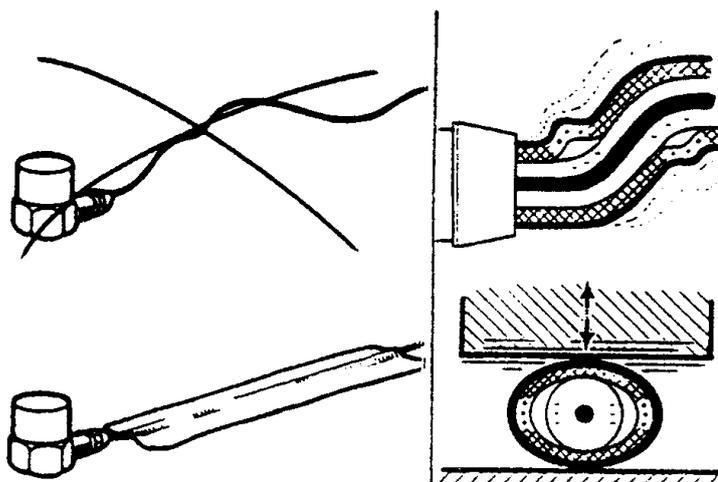
- possibilità di selezionare su di essi la sensibilità del trasduttore;
- regolazione del guadagno;
- integratore elettronico, per convertire l'uscita proporzionale all'accelerazione in segnali di velocità o di spostamento;
- filtri passa-basso, passa-alto o passa-banda, per selezionare i limiti inferiore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



## 10. Influenza dei cavi di collegamento nella catena di misura ad alta impedenza

Gli accelerometri piezoelettrici che presentano un'elevata impedenza d'uscita possono presentare dei problemi legati al rumore indotto nel cavo di collegamento. Questi disturbi possono dare luogo a:

- correnti verso terra: sono presenti in quanto l'accelerometro e l'apparato di misura sono collegati a terra separatamente; si evitano isolando elettricamente la base dell'accelerometro (perno isolante e rondella di mica);
- rumore triboelettrico: viene indotto nel cavo dal movimento meccanico del cavo stesso, si evita nastrandolo e incollando il cavo il più vicino possibile all'accelerometro (operazione non sempre fattibile);
- rumore elettromagnetico: viene indotto nel cavo se si trova in prossimità di un macchinario in movimento; in questo caso si può optare per cavi con doppia schermatura.

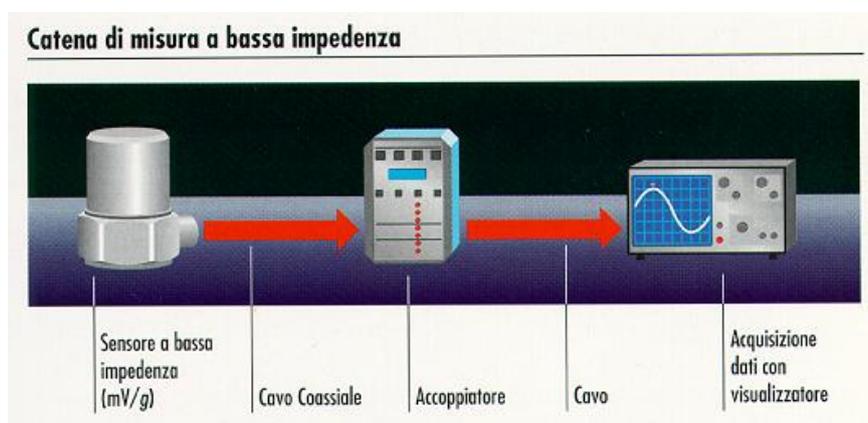


## 11. Accelerometri ICP (Integrated Circuit Piezoelectric) e catena di misura a bassa impedenza

La principale limitazione nell'utilizzo degli accelerometri con uscita in carica risiede nel fatto che il preamplificatore deve essere montato nelle vicinanze del trasduttore, poiché la lunghezza del cavo che porta le cariche non può eccedere qualche metro per non ridurre troppo l'impedenza del circuito di ingresso. Inoltre certi tipi di misure presuppongono l'impossibilità materiale di fissare il cavo e i movimenti dello stesso possono influenzare sensibilmente la misura.

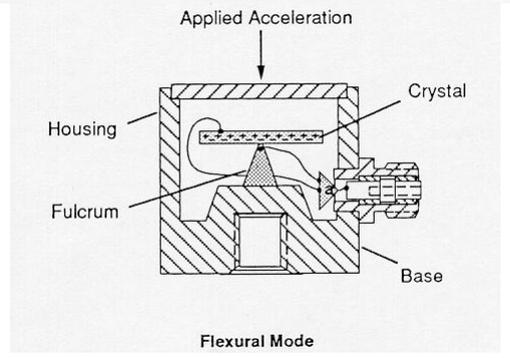
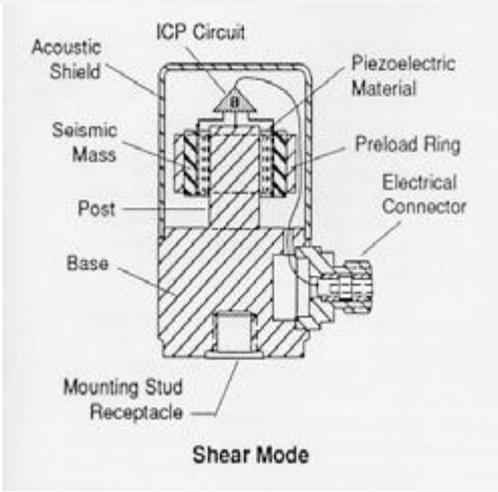
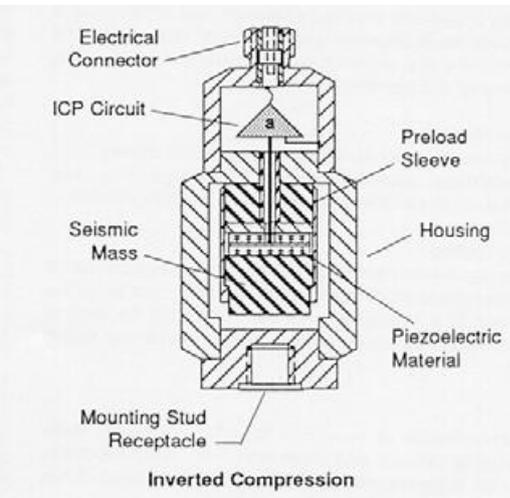
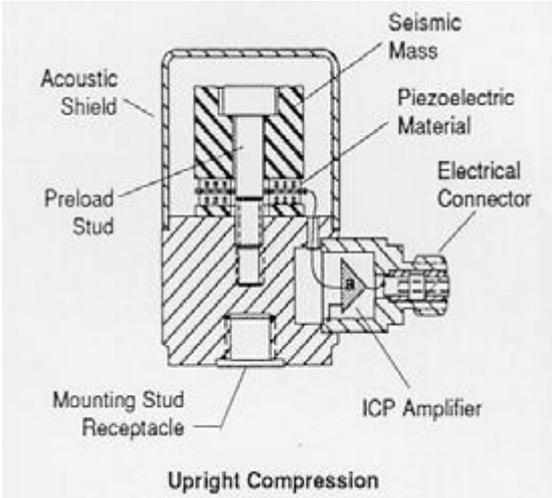
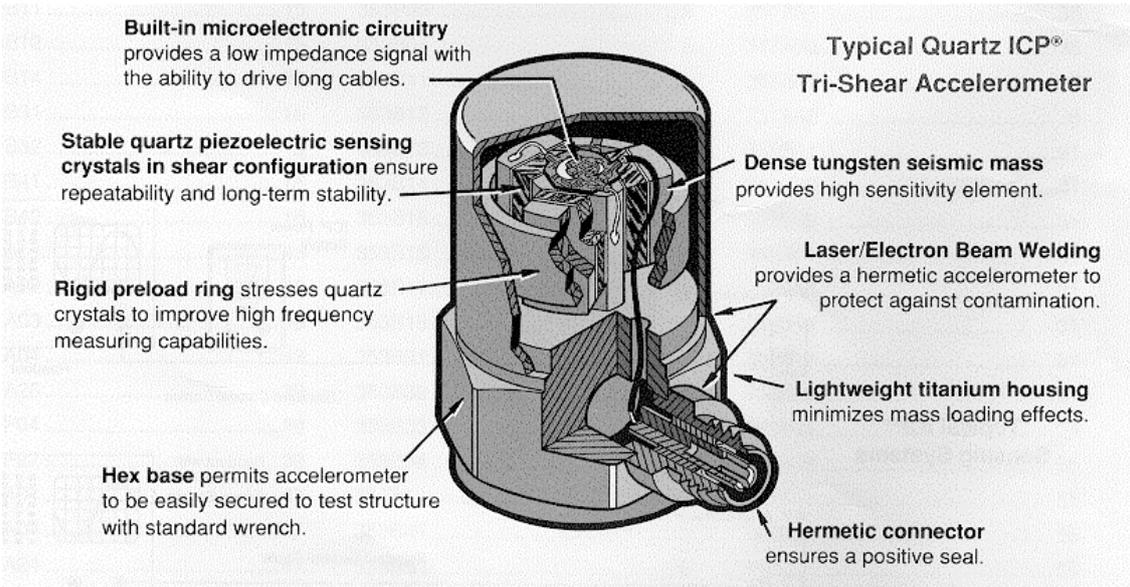
Per ovviare a queste limitazioni, da circa un decennio sono stati introdotti nel mercato degli accelerometri con un circuito elettronico integrato all'interno del trasduttore; essi sono contrassegnati dalla sigla ICP, acronimo di Integrated Circuit Piezoelectric.

Gli accelerometri ICP non necessitano pertanto di preamplificatore esterno, ma solo di un alimentatore esterno a corrente continua. Il segnale in uscita dall'accelerometro 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.

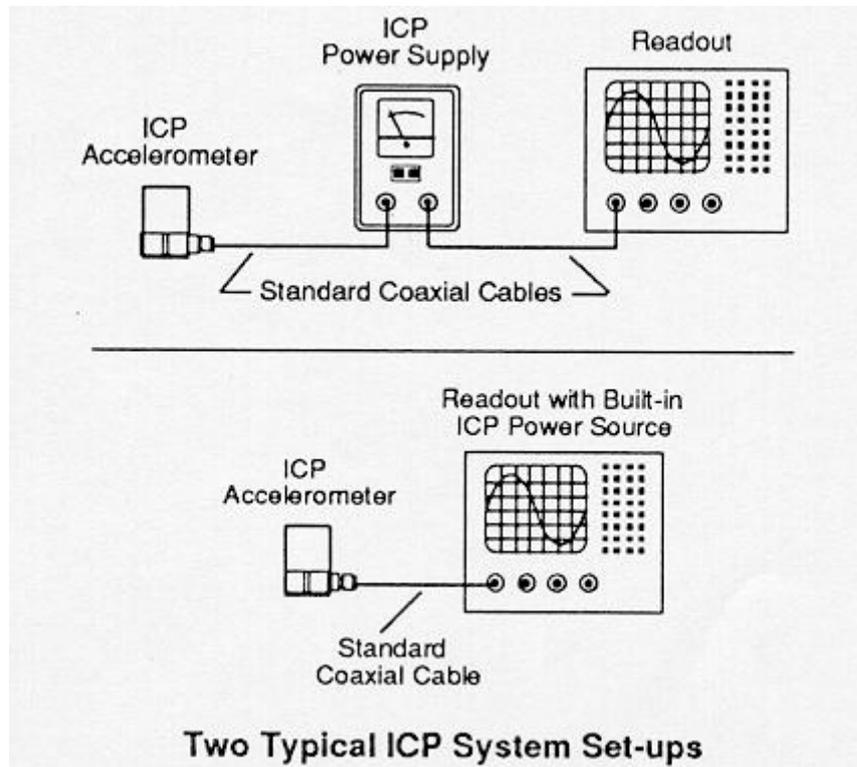


Negli accelerometri ICP il segnale in uscita dal trasduttore è come detto una tensione e pertanto la sensibilità del trasduttore si misura in  $\text{mV}/(\text{m}/\text{s}^2)$  (milliVolt al metro secondo quadro) o in  $\text{mV}/\text{g}$  (milliVolt al g).

Nella pagina seguente sono illustrati gli schemi costruttivi di alcuni tipi di accelerometri ICP con differente sollecitazione del cristallo.



L'accelerometro ICP viene connesso alla sorgente di alimentazione mediante un semplice cavo coassiale, che può avere anche lunghezza dell'ordine della decina di metri. La sorgente deve fornire una tensione continua tra 18 e 30 V. Molti sistemi di acquisizione permettono di alimentare direttamente gli accelerometri di tipo ICP e la sorgente di alimentazione può essere omessa.

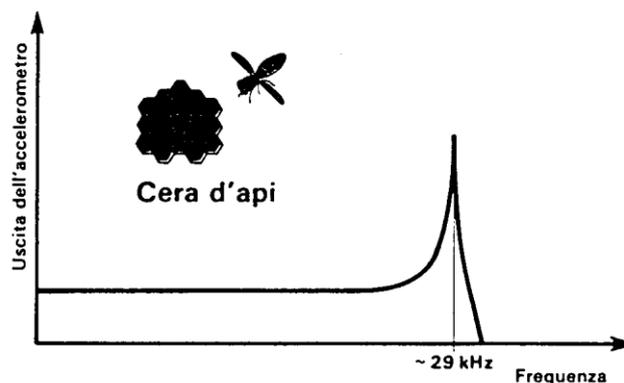
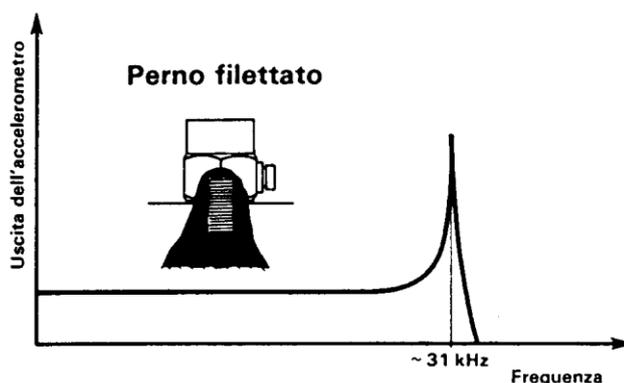


## 12. Montaggio degli accelerometri

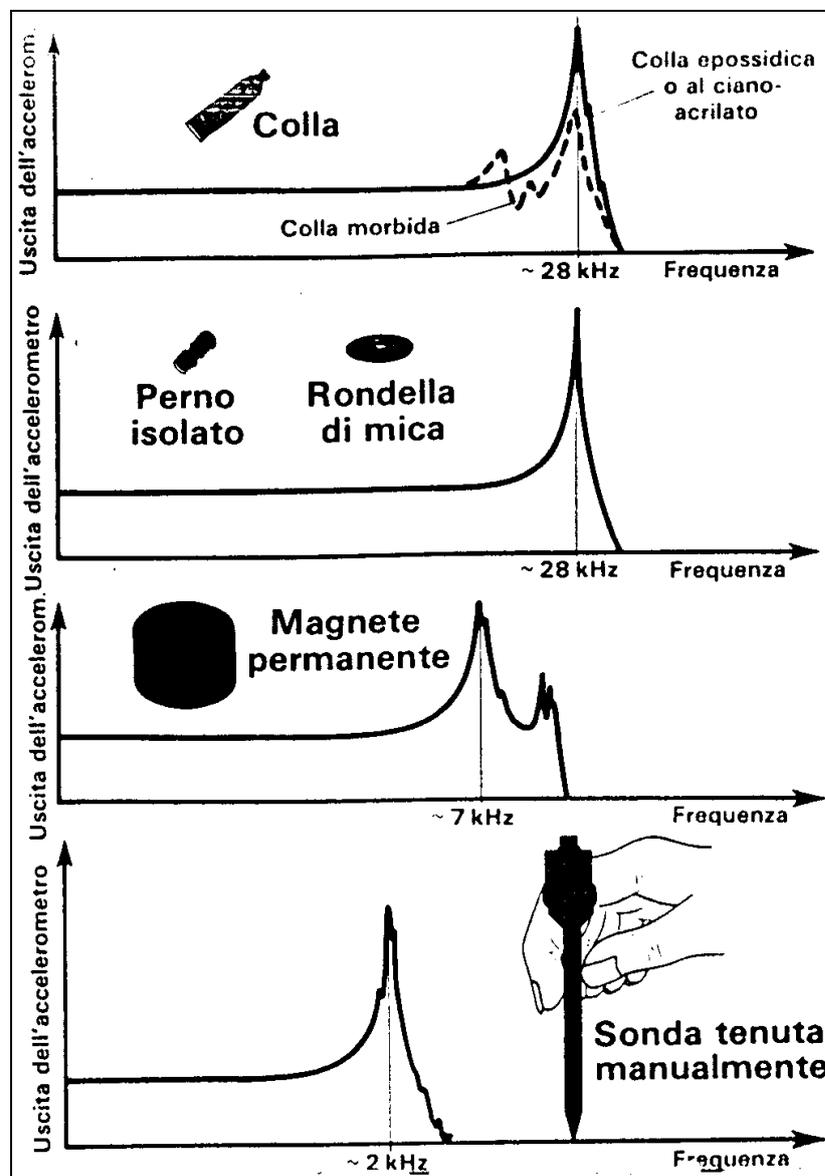
L'accelerometro deve essere montato in modo tale che la direzione desiderata di misura coincida con il suo asse principale di sensibilità. Il requisito principale per un corretto montaggio è costituito da un perfetto accoppiamento meccanico tra la base dell'accelerometro e la superficie sulla quale è attaccato.

### Principali metodi di montaggio

- Perno filettato: è il miglior montaggio in assoluto poiché la frequenza risonante raggiunta è quasi coincidente a quella misurata durante la calibratura.
- Cera d'api: si applica un sottile strato per incollare la base dell'accelerometro; è utile per montaggi rapidi, abbassa maggiormente la frequenza di risonanza, permette misure in un certo campo di accelerazione e temperatura ( $a_{\max}=100 \text{ m/s}^2$ ,  $T_{\max}=40^\circ\text{C}$ ).



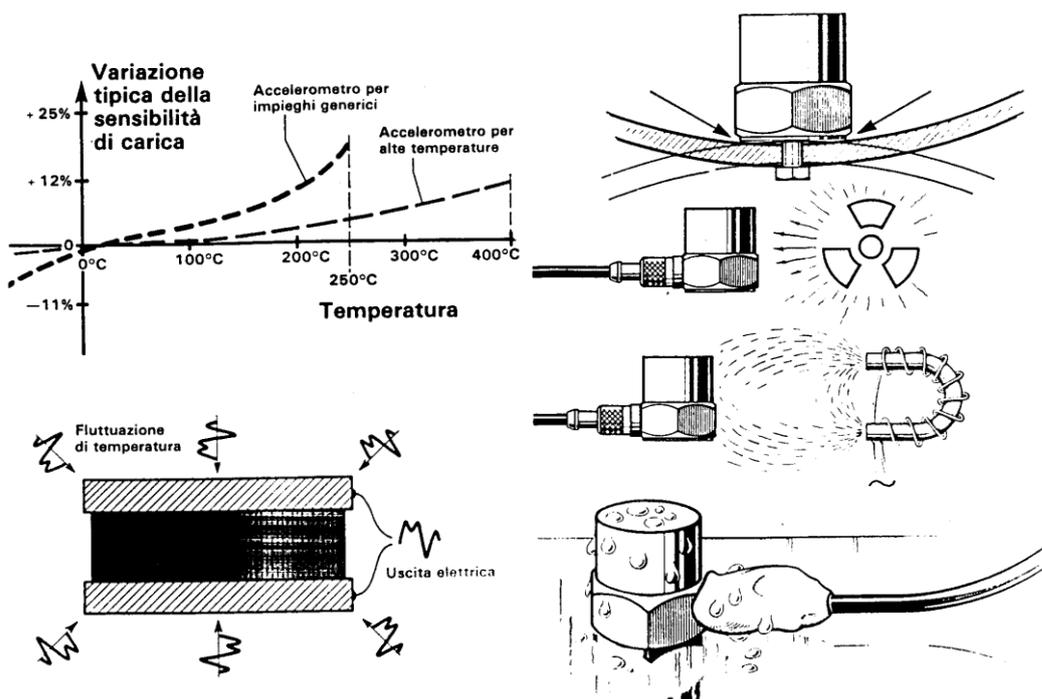
- Perno incollato: si utilizza un dischetto metallico munito di perno da incollare con colla epossidica o cianoacrilica.
- Perno isolato e rondella di mica: si ricorre a tale metodo quando l'accelerometro deve essere isolato elettricamente.
- Magnete permanente: è un metodo veloce e di facile realizzazione che però limita il campo utile di frequenza a circa 2,5 kHz e il campo dinamico a circa 100-200 m/s<sup>2</sup> per la limitata forza di attrazione del magnete.
- Sonda impugnata manualmente: è un metodo grossolano, ma comodo per una rapida indagine preliminare a volte utile nella scelta del punto di misura ottimale ove verrà realizzato il montaggio stabile con uno dei metodi suddetti.



### 13. Influenza delle condizioni ambientali

Alcuni parametri ambientali possono introdurre degli errori nella misura che possono essere compensati qualora il costruttore del trasduttore fornisca dei dati specifici.

**Effetto della temperatura ambiente:** gli accelerometri per impiego generico possono tollerare temperature fino a 250°C, oltre tale limite si riscontrano alterazioni permanenti della sensibilità. Gli accelerometri con uscita in carica sono solitamente corredati di una curva di calibratura sensibilità/temperatura per correggere i valori misurati a temperature superiori o inferiori a 20°C.



**Effetto dei transistori di temperatura:** si possono avere variazioni del segnale di uscita per piccole variazioni della  $T_{amb}$ ; ciò può rappresentare un problema solo per piccole ampiezze o basse frequenze.

**Deformazione della base:** in caso di elevate deformazioni occorre utilizzare accelerometri con basi rigide e spesse.

**Umidità:** gli accelerometri sono a tenuta stagna, l'umidità può entrare solo nel connettore; in presenza di forte umidità, quest'ultimo deve essere sigillato con silicone.

**Rumore acustico:** la sua influenza sul segnale in uscita è trascurabile.

**sostanze corrosive:** tutti gli accelerometri sono costruiti con materiali resistenti alla maggior parte delle sostanze corrosive

# 14. Carta di calibrazione di un accelerometro piezoelettrico

Gli accelerometro sono solitamente corredati della propria carta di calibrazione in cui vengono riportate le caratteristiche dello strumento e la curva di risposta in frequenza. La calibrazione viene effettuata dal costruttore per confronto con un accelerometro campione, determinando la sensibilità dello strumento a temperatura ambiente. E' opportuno effettuare una calibrazione periodica della sensibilità, anche se le sue variazioni sono in generale molto contenute (anche inferiori al 2% dopo diversi anni di funzionamento).

## Calibration Chart for Accelerometer Type 4383



Serial No. 1230172

Reference Sensitivity at 50 Hz, 100ms<sup>-2</sup> and 23 °C

Charge Sensitivity\* 3,12 pC/ms<sup>-2</sup> or 30,5 pC/g

Voltage Sensitivity\* (incl. AO 0038) 2,75 mV/ms<sup>-2</sup> or 24,9 mV/g (Voltage Preamp. input Capacitance: 3.5pF)

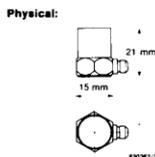
Capacitance (incl. cable) 1134 pF

Typical Capacitance of cable AO 0038 110 pF

Maximum Transverse Sensitivity (at 30 Hz, 100ms<sup>-2</sup>) 1,8 %

Typical Undamped Natural Frequency 51 kHz

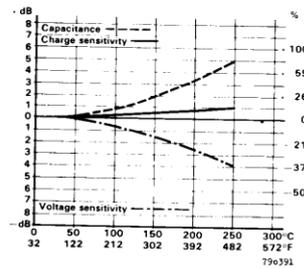
Environmental:  
 Humidity: Welded, Sealed  
 Temperature Range: -74 to +250°C (-100 to +482°F)  
 Max. Shock Acceleration: 20kms<sup>-2</sup> peak  
 Typical Magnetic Sensitivity (50 Hz - 0,03 T): 1ms<sup>-2</sup>/T  
 Typical Acoustic Sensitivity: 0,002ms<sup>-2</sup> at 154dB SPL (2 - 100 Hz)  
 Typical Base Strain Sensitivity (at 250µε in base plane): 0,01ms<sup>-2</sup>/µε  
 Typical Temperature Transient Sensitivity (3 Hz LLF): 0,1ms<sup>-2</sup>/°C  
 Specifications obtained in accordance with ANSI S2.11-1969



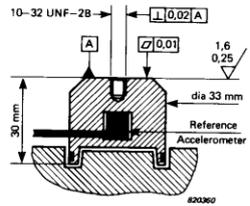
Electrical Connector: Coaxial 10 - 32 UNF-2A

Material: Titanium, ASTM Grade 2  
 Sensing Element: Piezoelectric, type PZ23  
 Weight: 17 gram  
 Construction: Delta Shear  
 Mounting Thread: 10 - 32 UNF-2B  
 Mounting Stud: 10 - 32 UNF-2A x13 mm, steel  
 Mounting Surface Flatness: <3µm  
 Mounting Torque: Normal 1,8Nm. Min. 0,5Nm. Max. 3,5Nm  
 Seismic Mass: 6,6 gram  
 Center of Gravity of Seismic Mass: 12,1mm from mounting surface on central axis  
 Center of Gravity of Accelerometer: 9,2mm from mounting surface on central axis  
 For further information see B&K "Piezoelectric Accelerometer and Preamplifier" handbook

## Typical Temperature Sensitivity Deviation: (Piezoelectric Material PZ23)



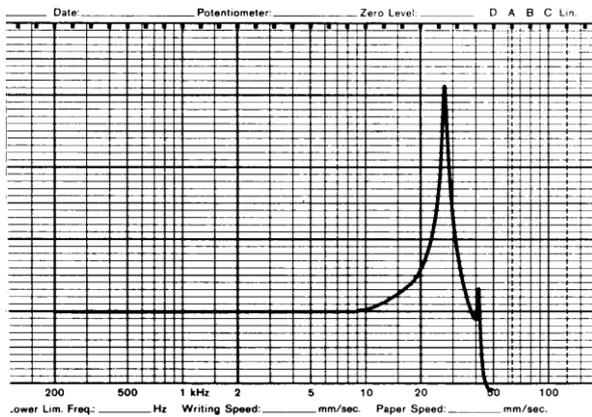
## Schematic Drawing of Exciter 4290: (Modified laboratory reference)



Material: Stainless steel  
 Mass of Exciter table: 180 gram

Mounting Technique:  
 Examine the mounting surface for cleanliness and smoothness.  
 If necessary, machine surface to tolerances shown in schematic drawing of Calibration Exciter 4290.  
 Fasten the 4383 using a 10 - 32 UNF-2A stud. Take care not to exceed the recommended mounting torque and that the stud does not bottom in the mounting holes.  
 A thin film of oil or grease between the accelerometer and the mounting surface helps achieve good contact and improves mounting stiffness.  
 For other types of mounting, see B&K "Piezoelectric Accelerometer and Preamplifier" handbook.

Mounted Resonance Frequency obtained on the Exciter 4290 using the recommended mounting technique is shown on the attached individual Frequency Response Curve.



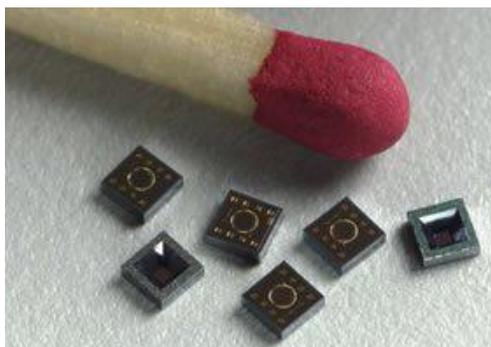
## 15. Accelerometri MEMS

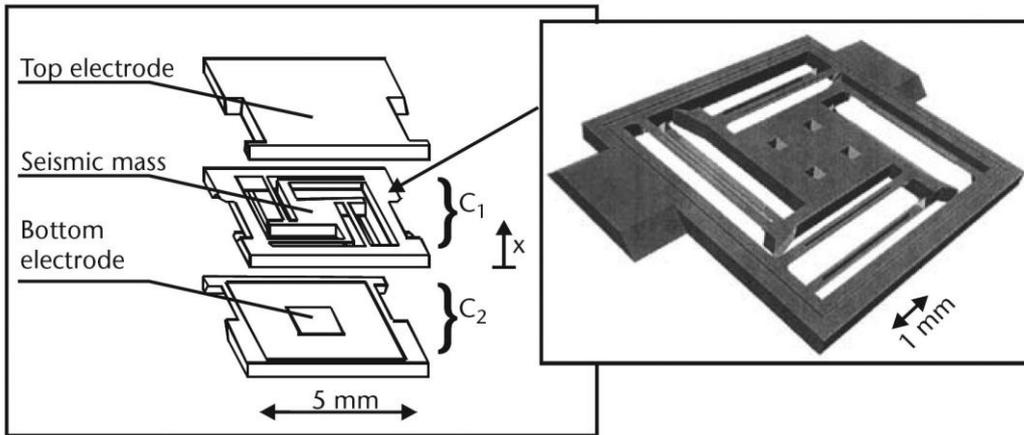
La sigla MEMS è l'acronimo di Micro Electro Mechanical Systems e identifica una categoria di dispositivi di varia natura (meccanici, elettrici ed elettronici) integrati in forma altamente miniaturizzata su uno stesso substrato di silicio, che coniugano le proprietà elettriche degli integrati a semiconduttore con proprietà opto-meccaniche. La tecnologia MEMS è considerata una delle innovazioni più promettenti del XXI secolo, capaci di rivoluzionare sia il mondo industriale, sia quello dei prodotti di largo consumo. La miniaturizzazione dei sensori costruiti utilizzando tale tecnologia, unita all'integrazione del circuito necessario ad ottenere l'output di misura, ne ha consentito l'introduzione in molteplici dispositivi (palmari, console di giochi, realtà virtuale, sistemi di misura, sistemi di controllo di posizione utilizzati congiuntamente alla tecnologia GPS, etc.) ove si vuole effettuare la misura di diverse grandezze fisiche (accelerazioni, velocità, spostamenti, rotazioni, pressioni, etc.).

Questa tecnologia ha portato alla realizzazione di accelerometri MEMS in grado di misurare lungo tre assi. Si basano principalmente sulla misura di variazioni capacitive, indotte dalle accelerazioni cui il sensore è sottoposto. I processi di microincisione permettono di realizzare condensatori costituiti da più armature, che possono oscillare attorno ad una posizione di equilibrio, provocando variazioni capacitive (alcuni schemi sono illustrati nella pagina seguente). Tali variazioni sono dell'ordine di  $10^{-18}$ ,  $10^{-21}$  F e possono essere rilevate proprio grazie alla tecnologia costruttiva dei MEMS che integra l'elettronica all'interno del sensore.

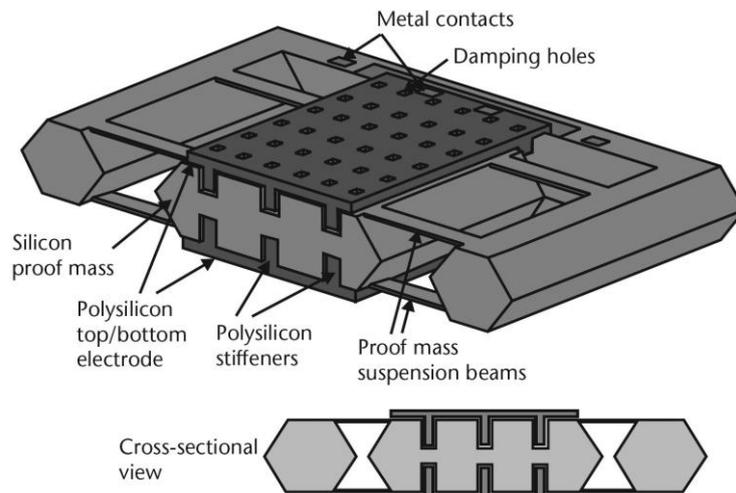
Questi sensori presentano molteplici caratteristiche favorevoli:

- precisione e rapporto segnale rumore elevati;
- ampia banda passante a partire da 0 Hz, sono dunque in grado di misurare le accelerazioni statiche.
- affidabilità;
- consumi limitati;
- produzione su larga scala e omogeneità della lavorazione;
- miniaturizzazione

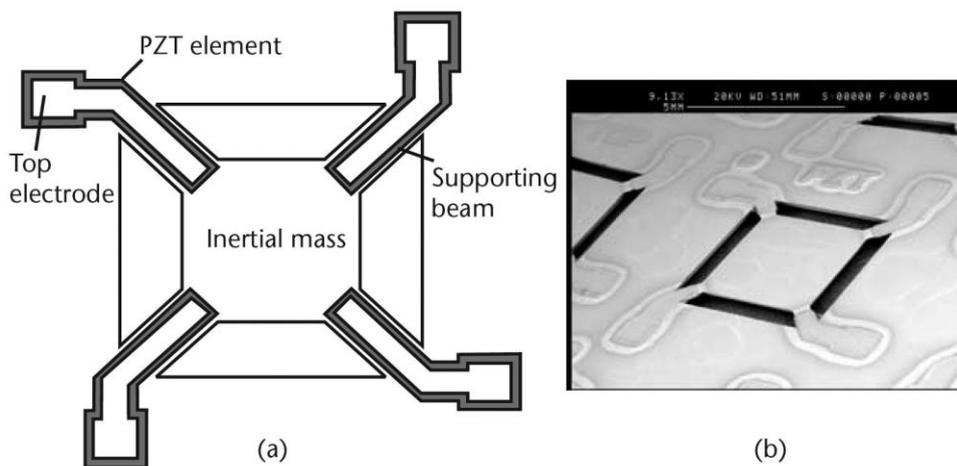




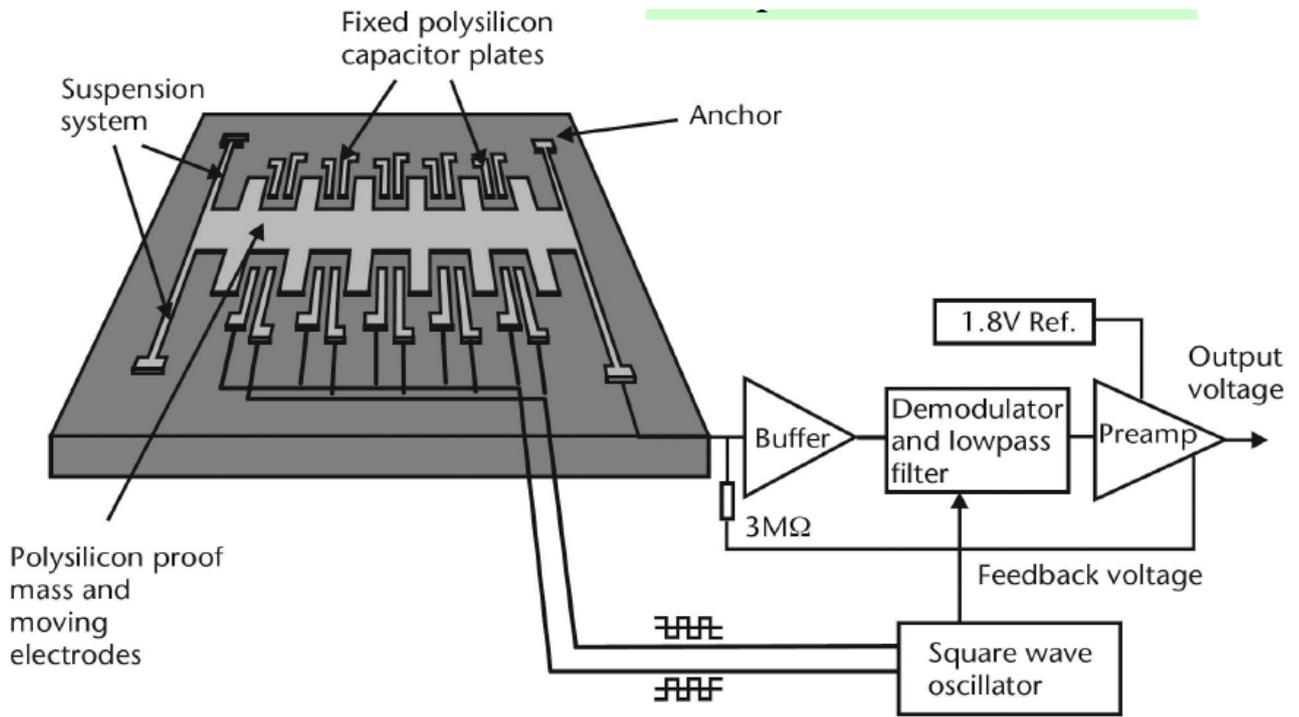
A bulk-micromachined accelerometer with capacitive signal pick-off.



**Figure 8.11** High-performance capacitive accelerometer using a combination of surface and bulk-micromachining techniques. The polysilicon electrodes include stiffening ribs. (After: [33].)



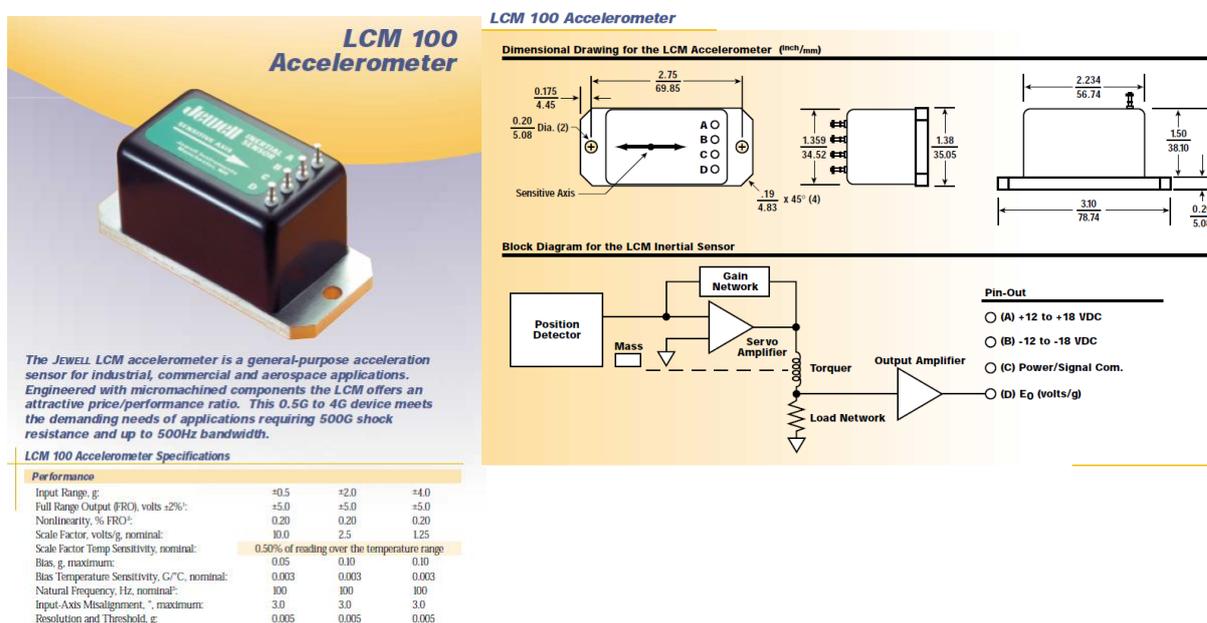
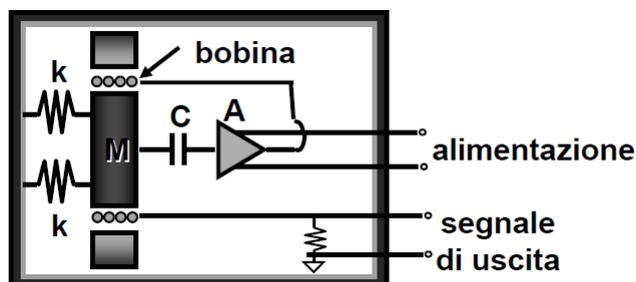
**Figure 8.12** (a) Design of a piezoelectric accelerometer using thick-film printed PZT. (b) SEM photograph of the sensing element.



**Figure 8.17** Block diagram of the ADXL50 accelerometer.

## 16. Servoaccelerometri

Nella seguente figura è mostrato lo schema costruttivo di un servo accelerometro.



La massa sismica è sospesa alla cassa del trasduttore mediante molle, un fluido viene utilizzato per smorzare il moto della massa sismica. Il funzionamento è basato su di un sistema elettronico che, grazie ad una bobina e ad una corrente circolante, mantiene fissa la massa sismica rispetto alla scatola collegata al corpo di cui si vuole misurare la vibrazione. La corrente necessaria per tenere ferma la massa è proporzionale all'accelerazione dello strumento.

La frequenza propria di questi trasduttori è solitamente inferiore ai 400 Hz e pertanto la loro banda passante è superiormente limitata. Sono dei sensori in genere pesanti e ingombranti che però offrono il vantaggio di misurare con molta precisione segnali con bassa frequenza o accelerazioni statiche, quindi non soffrono dei limiti alle basse frequenze tipici degli accelerometri piezoelettrici.

Hanno lo svantaggio di essere estremamente delicati quando non alimentati poiché la massa è in grado di muoversi e le molle hanno bassa rigidità.

## 17. Sonda di prossimità

La sonda di prossimità o “proximity probe” viene impiegata per misurare spostamenti relativi tra due superfici affacciate non a contatto tra loro. Viene ad esempio impiegata per misurare le vibrazioni nei supporti di alberi rotanti. Se affacciata ad una ruota fonica può essere impiegata per misurare rotazioni, velocità o accelerazioni angolari (es. sistemi ABS per veicoli).

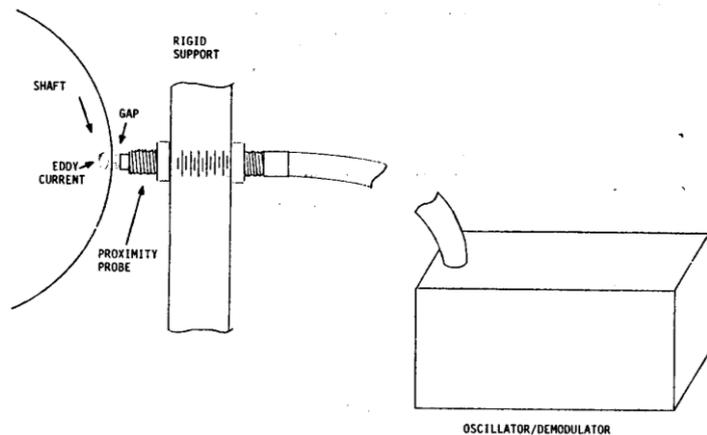
Il funzionamento è basato sulle correnti parassite o correnti di Foucault o *eddy current* (dall'inglese eddy, vortice), che sono correnti indotte in masse metalliche conduttrici che si trovano immerse in un campo magnetico variabile o che, muovendosi, attraversano un campo magnetico costante o variabile. In ogni caso queste correnti sono generate dalla variazione del flusso magnetico. La variabilità del campo magnetico nel proximity probe è proporzionale in un certo range di valori all'ampiezza dello spazio compreso tra il sensore e la superficie. La variabilità del campo magnetico viene convertita in una differenza di potenziale. La sonda viene montata con la testina di misura affacciata alla superficie del corpo e viene collegata mediante un cavo ad un demodulatore per ottenere lo spostamento relativo. La sensibilità in uscita del demodulatore è espressa in mV /mm.

### Vantaggi:

- nessun contatto tra il trasduttore e il corpo in movimento;
- nessuna parte mobile nel trasduttore e quindi assenza di usura.

### Limiti:

- variazioni delle caratteristiche magnetiche e irregolarità del corpo determinano componenti errate nel segnale: il segnale d'uscita è somma dello spostamento relativo e delle variazioni della superficie;
- è necessaria la calibrazione in funzione del metallo costituente il corpo e sul punto di misura;
- la bassa gamma dinamica limita il campo utile di frequenza, in quanto lo spostamento è relativamente piccolo alle alte frequenze.



## 18. Velocimetro ad elemento mobile

Questo trasduttore rientra nella categoria dei sismografi o vibrometri in quanto misura lo spostamento relativo tra la massa sismica e la scatola. E' costituito da un magnete permanente sospeso su molle, circondato da un fluido viscoso (olio) e da una spira metallica avvolta sulla superficie interna dell'involucro del sensore.

Il trasduttore è collegato rigidamente all'oggetto in movimento e si muove con esso. Il moto relativo tra il magnete e la spira genera una tensione proporzionale alla velocità di movimento.

### Vantaggi:

- facilità di utilizzo
- basso costo.

### Limiti:

- presenta parti mobili soggette ad usura;
- è di grandi dimensioni;
- è sensibile a campi magnetici e all'orientamento;
- ha una elevata frequenza di taglio inferiore (10 Hz);
- l'attrito tra le superfici mobili interne determina una riduzione del segnale di uscita.

