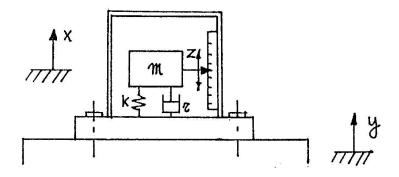
5. Trasduttori per la misura delle vibrazioni

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: $z = \operatorname{Re}(Ze^{-i\phi}e^{i\Omega t}) = Z\cos\Omega t - \phi$

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:

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

3.0

0.10

0.25

0.25

0.25

0.25

0.25

0.25

0.25

0.25

0.25

0.25

0.25

0.25

0.25

0.25

0.25

0.25

0.25

0.25

0.25

0.25

0.25

0.25

0.25

0.25

0.25

Rapporto delle frequenze Q.

Rapporto delle frequenze Q.

essendo:

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

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

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

Per a>>1 (zona detta sismografica), ovvero $\Omega>>\omega_0$, 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 ω_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 è 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:

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

Z è proporzionale all'accelerazione del corpo e tale strumento viene chiamato <u>accelerometro</u>. 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:

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

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 ($a << 1 \text{ e } \omega_0 >> \Omega$) 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:

$$Q = CV$$

i F B Z

La capacità del condensatore è uguale a:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d}$$

essendo

 ε_0 = costante dielettrica del vuoto; ε_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:

$$V = d_{ij} \frac{F}{C} = d_{ij} \frac{d}{\varepsilon_0 \varepsilon_r S} F = d_{ij} \frac{d}{\varepsilon_0 \varepsilon_r S} m \ddot{y}$$

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:

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

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, BaTiO₃, 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.

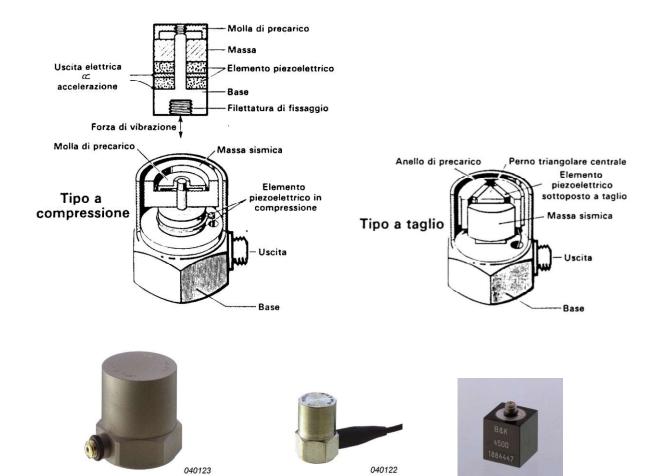
L'accelerometro piezoelettrico offre molteplici vantaggiose caratteristiche, quali:

- 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



Accelerometri triassiali





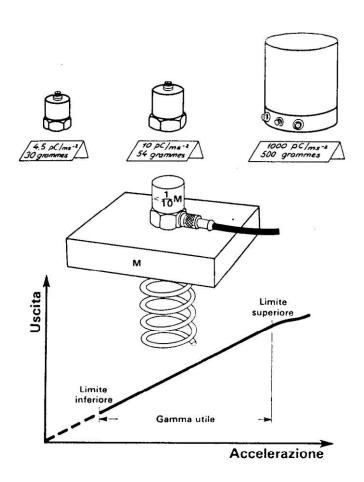
8. Caratteristiche degli accelerometri piezoelettrici con uscita in carica

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

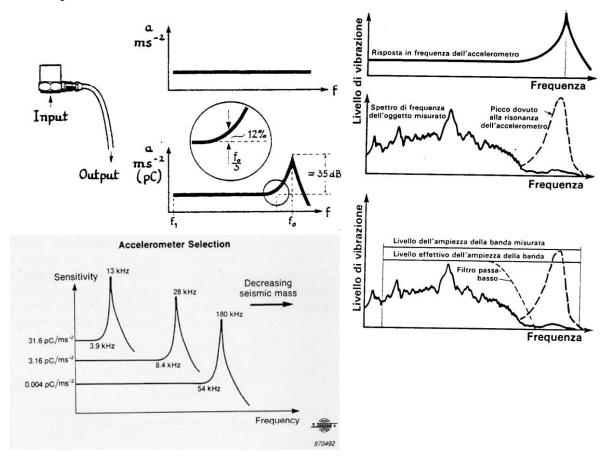
<u>Sensibilità</u> [pC/(m/s²)]: la sensibilità cresce al crescere delle dimensioni del gruppo piezoelettrico e della massa sismica (strumento più pesante e ingombrante); per ovviare a ciò il segnale in uscita viene inviato ad un preamplificatore, che ha la funzione di realizzare il circuito elettrico per trasformare le cariche in d.d.p. e amplificare il segnale. Nei tipi per impiego generico la sensibilità varia tra 1 e 10 pC/ms-2.

<u>Massa</u> [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.

<u>Gamma dinamica</u>: l'accelerometro fornisce in uscita un segnale elettrico direttamente proporzionale all'accelerazione in un campo dinamico molto ampio (1:10⁸). Il limite inferiore (LI) è imposto dal rumore elettrico introdotto dai cavi e dal circuito amplificatore (LI=1/100 m/s² negli strumenti per impiego generico). Il limite superiore (LS) è determinato dalla resistenza strutturale dell'accelerometro (LS=50000-100000 m/s² negli strumenti per impiego generico).

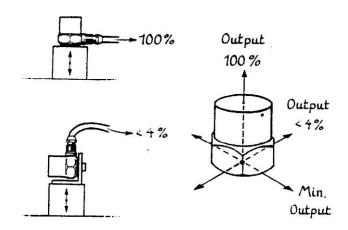


Gamma in frequenza o banda passante: il segnale in uscita si mantiene costante al variare della frequenza, a partire da frequenze di 1-2 Hz (per strumenti di impiego generico) fino ad un limite imposto dalla risonanza dell'accelerometro, in corrispondenza della quale si ha un aumento del segnale. Come regola pratica un accelerometro si può utilizzare fino ad <u>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 (f₀=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.</u>



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.

<u>Sensibilità trasversale</u>: 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

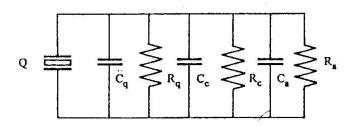
Affinché sia possibile convertire le cariche generate nel cristallo piezoelettrico in una differenza di potenziale misurabile e registrabile è necessario che il cristallo piezoelettrico sia inserito all'interno di un apposito circuito. Negli accelerometri piezoelettrici convenzionali con uscita in carica, 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 $G\Omega$). 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.

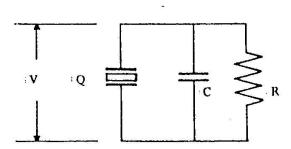


Assumendo:

$$C = C_q + C_c + C_a$$

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

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:

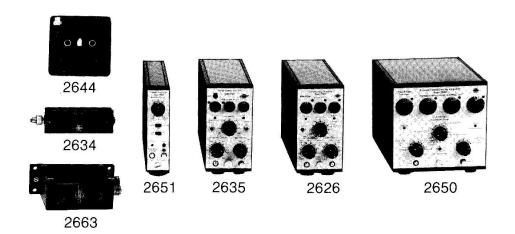
$$V = V_0 e^{-\frac{t}{RC}}$$

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:

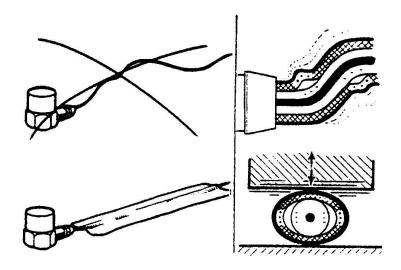
- possibilità di selezionare su di essi la sensibilità del trasduttore;
- regolazione del guadagno;
- integratore elettronico, per convertire l'uscita proporzionale all'accelerazione in segnali di velocità o di spostamento;
- filtri passa-basso, passa-alto o passa-banda, per selezionare i limiti inferiore 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:

- <u>correnti verso terra</u>: 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);
- <u>rumore triboelettrico</u>: viene indotto nel cavo dal movimento meccanico del cavo stesso, si evita nastrando e incollando il cavo il più vicino possibile all'accelerometro (operazione non sempre fattibile);
- <u>rumore elettromagnetico</u>: 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.

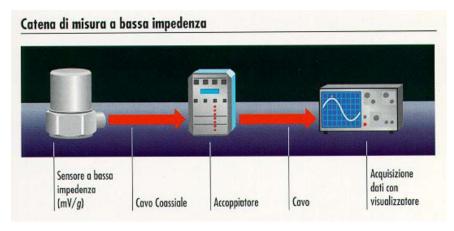


11. Accelerometri ICP (Integrated Circuit Piezoelectric) e catena di misura a bassa impedenza

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.

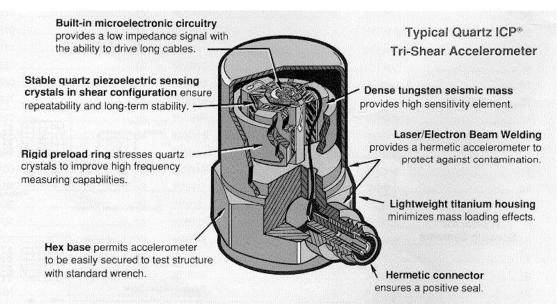
Per ovviare a queste limitazioni, da circa un decennio sono stati introdotti nel mercato degli accelerometri con un circuito elettronico integrato all'interno del trasduttore; essi sono contrassegnati dalla sigla ICP, acronimo di Integrated Circuit Piezoelectric.

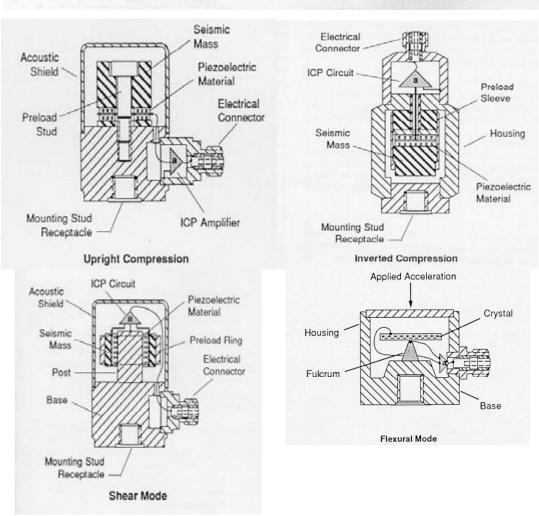
Gli accelerometri ICP non necessitano pertanto di preamplificatore esterno, ma solo di un alimentatore esterno a corrente continua. Il segnale in uscita dall'accelerometro è in questo caso una differenza di potenziale e la catena di misura è detta a bassa impedenza. L'alimentatore esterno o accoppiatore può avere anche la funzione di amplificare il segnale attraverso un guadagno regolabile.



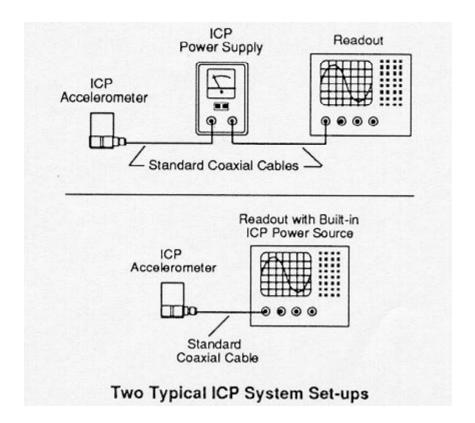
Negli accelerometri ICP il segnale in uscita dal trasduttore è come detto una tensione e pertanto <u>la sensibilità del trasduttore si misura in mV/(m/s²)</u> (milliVolt al metro secondo quadro) o in mV/g (milliVolt al g).

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.

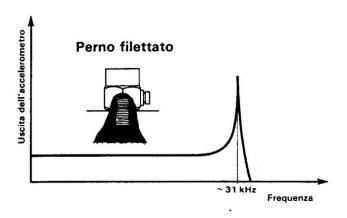


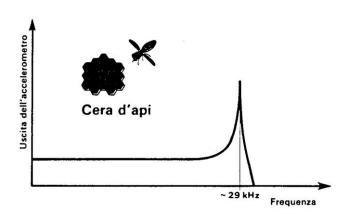
12. Montaggio degli accelerometri

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.

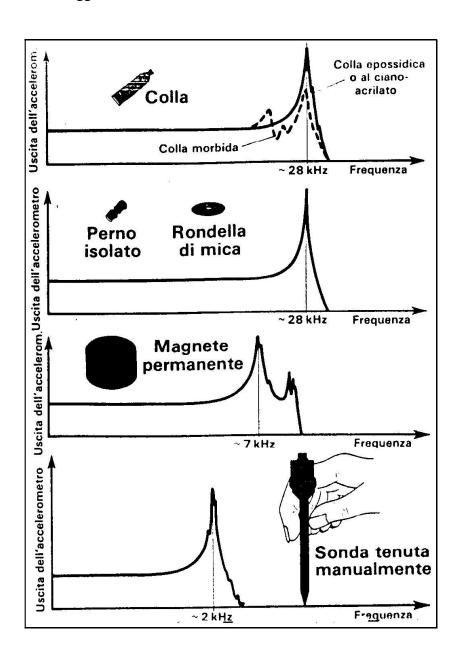
Principali metodi di montaggio

- <u>Perno filettato</u>: è il miglior montaggio in assoluto poiché la frequenza risonante raggiunta
 è quasi coincidente a quella misurata durante la calibratura.
- <u>Cera d'api</u>: 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 m/s², T_{max}=40°C).





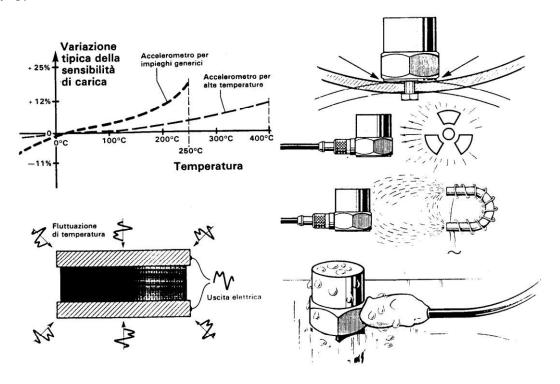
- <u>Perno incollato</u>: si utilizza un dischetto metallico munito di perno da incollare con colla epossidica o cianoacrilica.
- <u>Perno isolato e rondella di mica</u>: si ricorre a tale metodo quando l'accelerometro deve essere isolato elettricamente.
- <u>Magnete permanente</u>: è un metodo veloce 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/s² 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.



<u>Effetto dei transitori di temperatura</u>: si possono avere variazioni del segnale di uscita per piccole variazione della T_{amb} ; ciò può rappresentare un problema solo per piccole ampiezze o basse frequenze.

<u>Deformazione della base</u>: in caso di elevate deformazioni occorre utilizzare accelerometri con basi rigide e spesse.

<u>Umidità</u>: 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).

