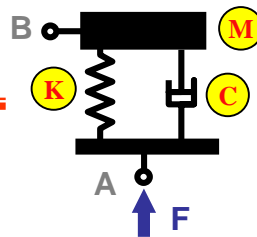


Misure accelerometriche

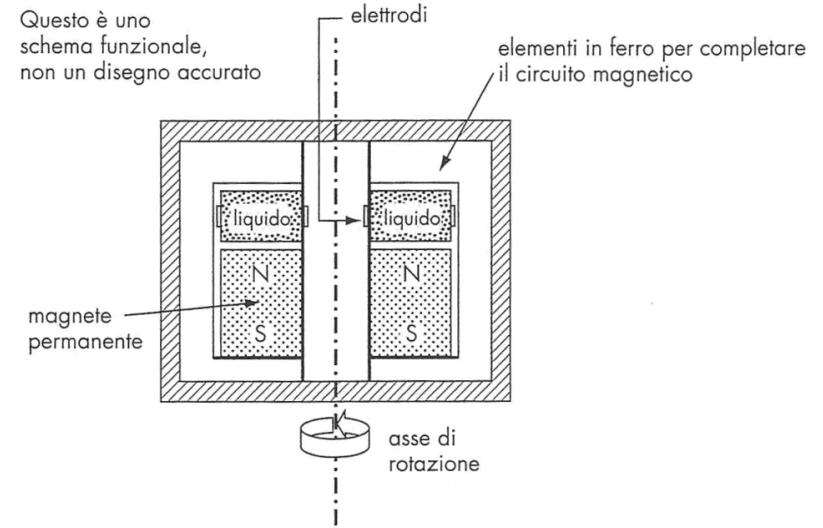
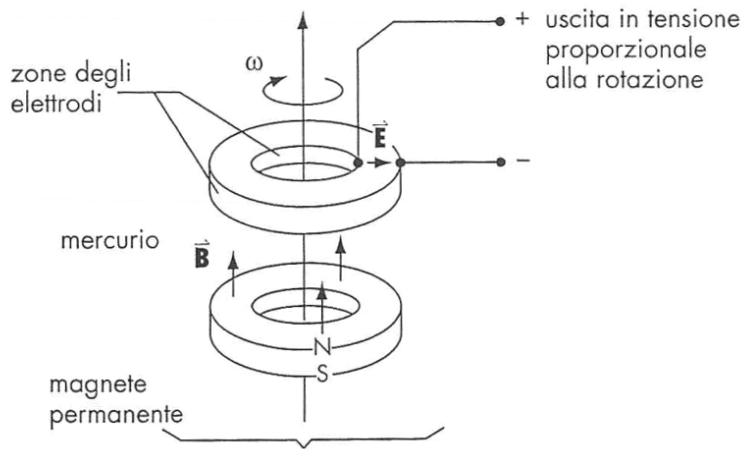


M. De Cecco - Lucidi del corso di Misure Meccaniche e Termiche I



Sonde sismiche per la misura di **velocità**

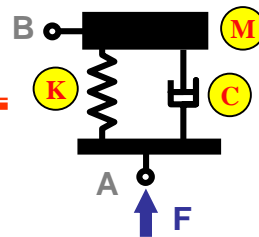
Sensore di **velocità angolare magnetoidrodinamico**, che non fa uso di un vincolo a molla.



L'unica parte interna in movimento è costituita da un corpo a forma di ciambella riempita di liquido conduttivo, spesso mercurio, che funge da massa inerziale rotante, meccanicamente accoppiato all'involucro per attrito viscoso.



M. De Cecco - Lucidi del corso di Misure Meccaniche e Termiche I



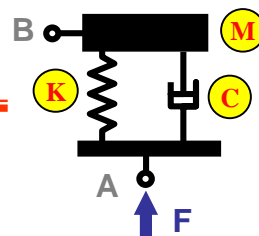
- A. Se l'involucro viene fatto ruotare attorno all'asse molto lentamente, il fluido tende a ruotare con l'involucro, quindi senza riportare alcun movimento relativo.
- B. Se, invece, l'involucro viene fatto ruotare rapidamente in modo oscillatorio, per inerzia il liquido tende a rimanere in quiete, generando un movimento relativo tra involucro e liquido, che corrisponde al movimento assoluto dell'involucro.

Pertanto il fluido conduttivo agisce come un "filo metallico" che attraversa un campo magnetico, producendo una **tensione proporzionale alla velocità angolare** e che può essere resa disponibile agli elettrodi che toccano la superficie più interna e la superficie più esterna della ciambella di fluido.

Mentre **vengono perse le frequenze più basse**, esiste un ampio campo in cui il rapporto di ampiezza si mantiene costante e l'angolo di fase nullo, tipicamente a partire da circa 1 Hz fino a superare 1000 Hz.

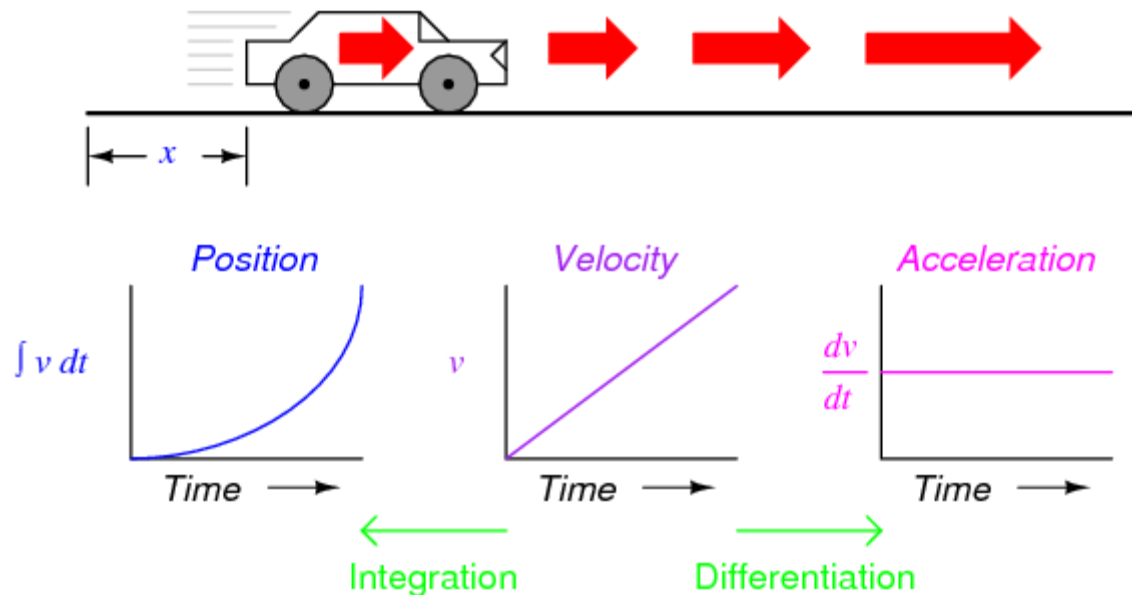


M. De Cecco - Lucidi del corso di Misure Meccaniche e Termiche I

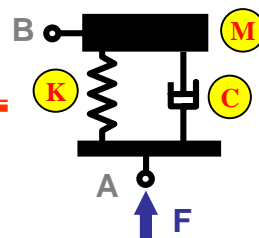


Cosa misura un accelerometro?

Un accelerometro misura la **accelerazione di un corpo riferita ad un sistema assoluto**. Da essa e quindi possibile ricavare, tramite integrazioni successive, la velocità e spostamento, ovvero in generale il moto di un sistema.



M. De Cecco - Lucidi del corso di Misure Meccaniche e Termiche I



Sonde sismiche di accelerazione

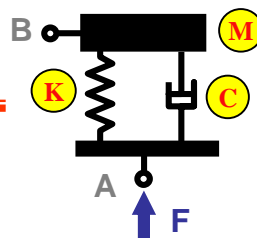
La sonda più importante per rilevare le vibrazioni, gli urti e per misurazioni di movimento assolute con finalità generali è l'accelerometro. Questo strumento si trova in commercio in svariate tipologie per soddisfare diverse richieste applicative.

Di seguito vengono elencati gli aspetti di base che caratterizzano gli accelerometri e ne decretano il grande successo:

1. La risposta in frequenza va da zero a un valore limite elevato. Possono essere misurate le accelerazioni statiche (tranne che nei tipi piezoelettrici).
2. Lo spostamento e la velocità possono essere ottenuti facilmente per integrazione elettrica, operazione di gran lunga preferibile alla derivazione.
3. Questi sensori sono più adatti a fornire misurazioni di urti (shock) rispetto alle sonde di spostamento o di velocità.
4. Le forze che provocano danni nei macchinari ecc., sono legate all'accelerazione piuttosto che alla velocità o allo spostamento.



M. De Cecco - Lucidi del corso di Misure Meccaniche e Termiche I



Accelerometri a deflessione

Un'ampia categoria di accelerometri di uso comune e si differenzia soltanto nei dettagli, per esempio per quanto riguarda il tipo di molla utilizzata, il trasduttore di movimento relativo impiegato e il tipo di smorzamento fornito.

Tecnologia classica

a) risposta dc

- con potenziometro
- con LVDT
- con estensimetri incollati
- con estensimetri non incollati
- a variazione di capacità

b) risposta non dc

- piezoelettrici

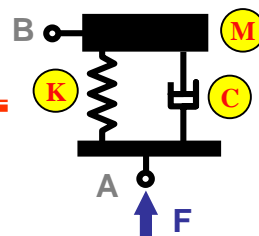
Tecnologia MEMS (sistema micro elettromeccanico)

a) risposta dc

- piezoresistivi
- capacitivi



M. De Cecco - Lucidi del corso di Misure Meccaniche e Termiche I



Gli accelerometri non-MEMS con risposta dc si differenziano principalmente nel **trasduttore di spostamento relativo utilizzato**.

I potenziometri vengono adottati principalmente per basse frequenze; un'unità caratteristica ha una frequenza propria di circa 100Hz, un'accuratezza del 1.5% del fondo scala (FS) e una soglia dello 0.8% del FS.

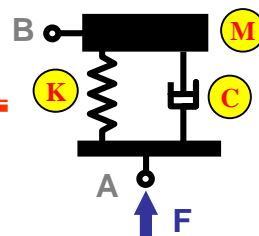
Una famiglia di accelerometri che sfrutta estensimetri non incollati ha campi variabili da i 5g a i 500g, con frequenze proprie da 300 a 2900 Hz, sensibilità di circa 20 1nV PS, sensibilità trasversale dell' 1% e risoluzione infinitesimale.

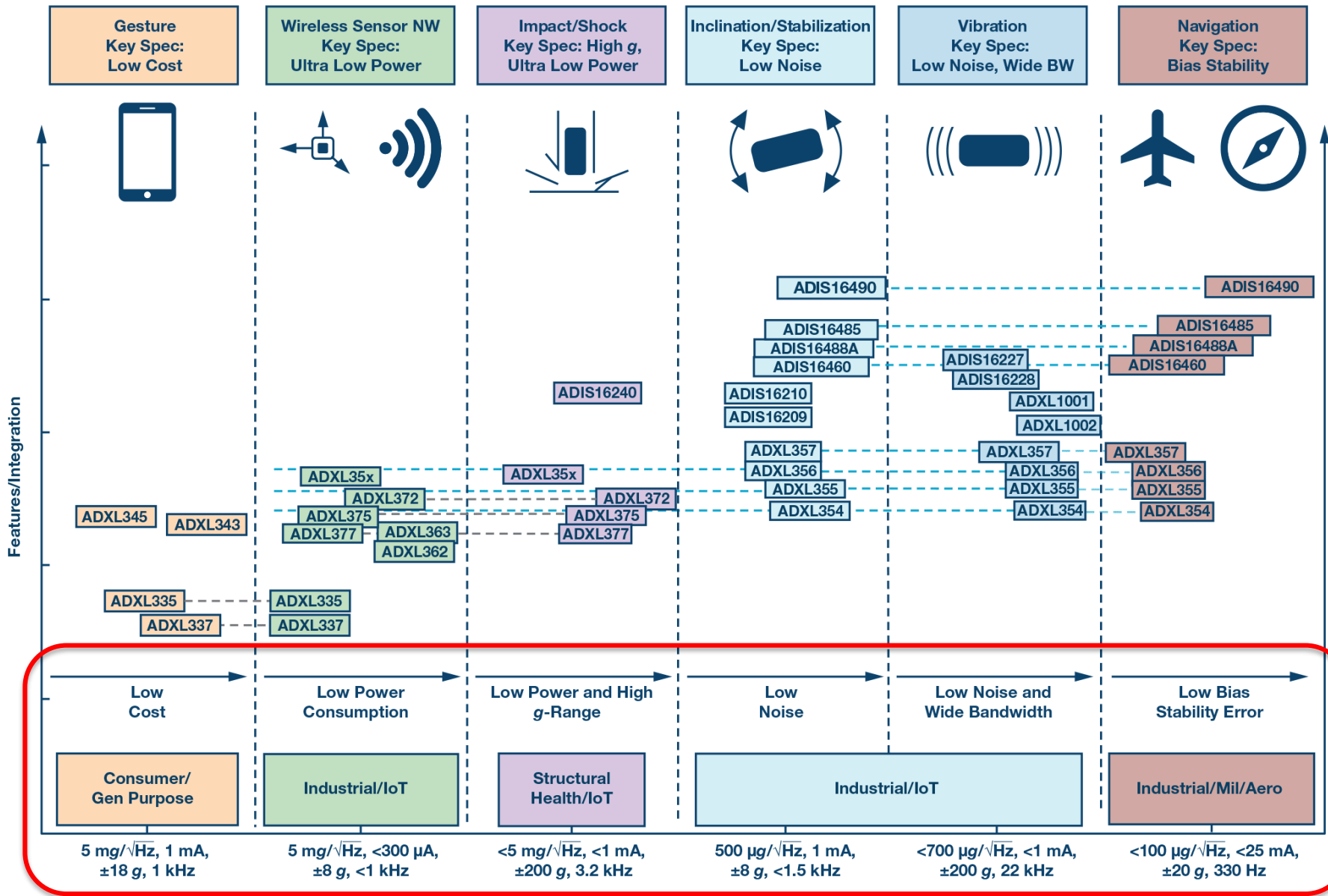
Sono disponibili unità con estensimetri a semiconduttore incollati con campi di misura simili, ma con sensibilità più alte (circa 100mV FS).

Sono rari i produttori di accelerometri con LVDT.

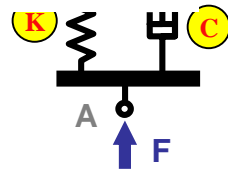


M. De Cecco - Lucidi del corso di Misure Meccaniche e Termiche I





Typical Performance Requirements (Noise, Power Consumption, g-Range, Bandwidth)



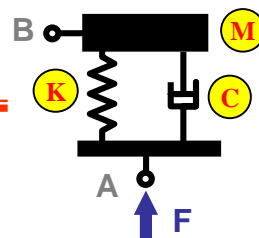
Principio di funzionamento e modello matematico

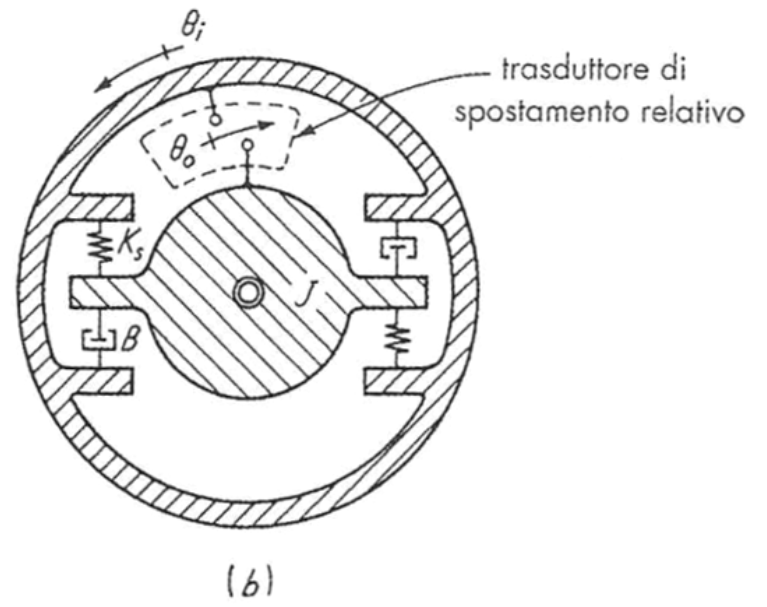
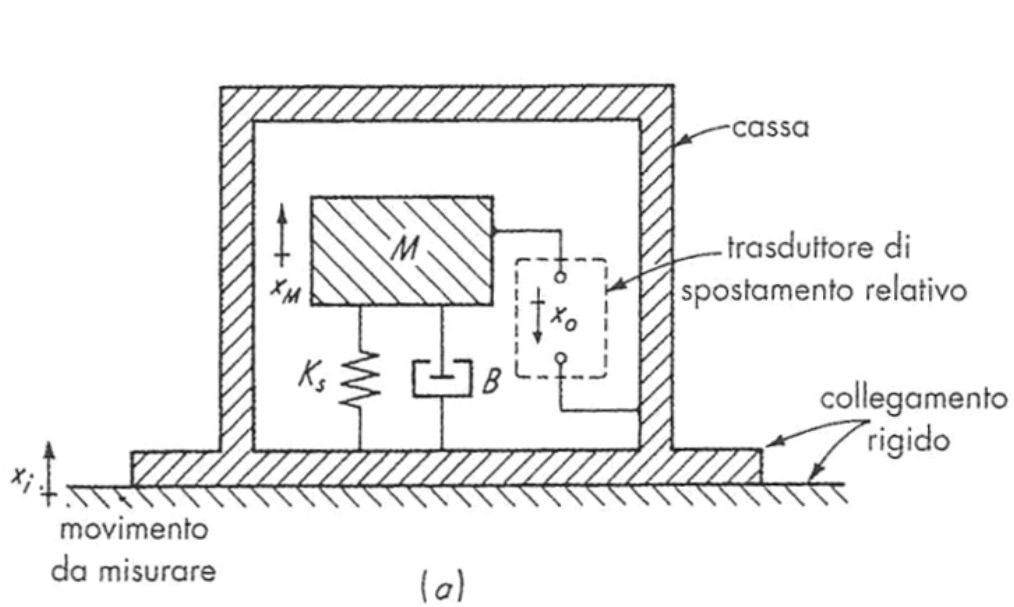
*L'accelerometro ha la capacità di misurare la accelerazione assoluta grazie alla **massa inerziale** in esso contenuta la quale, come descritto nella legge di Newton, reagisce ad una accelerazione espressa rispetto ad un sistema assoluto mediante una forza nella stessa direzione ma nel verso opposto alla accelerazione stessa e di intensità proporzionale al valore della massa e dell'accelerazione.*

Tale forza di inerzia viene fatta agire su di una **molla elastica in parallelo con un elemento smorzante** e viene di conseguenza **rilevato spostamento relativo**.

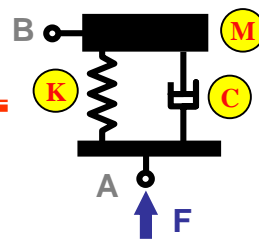


M. De Cecco - Lucidi del corso di Misure Meccaniche e Termiche I

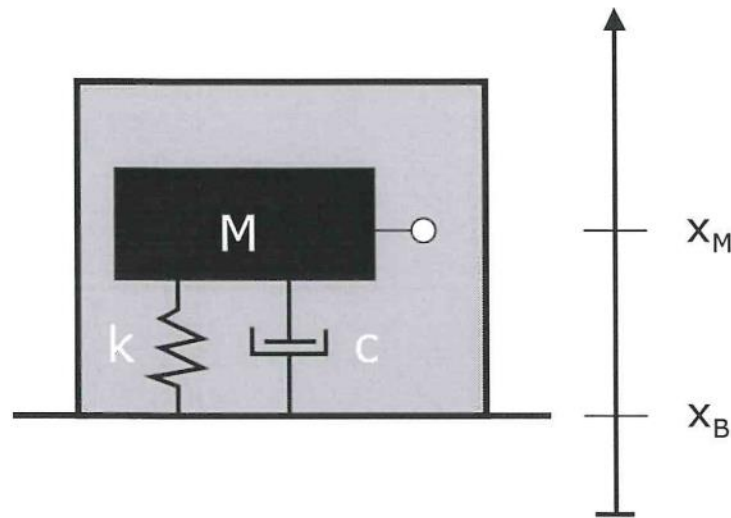




M. De Cecco - Lucidi del corso di Misure Meccaniche e Termiche I



Lo schema di un accelerometro è il seguente:

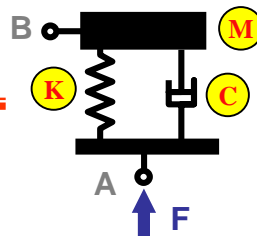


immaginando che una accelerazione costante di segno positivo sia applicata alla base, la massa reagirà mediante la forza di inerzia pari a Md^2X_M/dt^2 e la molla si comprimerà esercitando una forza $k(X_B - X_M)$ eguale ed opposta alla forza di inerzia.

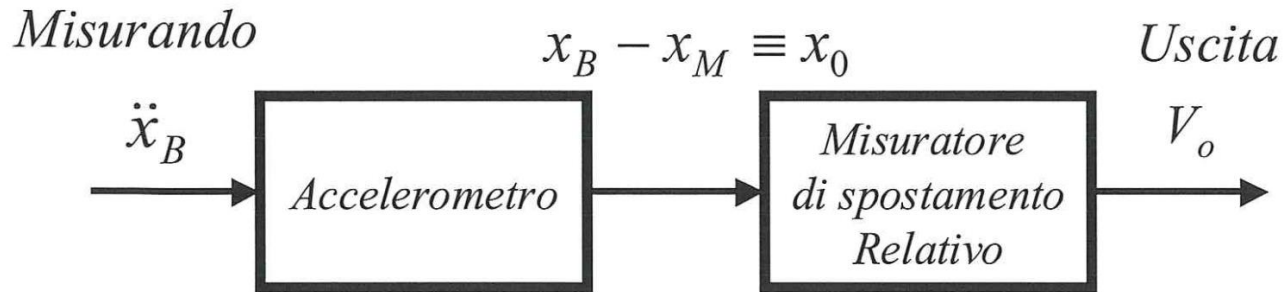
Si avrà pertanto che, rilevando la posizione relativa $X_B - X_M$ essa sarà pari a **M/k moltiplicata l'accelerazione imposta alla base dello strumento.**



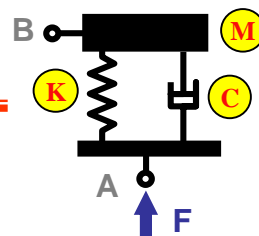
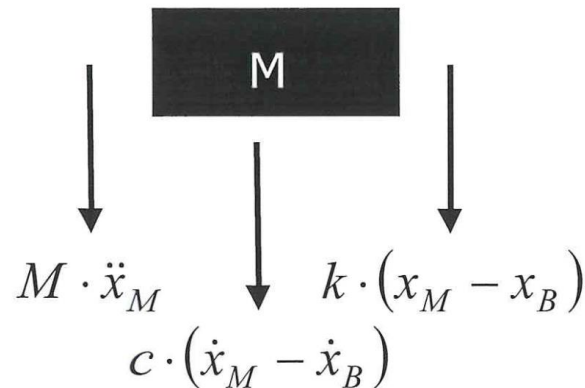
M. De Cecco - Lucidi del corso di Misure Meccaniche e Termiche I



Lo strumento, nel diagramma ingresso-uscita, può essere visto nella seguente maniera:



il modello matematico del primo sistema della serie, può essere ricavato semplicemente applicando la legge di Newton alla massa dello strumento:



dalla legge di Newton:

$$M \cdot \ddot{x}_M + c \cdot (\dot{x}_M - \dot{x}_B) + k \cdot (x_M - x_B) = 0$$

per cui, definendo l'uscita dello strumento:

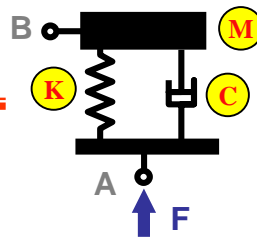
$$x_0 \equiv x_B - x_M$$

si ottiene l'equazione:

$$M \cdot \ddot{x}_B = M \cdot \ddot{x}_0 + c \cdot \dot{x}_0 + k \cdot x_0$$



M. De Cecco - Lucidi del corso di Misure Meccaniche e Termiche I



Caratteristica dinamica degli accelerometri

L'equazione precedente, trasformata secondo Fourier, consente di ottenere

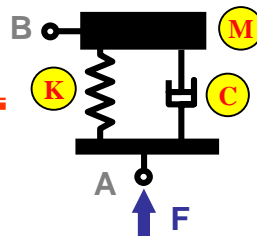
$$\frac{X_0(\omega)}{A_B(\omega)} = \frac{1/\omega_n^2}{1 + 2\xi \frac{i\omega}{\omega_n} + \left(\frac{i\omega}{\omega_n}\right)^2}$$

è possibile dunque effettuare le seguenti considerazioni:

1. l'entità della **banda in frequenza in cui lo strumento è utilizzabile** (modulo costante e fase pressoché lineare) è inversamente proporzionale alla sensibilità;
2. il valore di **smorzamento** (rapporto tra il valore di attrito viscoso reale e quello critico) **per avere la massima banda in frequenza utilizzabile vale 0.67**, per cui nella costruzione dello strumento particolare attenzione viene posta nella introduzione di un elemento di attrito viscoso di entità opportuna;
3. la caratteristica ingresso (accelerazione) uscita (risposta dello strumento che misura lo spostamento relativo)



M. De Cecco - Lucidi del corso di Misure Meccaniche e Termiche I



Implicazioni della misura dello spostamento relativo, considerazioni sugli accelerometri piezoelettrici

Lo spostamento relativo tra la base dello strumento di cui si vuole misurare l'accelerazione e la massa può essere effettuato in diverse maniere.

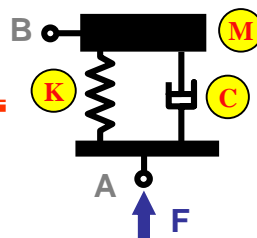
Di seguito le più comuni:

- **con potenziometro**
- **con estensimetri (a semiconduttore)**
- **a variazione di capacità**
- **ad effetto piezoelettrico**

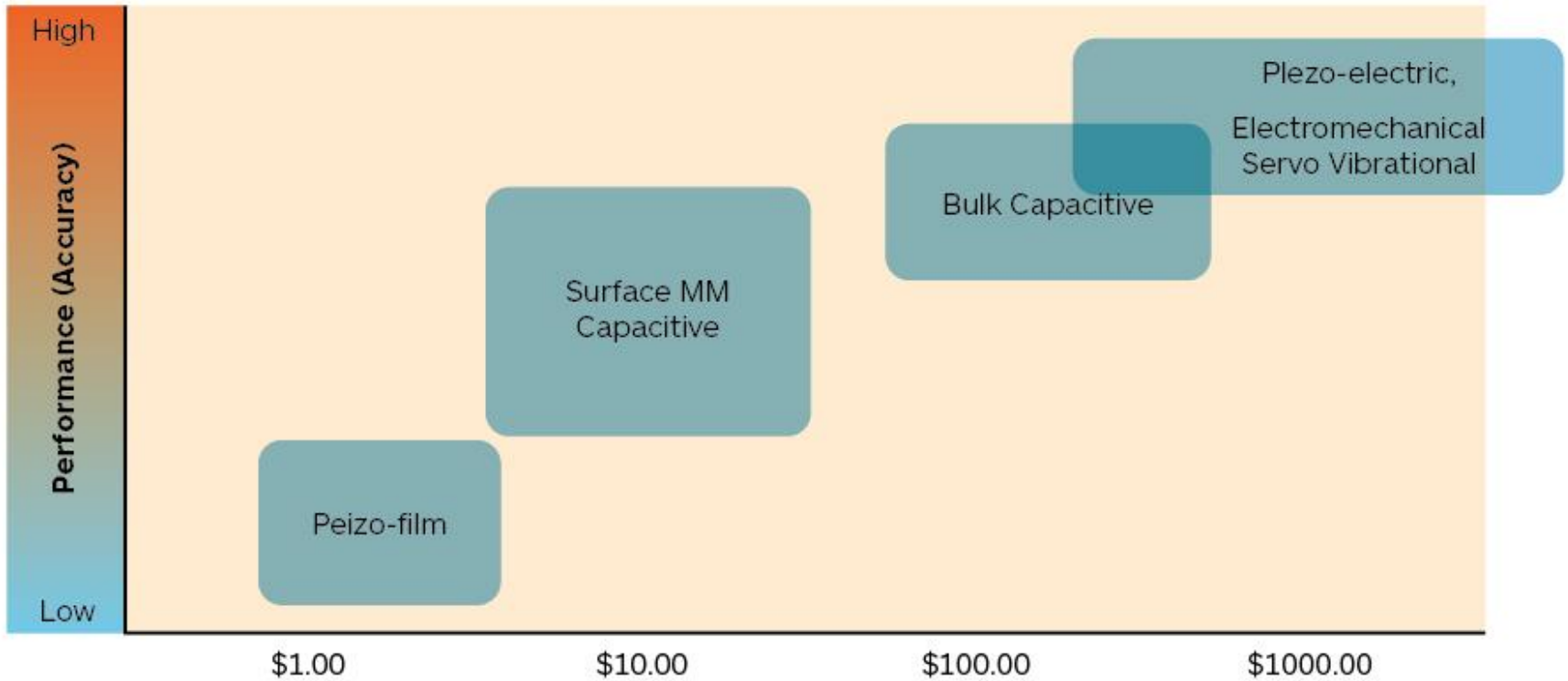
Gli strumenti che impiegano il **potenziometro** per la misura dello spostamento relativo hanno frequenze naturali pari a **poche centinaia di Hz**, mentre quelli che impiegano **estensimetri** a semiconduttore hanno bande passanti di **circa un ordine di grandezza maggiore**.



M. De Cecco - Lucidi del corso di Misure Meccaniche e Termiche I



There are orders of magnitude of cost and performance

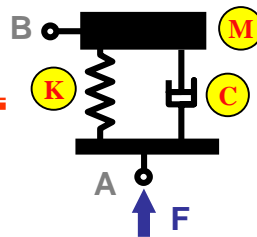


A graph showing the relative cost and accuracy of common accelerometer types.

Image credit: Texas Instruments



M. De Cecco - Lucidi del corso di Misure Meccaniche e Termiche I



Un effetto che limita il campo di frequenze in cui un accelerometro è impiegabile è la corrispondente riduzione della sensibilità.

Per ovviare a tale problema e quindi ottenere strumenti capaci di estendere il proprio campo di frequenza sino ad alcune centinaia di migliaia di Hz (misure di accelerazioni in presenza di urti), sono largamente diffusi gli accelerometri piezoelettrici.

Si ricordi infatti che l'effetto piezoelettrico fornisce sensibilità molto alte: ad esempio un cristallo di quarzo spesso 2.5 mm ha una sensibilità pari a circa $127 \text{ V}/(\text{N}/\text{mm}^2)$.

A fronte della possibilità di diminuire la massa e quindi:

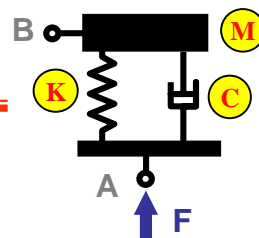
1. incrementare la banda in frequenza

2. diminuire l'effetto di carico sul sistema

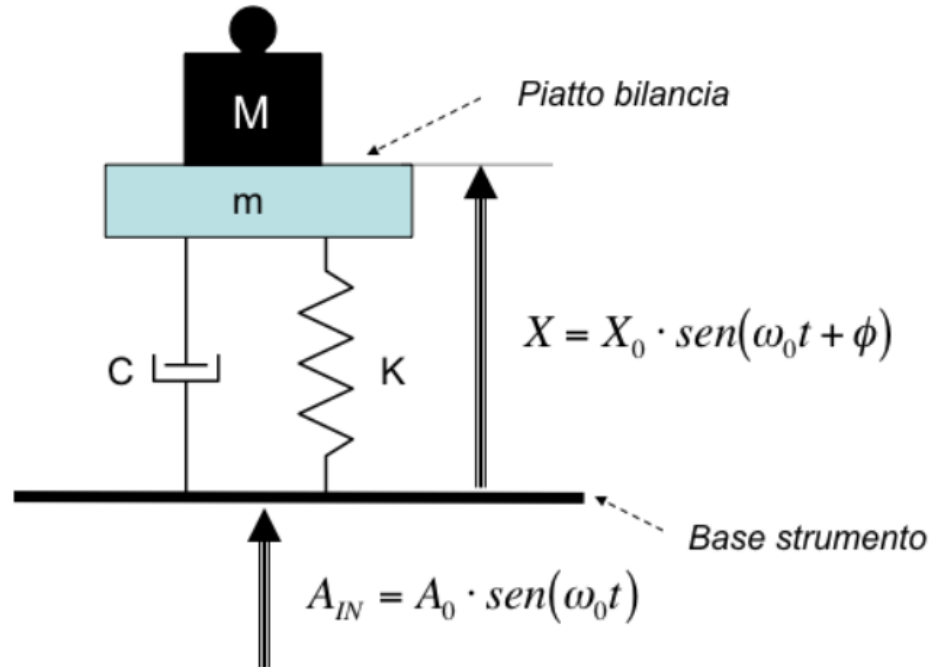
Esiste una contropartita che consiste nella impossibilità di misurare valori di accelerazione costante.



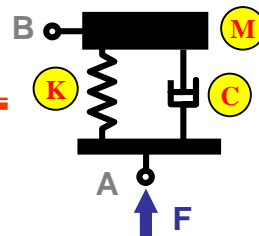
M. De Cecco - Lucidi del corso di Misure Meccaniche e Termiche I



E) una bilancia viene realizzata mediante un sistema massa-molla-smorzatore pilotato da una accelerazione sinusoidale $a_{IN}(t)$. Si suppone di avere a disposizione uno strumento di misura del moto relativo tra massa e base dello strumento $x(t)$, e quindi della sua derivata $v(t)$. L'ingresso allo strumento è costituito da M massa da misurare, l'uscita da X_0 , ampiezza di oscillazione del moto relativo tra base e piatto della bilancia.



M. De Cecco - Lucidi del corso di Misure Meccaniche e Termiche I



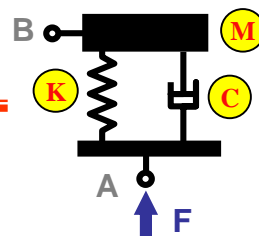
Determinare:

1. lo schema equivalente alle impedenze generalizzate;
2. la funzione di trasferimento $H(\omega) = \frac{X(\omega)}{A_{IN}(\omega)}$;
3. disegnare su diagramma di Bode la funzione di trasferimento $H(\omega)$ asintotica in modulo e fase ed abbozzare le correzioni supponendo il piatto della bilancia sia vuoto;
4. la caratteristica statica della bilancia;
5. l'intervallo di linearità della caratteristica statica supponendo la funzione $H(\omega)$ costante da $0.2 \omega_N$.

Dati: $m = 0.2 \text{ kg}$; $C = 1 \text{ kg/s}$; $K = 80 \text{ N/m}$; $\omega_0 = 1 \text{ Hz}$; $A_0 = 0.2 \text{ m/s}^2$.



M. De Cecco - Lucidi del corso di Misure Meccaniche e Termiche I



Accelerometri piezoresistivi

Trovano un'ampia applicazione nelle misurazioni di **urti e vibrazioni**.

In generale, essi **non forniscono alcuna uscita in risposta ad accelerazioni costanti** a causa del principio di base della misura di spostamento per via piezoelettrica.

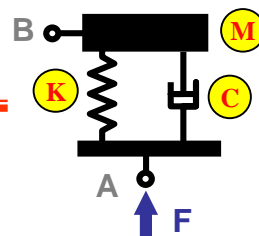
Essi presentano:

- ampi segnali di tensione in uscita,
- piccole dimensioni
- frequenze proprie molto alte, caratteristica necessaria per ottenere accurate misurazioni di fenomeni impulsivi.

Non è previsto alcuno smorzamento intenzionale, lasciando l'isteresi del materiale quale unica fonte di dissipazione energetica. Questo comporta un rapporto adimensionale di smorzamento molto basso (circa 0.01 → solitamente si usa il valore zero nei modelli semplificati), valore accettabile dato che la frequenza propria è molto elevata.

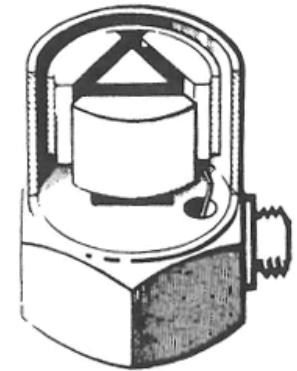
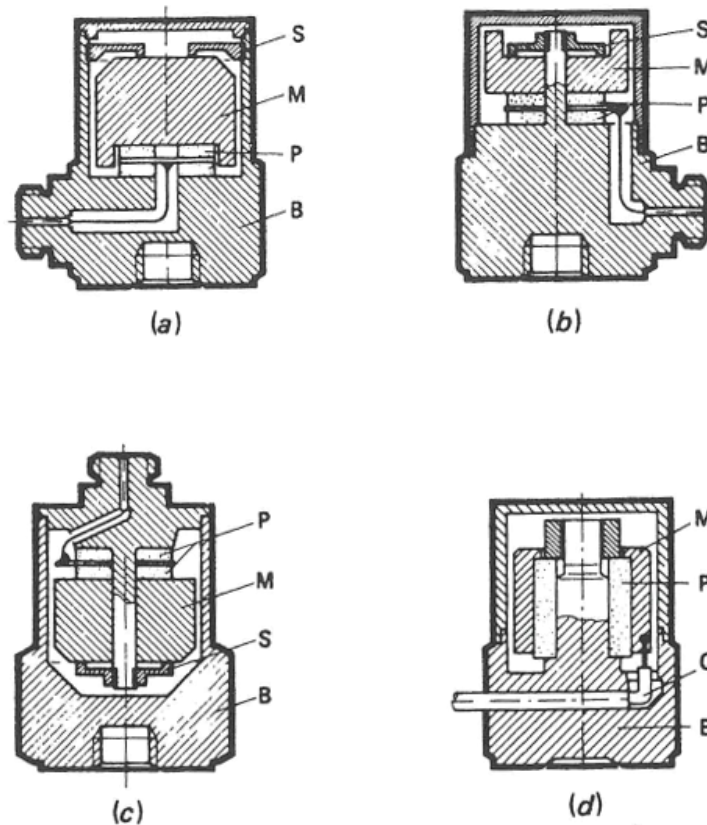


M. De Cecco - Lucidi del corso di Misure Meccaniche e Termiche I

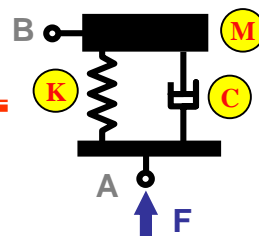


La risposta alle basse frequenze è limitata dalla caratteristica piezoelettrica, mentre quella alle alte frequenze è limitata dalla risonanza meccanica.

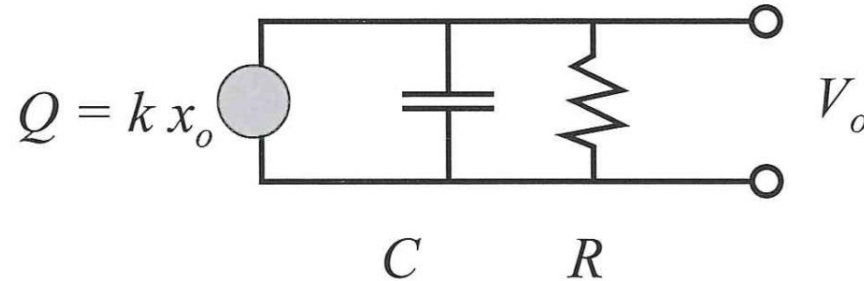
Disegni di accelerometri piezoelettrici.
 (a) Progetto di un tipo a compressione con molle periferiche. (b) Progetto di un tipo a compressione con molle al centro. (c) Progetto di un tipo a compressione con molle al centro invertite. (d) Progetto di un tipo a taglio.



M. De Cecco - Lucidi del corso di Misure Meccaniche e Termiche I

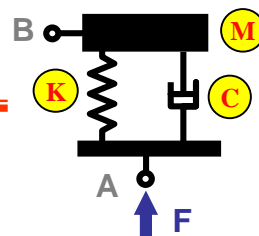


Per dimostrare quanto appena affermato e possibile schematizzare il trasduttore piezoelettrico di spostamento relativo nella seguente maniera:



nello schema appena riportato sono state schematizzate:

- **R** come il parallelo della **resistenza di perdita interna al cristallo** con la **resistenza di ingresso dell'amplificatore**;
- **C** come il parallelo della **capacità propria del cristallo**, della capacità del cavo e della **capacità di ingresso dell'amplificatore**.

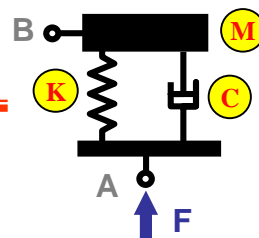


La relazione dinamica che lega lo spostamento relativo x_0 con la tensione in uscita si ricava considerando che, in frequenza, la tensione in uscita V , è pari al prodotto della corrente prodotta dallo spostamento relativo moltiplicata per l'impedenza della capacità in parallelo con la resistenza.

$$i(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = k_Q \cdot \frac{dx_0(t)}{dt} \quad I(\omega) = i\omega \cdot k_Q \cdot X_0(\omega)$$

$$V_0(\omega) = i\omega \cdot k_Q \cdot X_0(\omega) \cdot \frac{\frac{1}{i\omega C} R}{\frac{1}{i\omega C} + R}$$

$$\frac{V_0(\omega)}{X_0(\omega)} = k_Q \frac{i\omega R}{1 + i\omega CR} = \frac{k_Q}{C} \cdot \frac{i\omega CR}{1 + i\omega CR}$$



La funzione di trasferimento che lega lo spostamento relativo all'uscita dello strumento è del primo ordine di tipo passa-alto.

La pulsazione di taglio è pari ad $1/CR$ ed il guadagno pari a KQ/C .

Poiché il sistema che lega l'accelerazione imposta alla base dello strumento con la tensione in uscita è pari alla serie dei due sistemi sin qui analizzati, la funzione di trasferimento globale è pari al prodotto delle due funzioni sin qui ricavate:

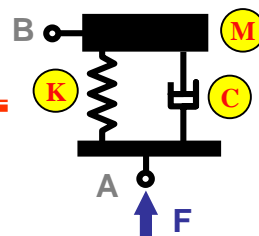
$$\frac{V_0(\omega)}{A_B(\omega)} = \frac{k_Q}{C} \cdot \frac{i\omega CR}{1 + i\omega CR} \frac{1/\omega_n^2}{1 + 2\xi \frac{i\omega}{\omega_n} + \left(\frac{i\omega}{\omega_n}\right)^2}$$

in cui si nota come il campo di frequenze utili alla misura risulta essere compreso entro un valore minimo ed un valore massimo, ovvero escludendo la continua.

Come regola pratica la banda utile dello strumento in termini di pulsazioni è compresa tra: $3/\tau$ e $\omega_n/5$.



M. De Cecco - Lucidi del corso di Misure Meccaniche e Termiche I



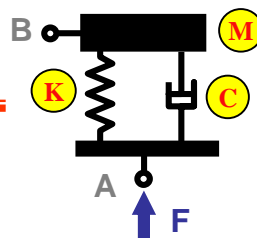
Gli ingressi di disturbo per gli accelerometri piezoelettrici sono:

1. L'**effetto piroelettrico** (per il quale, τ è molto grande, nella misura vengono a pesare in maniera sostanziale i transitori termici piuttosto che quelli di accelerazione);
2. il **rumore** (si ricordi che i microfoni possono essere di tipo piezoelettrico);
3. L'**accoppiamento meccanico tra accelerometro e la superficie** che può produrre una flessione della base dello strumento.

L'effetto di carico od inserzione che un accelerometro provoca andando a cambiare la massa modale del sistema sotto analisi, può essere ridotto riducendo la massa stessa dello strumento.



M. De Cecco - Lucidi del corso di Misure Meccaniche e Termiche I



Accelerometri di tipo (Servo) ad azzeramento

I cosiddetti servo accelerometri, che sfruttano il **principio della retroazione**, sono stati sviluppati per applicazioni che richiedono un'accuratezza maggiore rispetto a quella che si può ottenere con gli strumenti che impiegano come trasduttori di forza e spostamento molle meccaniche.

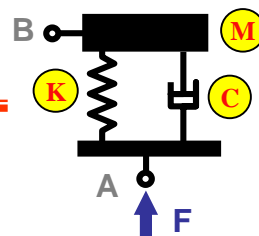
In questi strumenti ad azzeramento, **la massa** sensibile all'accelerazione viene **mantenuta molto vicino alla posizione di spostamento nullo**, rilevando tale spostamento e generando una forza magnetica ad esso proporzionale e in grado di opporsi in ogni circostanza al movimento della massa stessa rispetto alla posizione di riferimento.

Questa forza di richiamo svolge la stessa funzione della forza meccanica che si sviluppa nella molla di un accelerometro di tipo convenzionale. Quindi, si può pensare di aver sostituito la molla meccanica con una **“molla” elettrica**.

I vantaggi che derivano da questo approccio sono una maggior linearità ed **assenza di comportamento isteretico** della molla elettrica rispetto a quella meccanica.

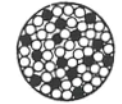


M. De Cecco - Lucidi del corso di Misure Meccaniche e Termiche I

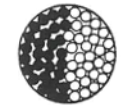


Strumenti elettro-ottici

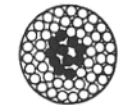
- fibre trasmettenti
- fibre riceventi



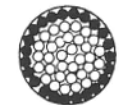
distribuzione casuale



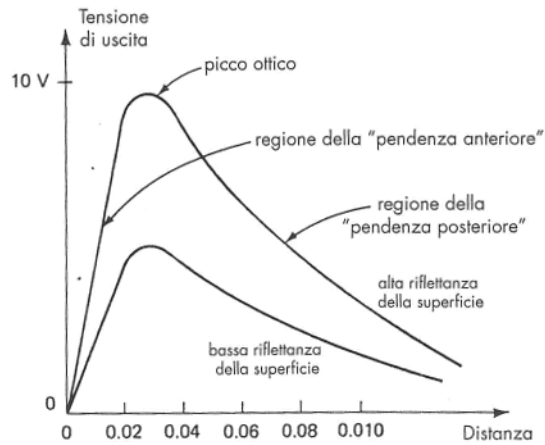
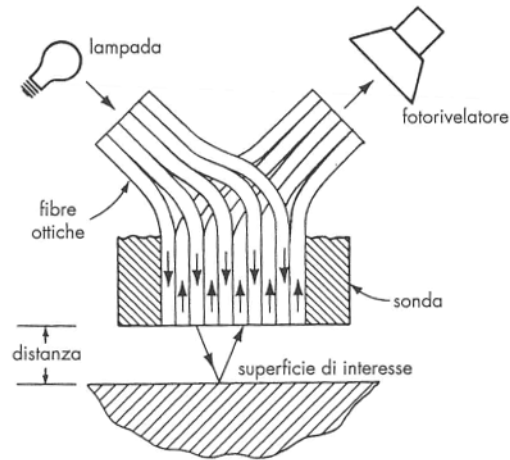
emisferica



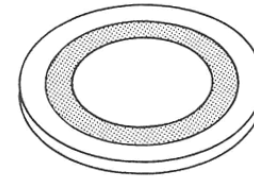
concentrica con le fibre trasmettenti esterne



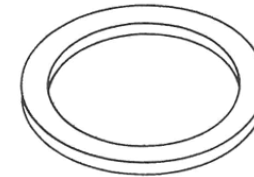
concentrica con le fibre trasmettenti interne



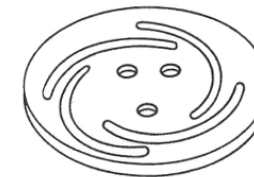
Strumenti capacitivi



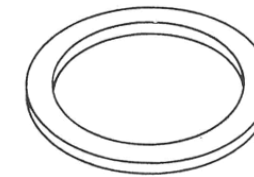
Elettrodo



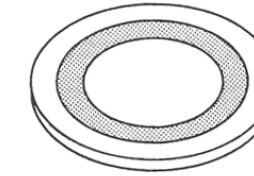
Distanziatore



Elemento sismico



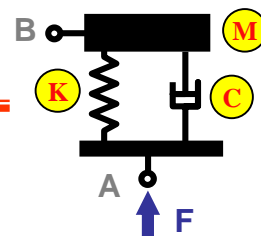
Distanziatore



Elettrodo



M. De Cecco - Lucidi del corso di Misure Meccaniche e Termiche I



Considerazioni di montaggio

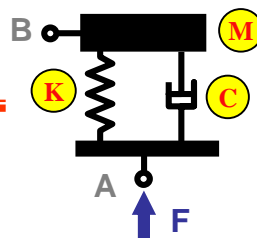
Gli accelerometri possono essere montati sulla struttura sotto test nella seguente maniera:

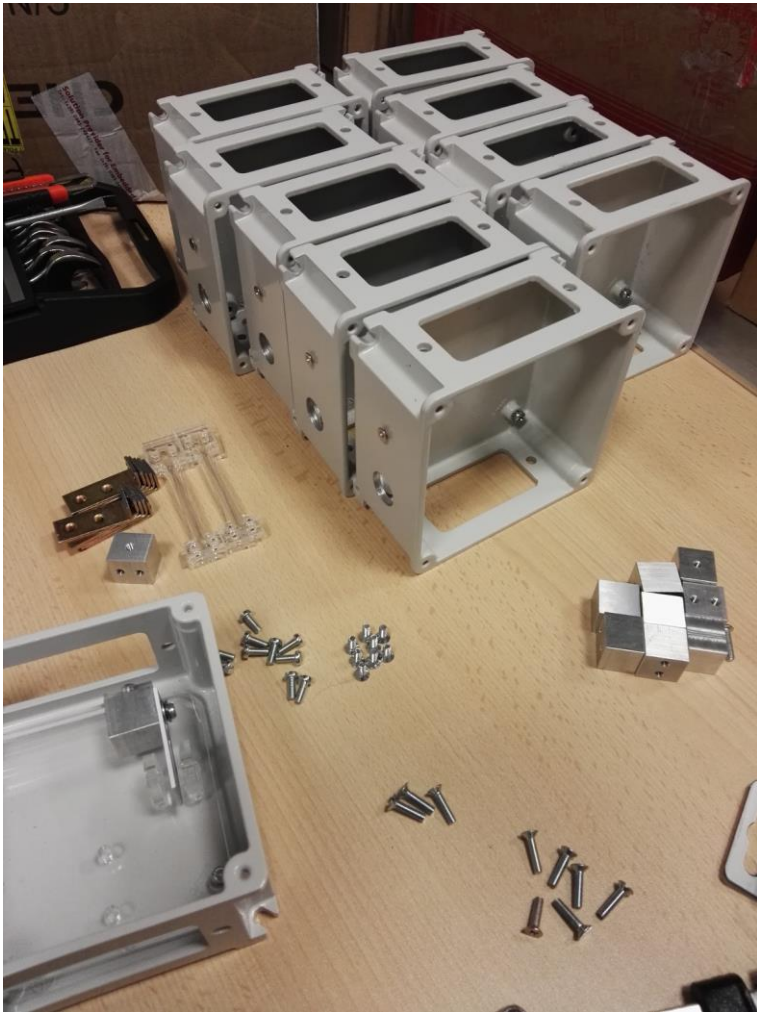
1. avvitati con aggiunta di una piccola quantità di olio molto viscoso;
2. incollati (su adesivo in kapton molto sottile);
3. connessi con cera apposita

L'effetto del montaggio è quello di ridurre la banda in frequenza delle vibrazioni trasmesse dalla struttura sotto analisi all'accelerometro; la soluzione migliore sotto questo punto di vista è la prima, la contropartita è il possibile insorgere del disturbo legato alla flessione della base dell'accelerometro.

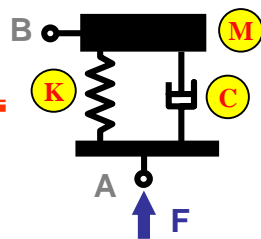


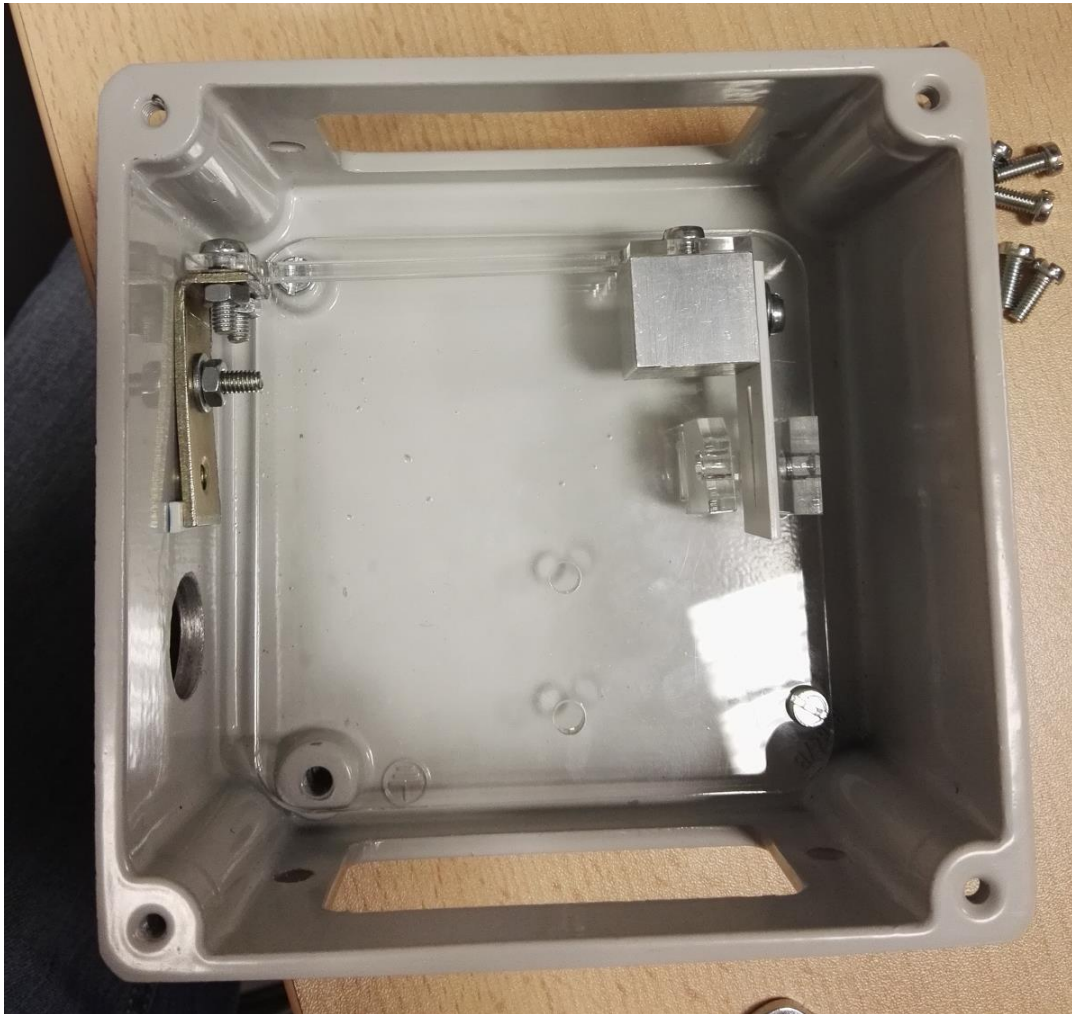
M. De Cecco - Lucidi del corso di Misure Meccaniche e Termiche I



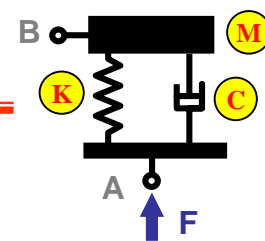


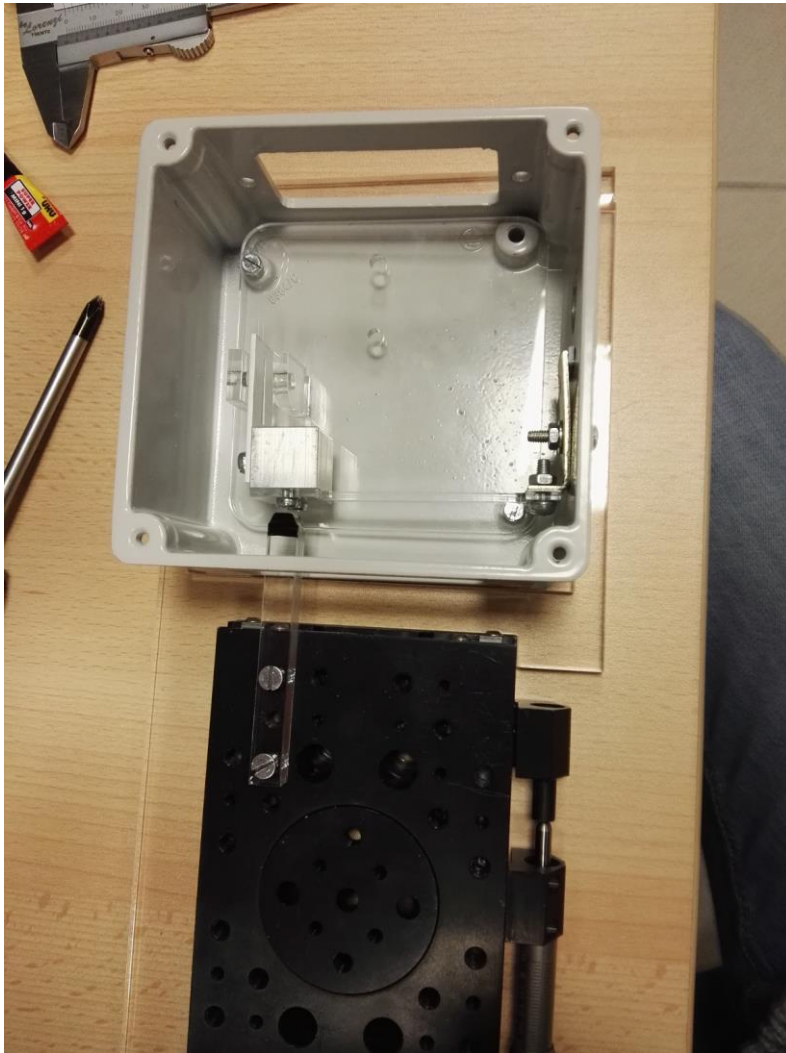
M. De Cecco - Lucidi del corso di Misure Meccaniche e Termiche I





M. De Cecco - Lucidi del corso di Misure Meccaniche e Termiche I





M. De Cecco - Lucidi del corso di Misure Meccaniche e Termiche I

