



Scuola di Scienze della Salute Umana
Corsi di Laurea Triennale (DM 270/04) in TECNICHE ORTOPEDICHE

Meccanica sperimentale

(Accelerometri)

Dott. Ing. Sara Matteoli

Sistemi non ottici: accelerometri



Gli accelerometri sono sensori non ottici e inerziali che **misurano le accelerazioni lineari** dei vari segmenti corporei su cui gli stessi vengono posizionati.

Il principio che permette il funzionamento degli accelerometri, si basa sul fatto che una **massa** accelerata presenta una propria **inerzia** che può essere misurata.

Mentre la massa è sospesa ad un elemento elastico, un sensore ne rileva lo spostamento rispetto alla struttura fissa del dispositivo.

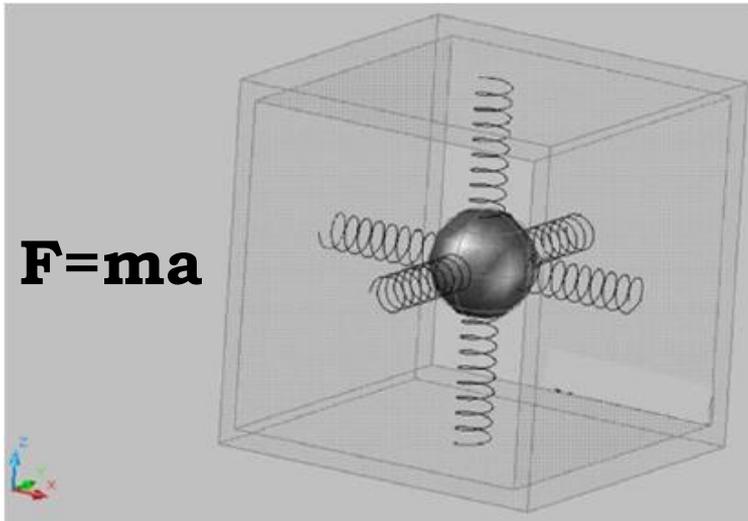
La **massa si sposta dalla sua posizione di riposo a causa dell'accelerazione presente**, in modo ad essa proporzionale. Un trasduttore presente nello strumento trasforma il segnale di natura meccanica in un segnale elettrico.



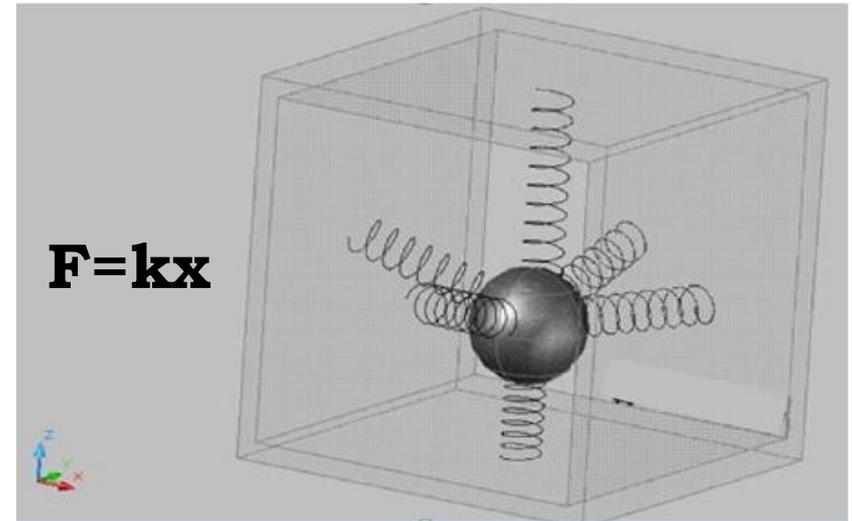
Funzionamento accelerometro



Caso ideale



Caso reale



Accelerazioni statiche →

Accelerometro ruotato sul posto

Accelerazioni dinamiche →

Accelerometro fissato su un corpo in movimento

Accelerometro monoassiale



Il più semplice accelerometro resistivo è **monoassiale**.

Può essere costruito con una massa nota, sospesa per mezzo di una molla in un alloggiamento.

Alla massa è consentito muoversi **solamente nella direzione della molla**, quindi, in questa direzione, si può quantificare l'accelerazione della massa rispetto all'accelerazione gravitazionale.



Accelerometri triassiali

Gli accelerometri **triassiali** misurano simultaneamente vibrazioni e shock **nelle 3 direzioni ortogonali** (x, y,z) poiché sono in grado di valutare le variazioni di velocità nelle tre direzioni dello spazio.

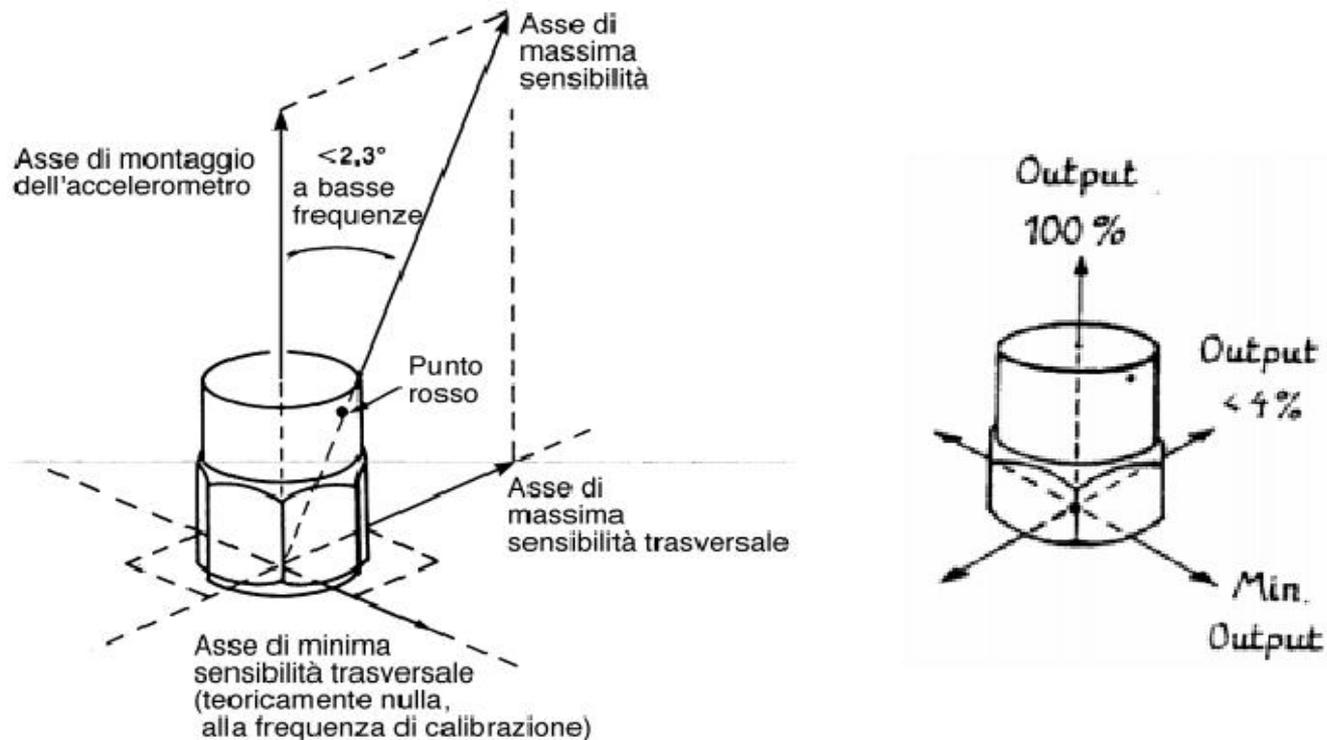


La scelta del tipo di accelerometro dipende dalla **destinazione d'uso** e da **considerazioni di tipo economico**.

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**.



Tipi di accelerometri



- Piezoelettrici
- Capacitivi
- MEMS capacitivi
- Estensimetrici
- Potenzimetri

Accelerometro piezoelettrico

Gli **accelerometri piezoelettrici** sono costruiti utilizzando l'effetto piezoelettrico dato da i cristalli di quarzo o da materiali di tipo ceramico come il Titanato di bario, BaTiO_3 , o lo Zirconato Titanato di Piombo, PZT.

Tale effetto è **reversibile** e si verifica su scale dell'ordine dei nanometri.

Alcuni cristalli, se sottoposti all'azione di una sollecitazione esterna, **generano una migrazione di cariche** che, con l'utilizzo di un apposito circuito, può essere tradotto in una **differenza di potenziale**.

La misurazione di questa permette di risalire all'intensità della forza F agente sull'elemento.

Conoscendo, quindi, F e la superficie su cui viene applicata la forza si può risalire alla pressione.

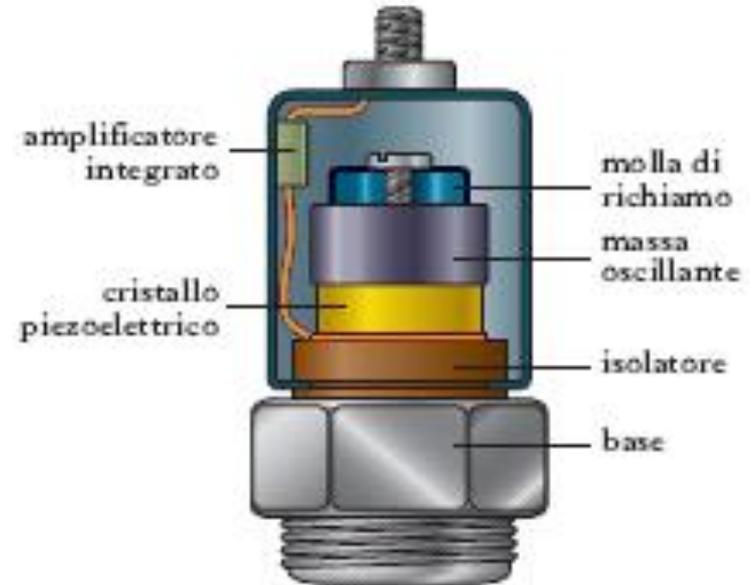


Accelerometro piezoelettrico

In questi accelerometri la massa viene sospesa sul **crystallo piezoelettrico**, che, in questo caso, costituisce sia il **sensore**, che **l'elemento elastico**.

In presenza di un'accelerazione la massa (che presenta una certa inerzia) comprime il crystallo, il quale genera un segnale elettrico proporzionale alla compressione.

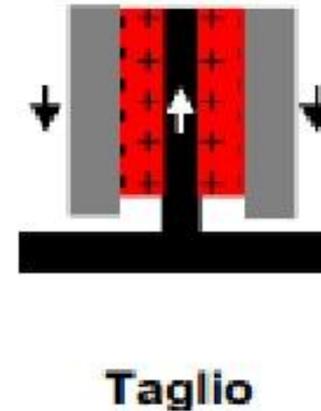
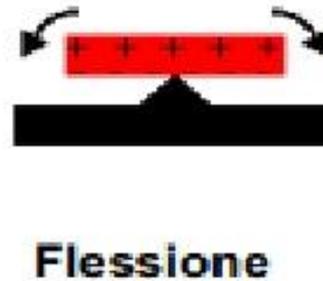
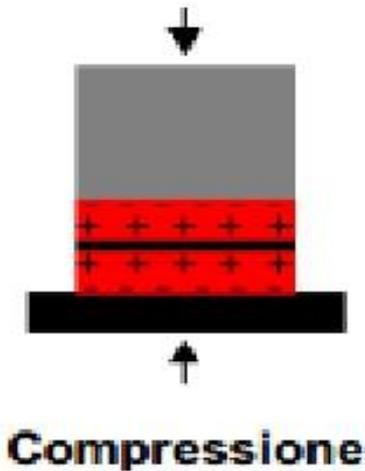
La costante di proporzionalità, detta **sensibilità del trasduttore**, è dipendente linearmente dalla costante di proporzionalità del materiale piezoelettrico e dall'entità della massa sismica.



Accelerometro piezoelettrico

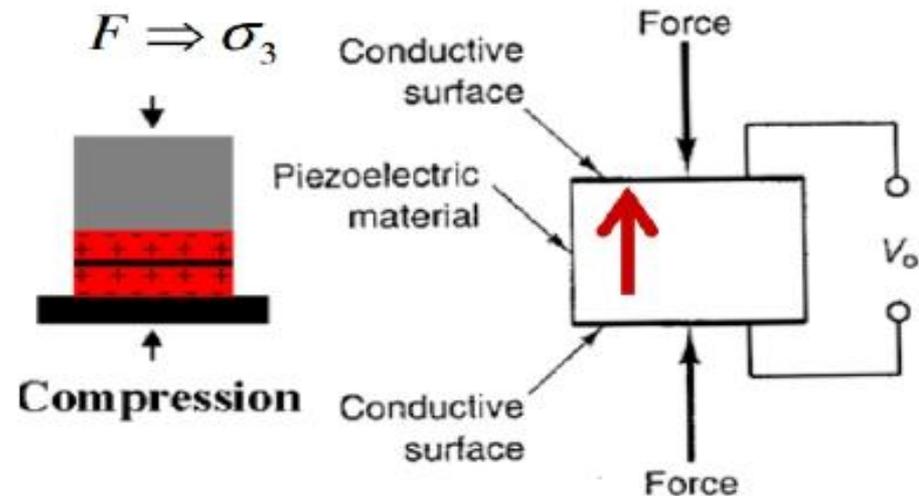
Gli accelerometri piezoelettrici possono essere a:

- **Compressione**
- **Flessione**
- **Taglio**



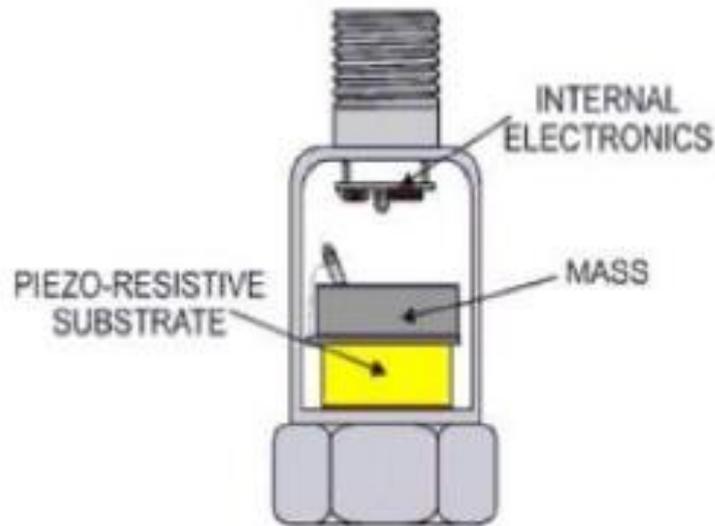
Accelerometro piezoelettrico a compressione

- La massa comprime l'elemento piezoelettrico e genera tensione sull'elemento piezoelettrico
- **Elevata rigidezza** che la rende adatta all'utilizzo con pressioni elevate
- **Elevata risonanza**: utilizzo in monitoraggio macchinari
- **Buon rapporto massa/sensibilità**
- **Elevata sensibilità al rumore**
- Certa **sensibilità ai gradienti termici**.



Accelerometro piezoelettrico a compressione

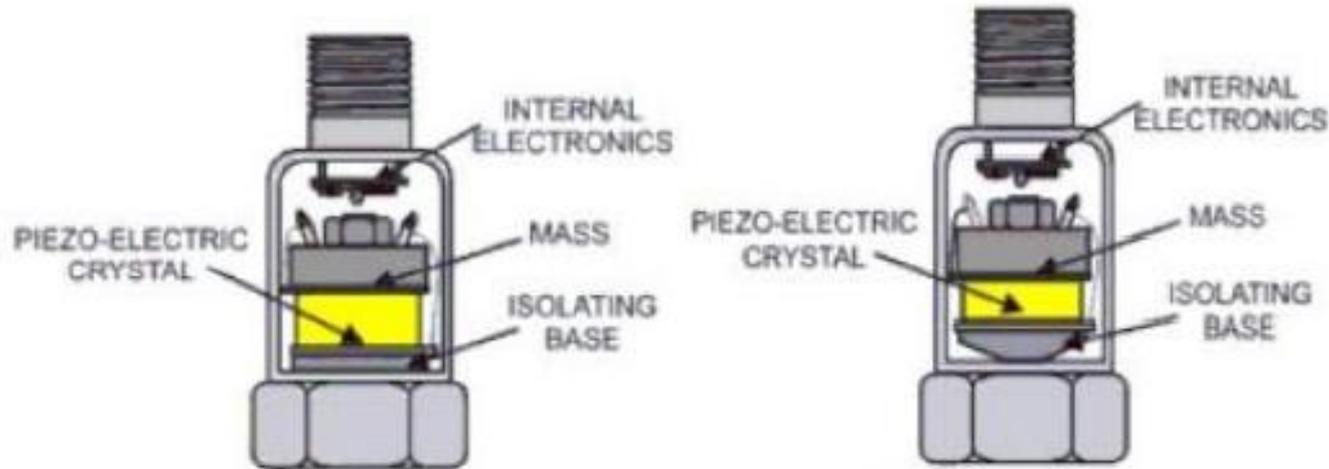
A COMPRESSIONE SINGLE «ENDED»



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

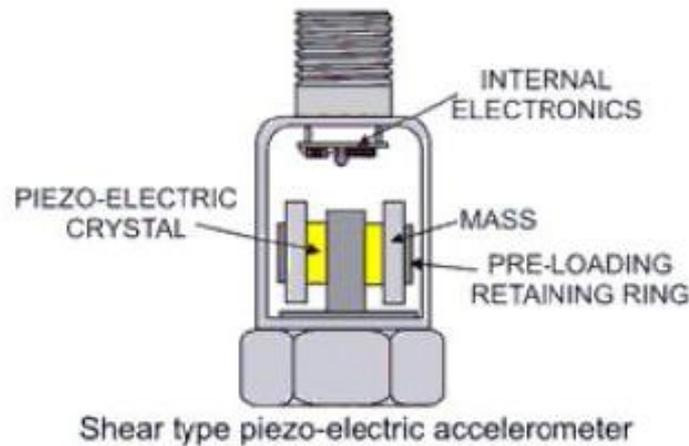
Accelerometro piezoelettrico a compressione

A COMPRESSIONE ISOLATO



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

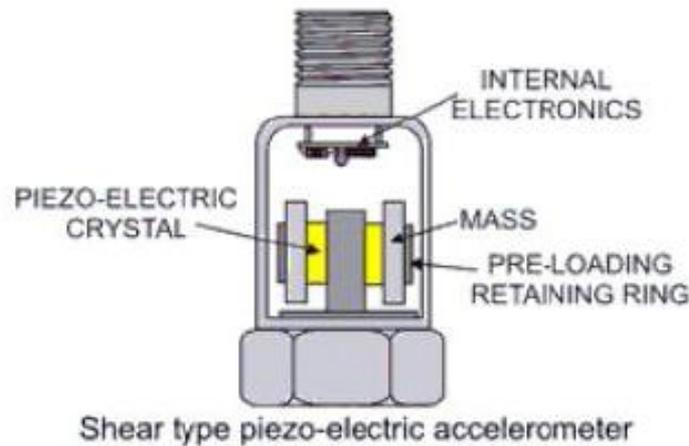
Accelerometro piezoelettrico a taglio



In un accelerometro piezoelettrico a taglio la **massa sismica sollecita il cristallo a taglio anziché a compressione.**

Vengono utilizzati in applicazioni in cui si verificano importanti distorsioni della base dovute a transienti termici oppure ad una flessibilità notevole della base stessa.

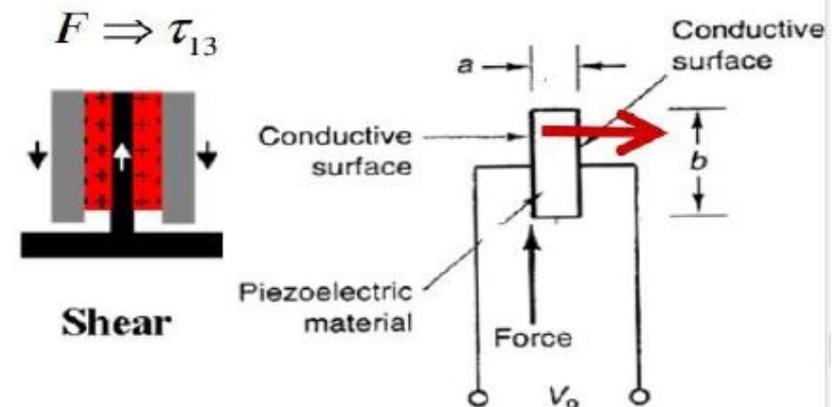
Accelerometro piezoelettrico a taglio



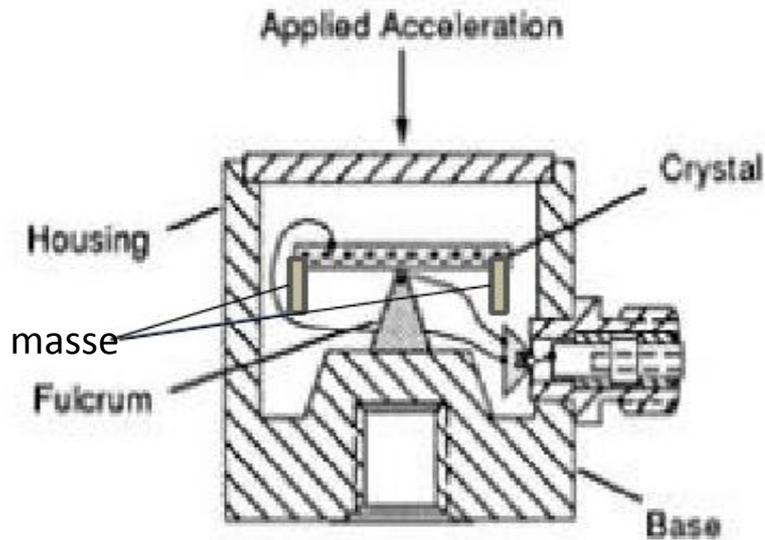
In un accelerometro piezoelettrico a taglio la **massa sismica sollecita il cristallo a taglio anziché a compressione.**

Vengono utilizzati in applicazioni in cui si verificano importanti **distorsioni della base** dovute a transienti termici oppure ad una flessibilità notevole della base stessa.

- Adatti a bassa frequenza
- Bassa sensibilità alle variazioni di T
- Sensori ridotti che minimizzano l'effetto della massa aggiuntiva



Accelerometro piezoelettrico a flessione



- Frequenze di risonanza basse
- No monitoraggio macchinari
- Sensibilità elevata
- Applicazione sismiche (bassa frequenza)

Precarico:

- Per far funzionare l'accelerometro in un tratto lineare
- Permette di misurare sia accelerazioni positive che negative

Accelerometro piezoelettrico

L'accelerometro piezoelettrico può essere considerato:

- **generatore di cariche elettriche**: la sensibilità dell'accelerometro, indicata con S_q , viene espressa come la quantità di carica generata per unità di accelerazione e misurata in pC/ms^{-2}
- **generatore di tensione**: la sensibilità, indicata con S_v , viene espressa come la tensione generata per unità di accelerazione e misurata in mV/ms^{-2}

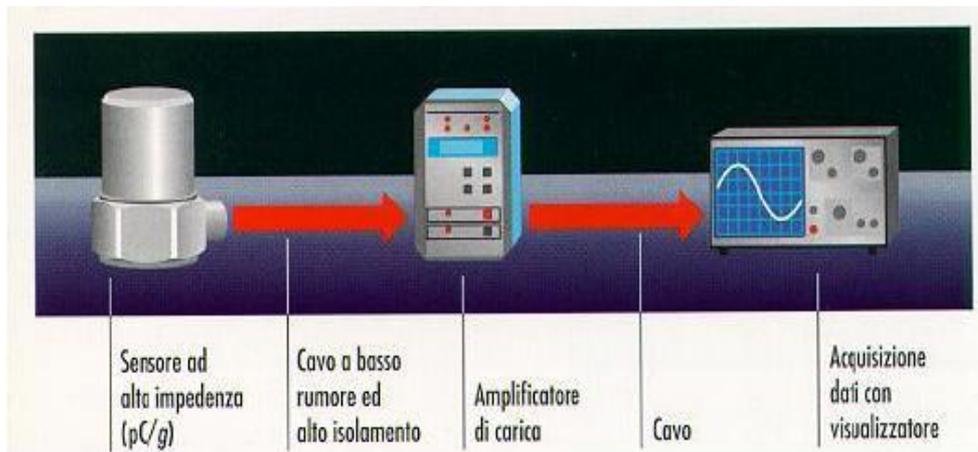
Generalmente **è conveniente** considerare l'accelerometro come **generatore di carica** ed amplificare il segnale con un amplificatore di carica, perché in tal modo **la sensibilità del sistema risulta indipendente dalla capacità dei cavi di collegamento.**

Uscita accelerometro

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”**.



I **cavi di collegamento** tra **accelerometro** e **amplificatore di carica** costituiscono un **elemento molto delicato** della catena di misura e devono essere ad alto isolamento e basso rumore. La loro lunghezza non può eccedere qualche metro.

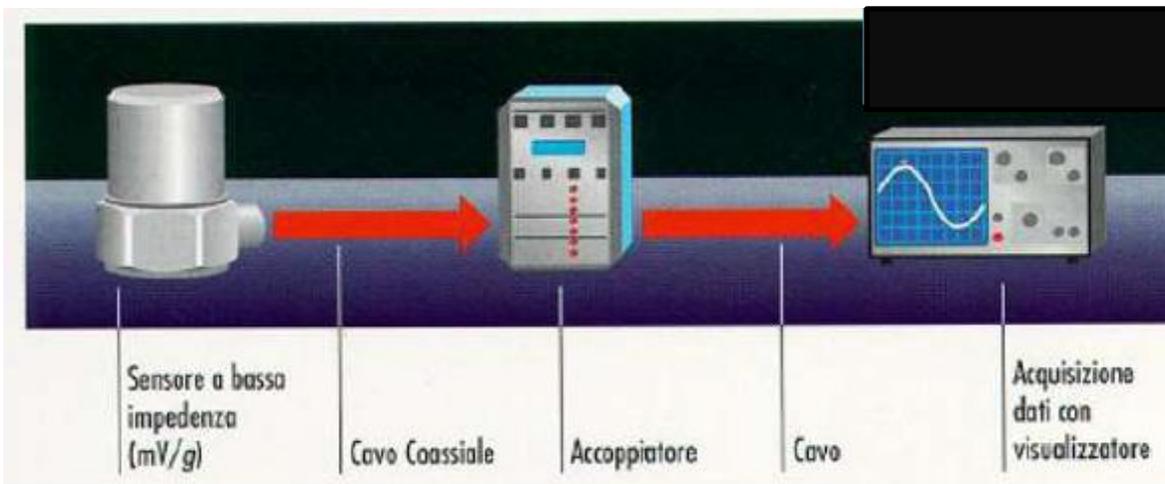
Uscita accelerometro

Quando il segnale in uscita dall'accelerometro è una **differenza di potenziale**, la catena di misura è detta a **“bassa impedenza”**

Questo è il caso di accelerometri piezoelettrici ICP/IEPE.

Gli accelerometri ICP (Integrated Circuit Piezoelectric) hanno un **circuito elettronico integrato all'interno del trasduttore** e non necessitano pertanto di un preamplificatore esterno, ma solo di alimentatore esterno a corrente continua.

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



L'accelerometro ICP è connesso alla sorgente di alimentazione con 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.

Montaggio accelerometro

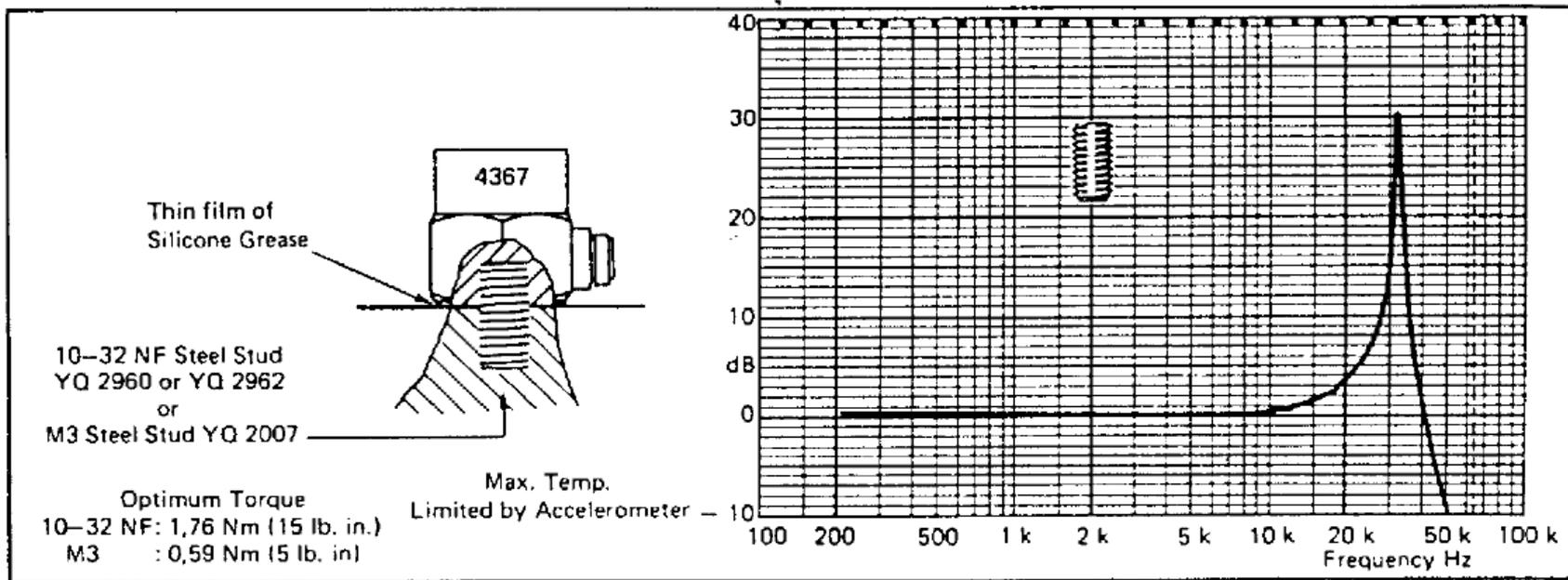
Il metodo di **montaggio** dell'accelerometro sul punto di misura rappresenta uno dei **fattori più critici per l'accuratezza della misura**.

Un montaggio non corretto dà luogo ad una riduzione della frequenza di risonanza del trasduttore montato, che può limitare notevolmente il campo di frequenza utile dello strumento.

Il montaggio ideale è quello che utilizza un grano filettato con il quale l'accelerometro viene avvitato su una superficie piana e liscia.

Un **leggero strato di grasso** applicato sulle superfici di montaggio prima di serrare il collegamento filettato di solito **migliora la rigidità dell'accoppiamento**.

Montaggio accelerometro



Accelerometri piezoelettrici

I **vantaggi** di questi accelerometri sono:

- Campi di frequenza ampi (1-30000Hz)
- Buona linearità su un campo dinamico esteso
- L'accelerazione può essere integrata per ottenere la velocità e lo spostamento
- Usato in varie condizioni ambientali
- Attivi e quindi non necessitano di alimentazione
- Robusti
- Ingombro contenuto
- Non contengono parti mobili soggette ad usura
- Resistenti a sollecitazioni di shock elevate

Accelerometri piezoelettrici

Gli **svantaggi** di questi accelerometri sono:

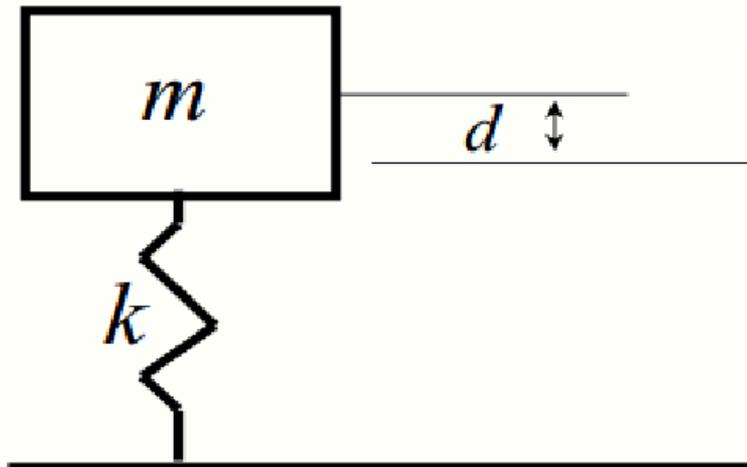
- No misura accelerazioni statiche
- Limitato superiormente ($1/3-1/4$ di ω_n)
- Limitato inferiormente (1 Hz)
- Bassa sensibilità (ICP)
- Correnti verso terra
- Rumore elettromagnetico
- Rumore triboelettrico
- All'aumentare della massa la sensibilità diminuisce
- Zero-shift
- Non oltrepassare i 250° C

} uscita ad alta
impedenza

Accelerometri capacitivi

L'accelerometro capacitivo sfrutta, come principio per la rilevazione dello spostamento della massa, la **variazione della capacità elettrica** di un condensatore al variare della distanza tra le sue armature.

La **variazione di capacità** di un condensatore risulta proporzionale allo **spostamento della massa** sismica.



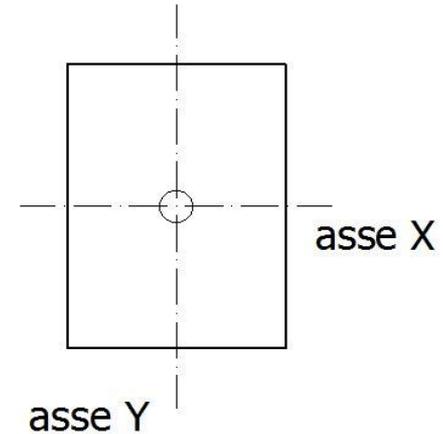
$$C = \varepsilon \frac{A}{d}$$

Quale accelerometro scegliere?

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

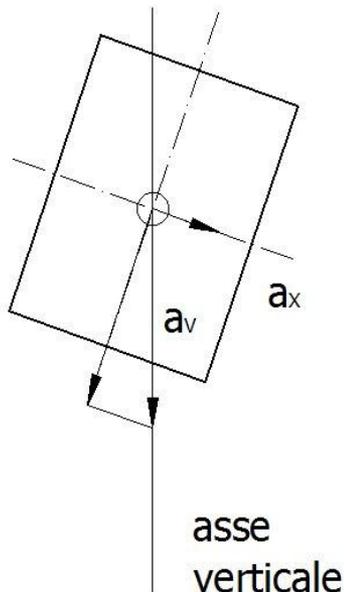
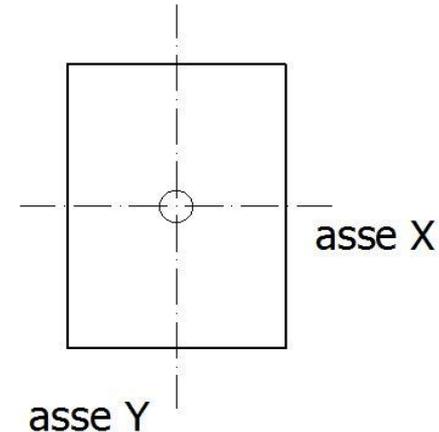
Applicazioni: prova di salto

Il test consisteva nel fare **un piccolo salto** (restando dritti e in verticale) indossando una cintura con un accelerometro biassiale (vedi figura);



Applicazioni: prova di salto

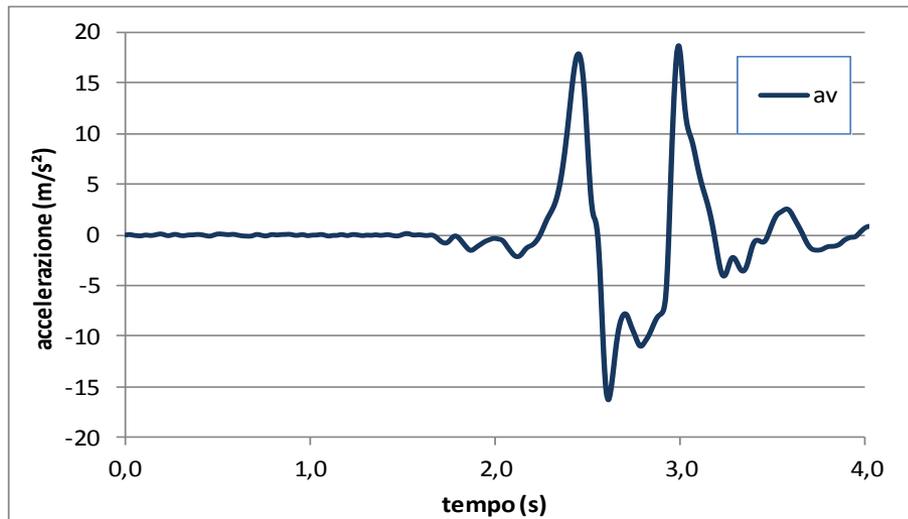
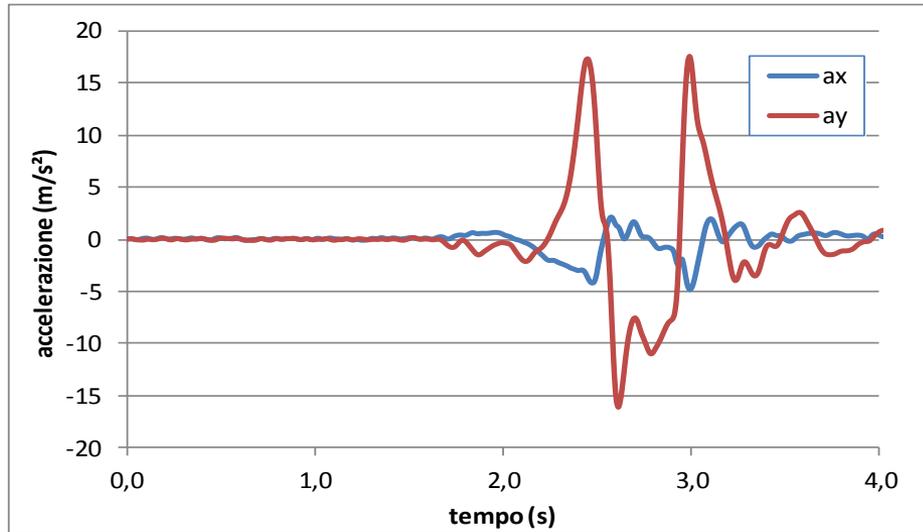
Il test consisteva nel fare **un piccolo salto** (restando dritti e in verticale) indossando una cintura con un accelerometro biassiale (vedi figura);



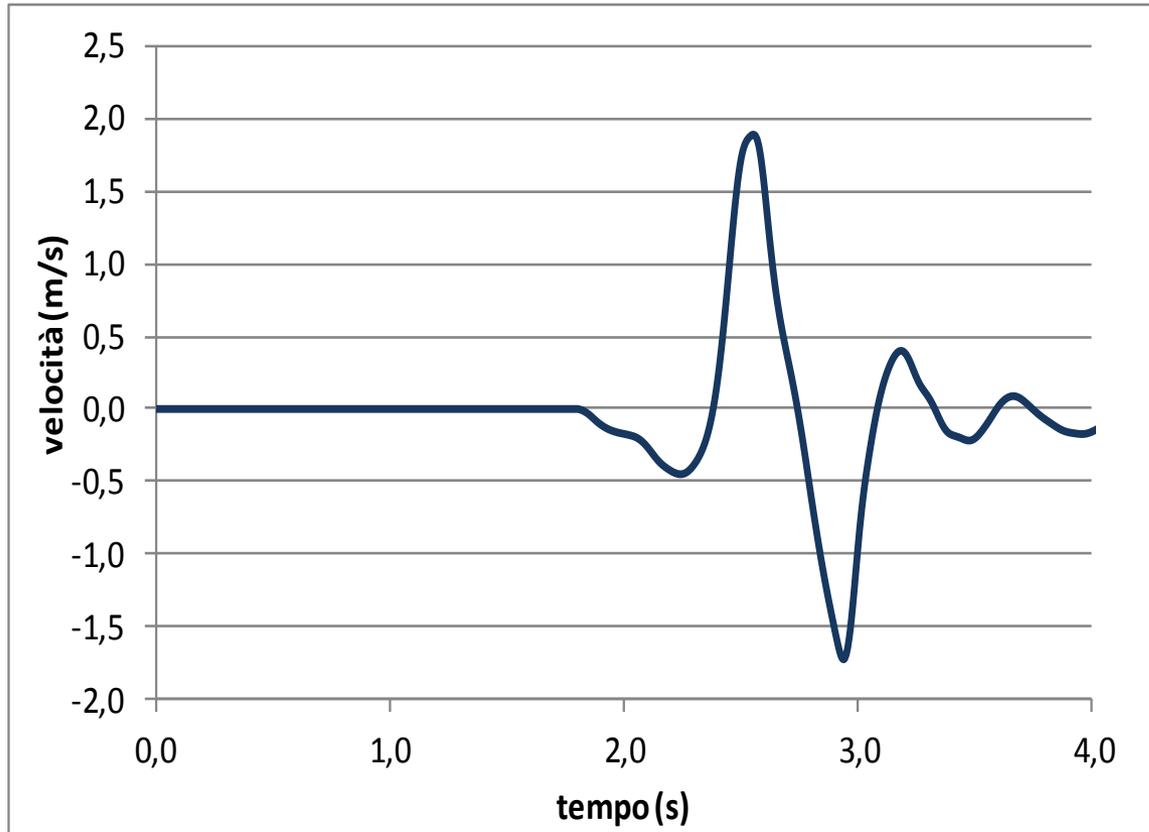
Se l'accelerometro è mantenuto **perfettamente verticale** allora l'accelerazione lungo l'asse X è sempre nulla; in realtà **durante il salto è difficile mantenere l'accelerometro verticale**, quindi si legge qualcosa lungo l'asse X, cioè la proiezione dell'accelerazione verticale (supponiamo che sia solo la gravità).

Possiamo ricavare, istante per istante, **l'angolo di inclinazione, che possiamo usare per calcolare la sola componente verticale dell'accelerazione (a_v)**.

Applicazioni: prova di salto

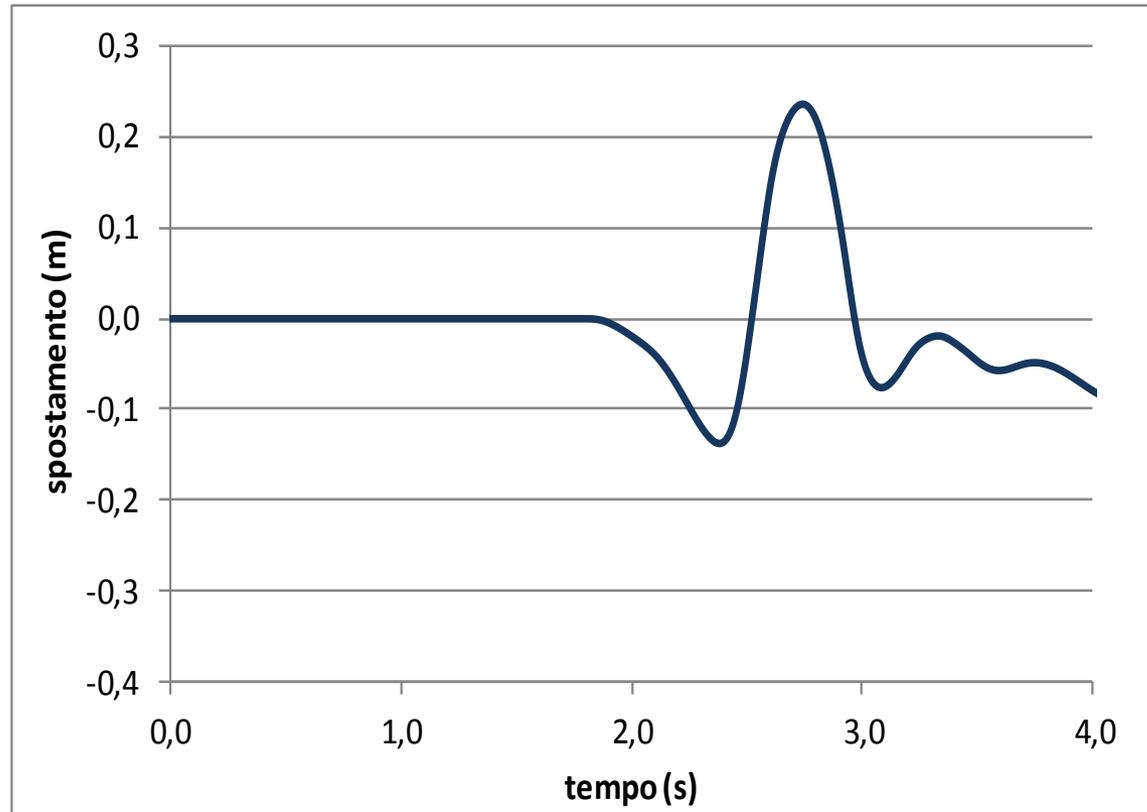


Applicazioni: prova di salto



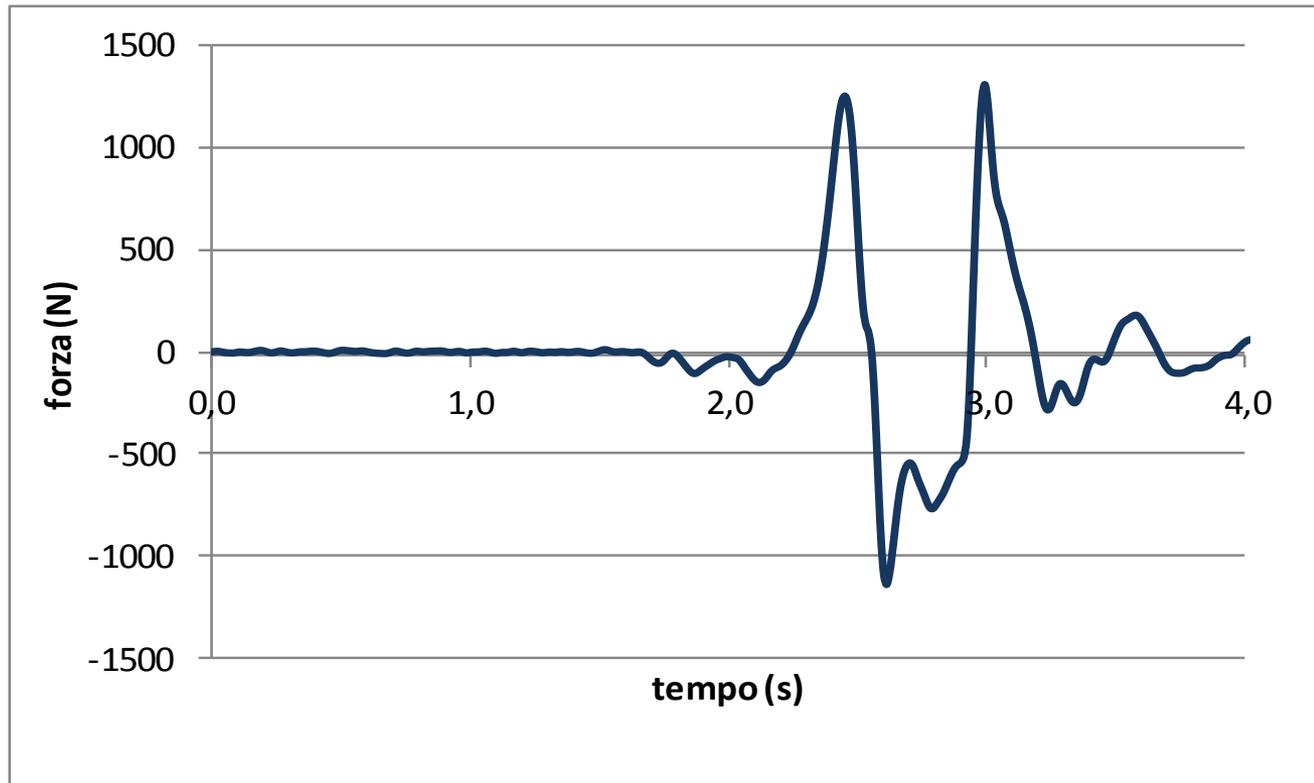
Integrando a_v si ricava la velocità.

Applicazioni: prova di salto



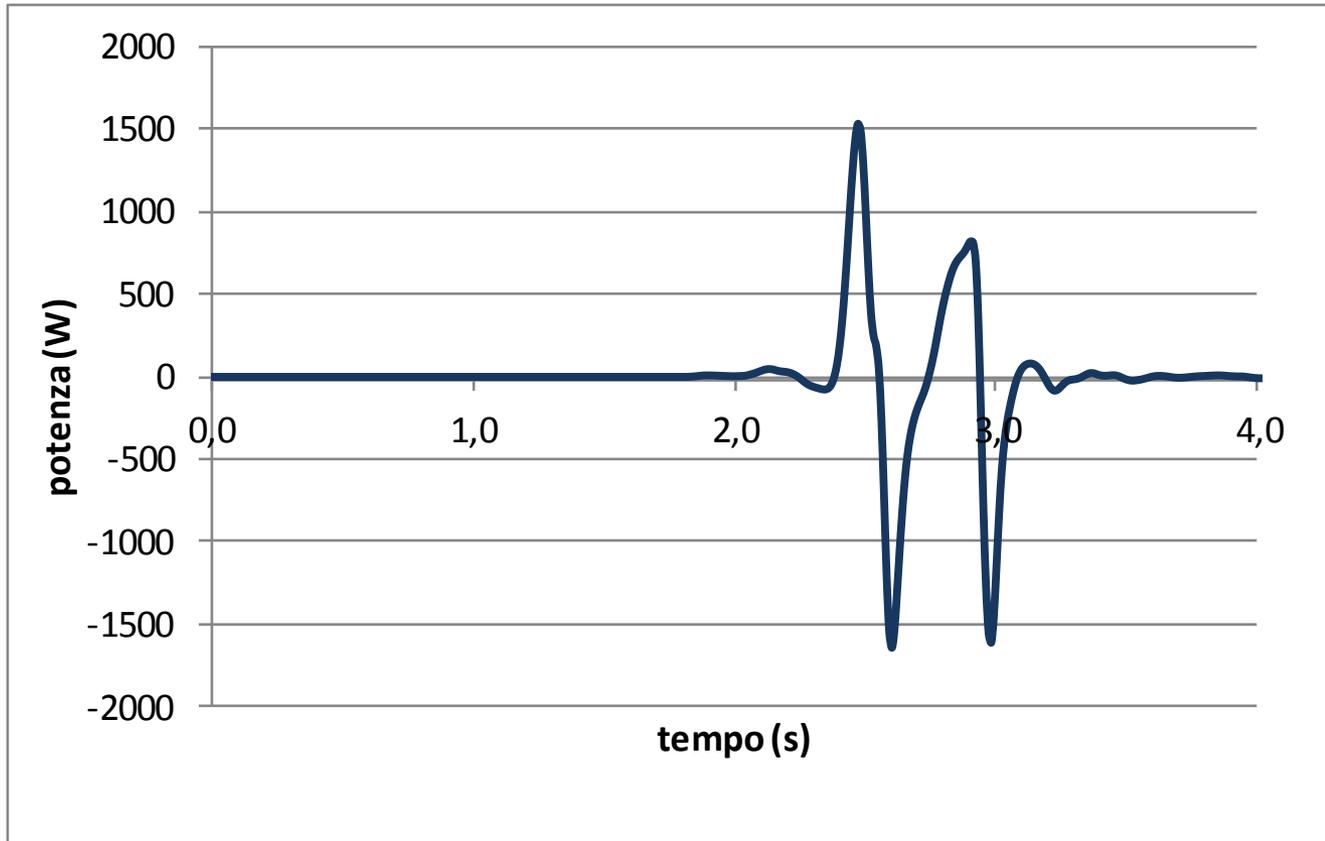
Integrando la velocità si trova lo spostamento.

Applicazioni: prova di salto



Il prodotto della massa per l'accelerazione fornisce la forza (ma ha senso solo quando i piedi sono a contatto col suolo!).

Applicazioni: prova di salto



Il prodotto della forza per la velocità fornisce la potenza.

Applicazioni: prova di compressione

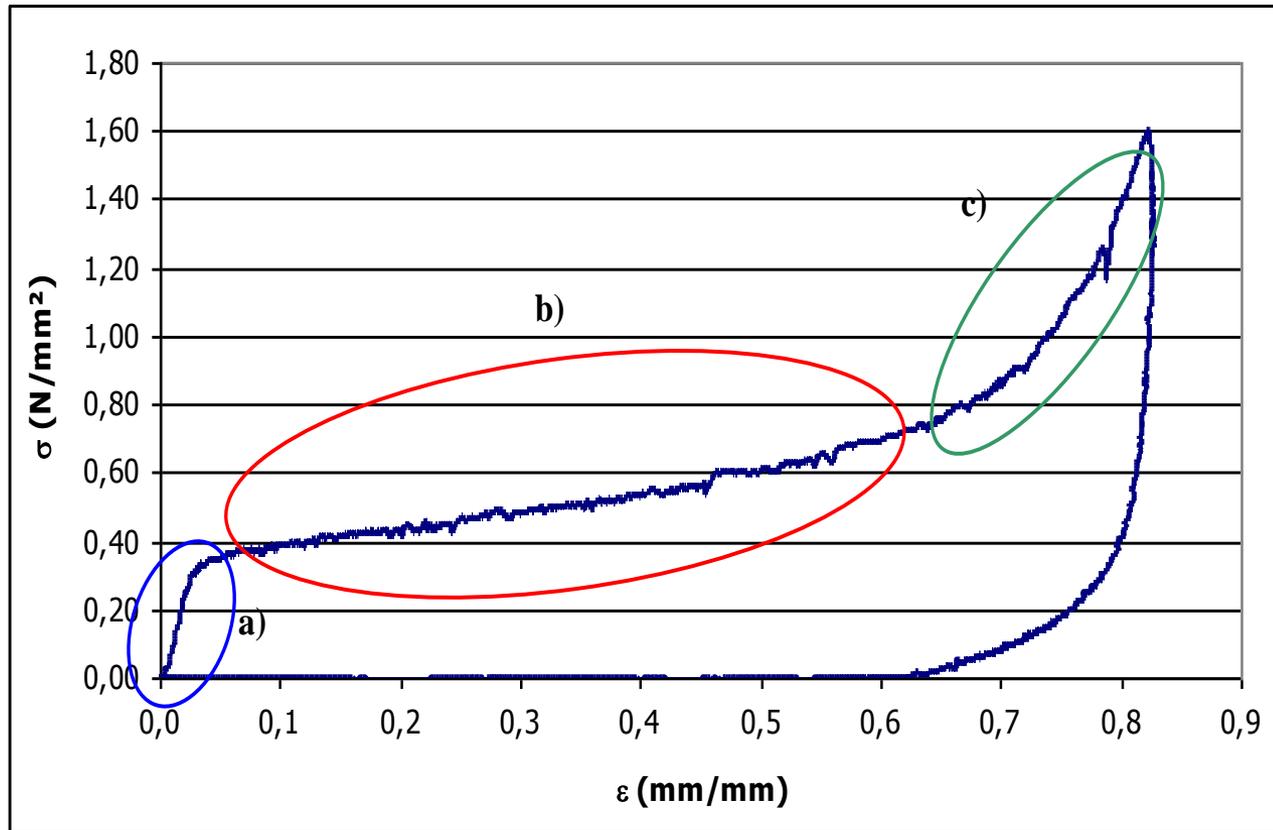
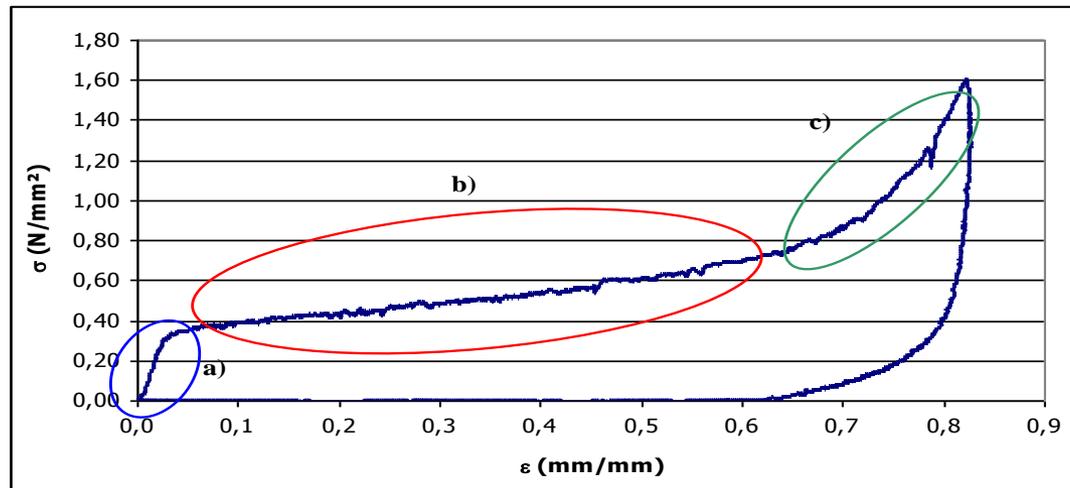


Diagramma tensione nominale – deformazione durante una prova quasi statica (polistirolo espanso)

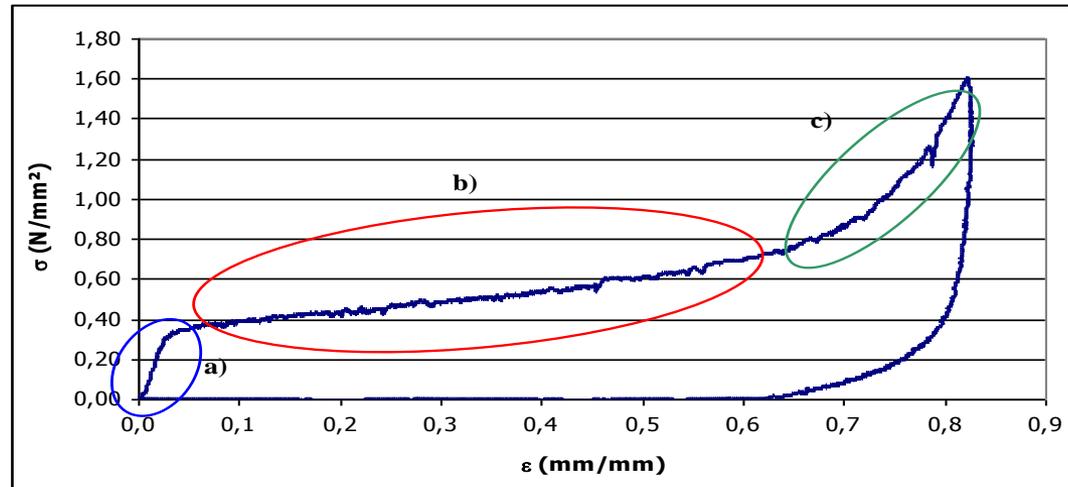
Applicazioni: prova di compressione



Il diagramma della tensione in funzione della deformazione mostra un **andamento tipico**, e si possono distinguere **tre zone principali**:

- un primo tratto con comportamento approssimativamente **lineare-elastico**; per questo tratto si può valutare la pendenza e il modulo di Young;
- una zona con lento aumento della tensione con andamento circa **lineare**;
- una zona con rapido aumento della tensione e andamento circa **esponenziale**.

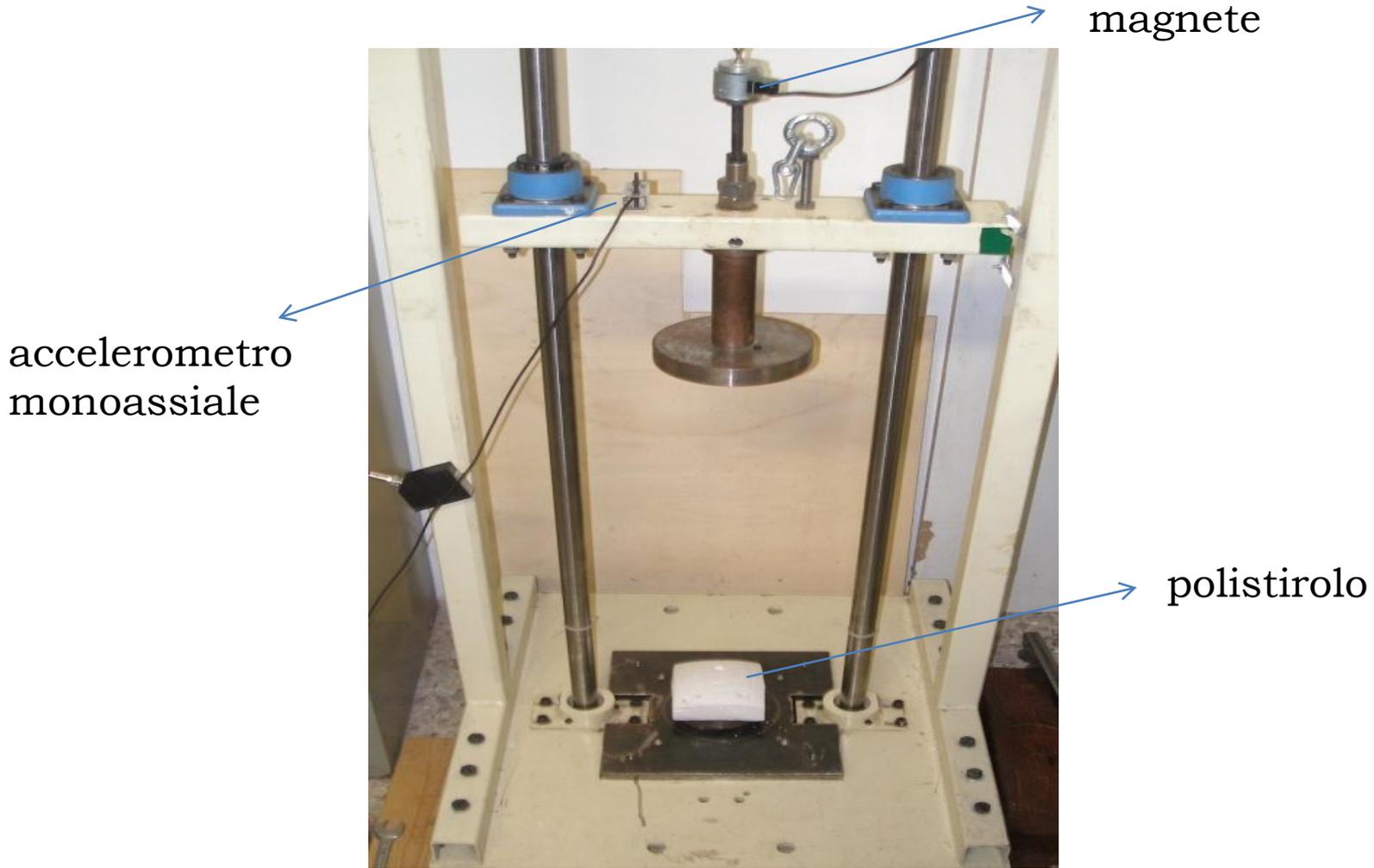
Applicazioni: prova di compressione



E' evidente il fenomeno **dell'isteresi**, legato all'elevata dissipazione di energia. In casi simili a questo si può avere una **elevata influenza della velocità di deformazione** e può essere utile eseguire prove di impatto.

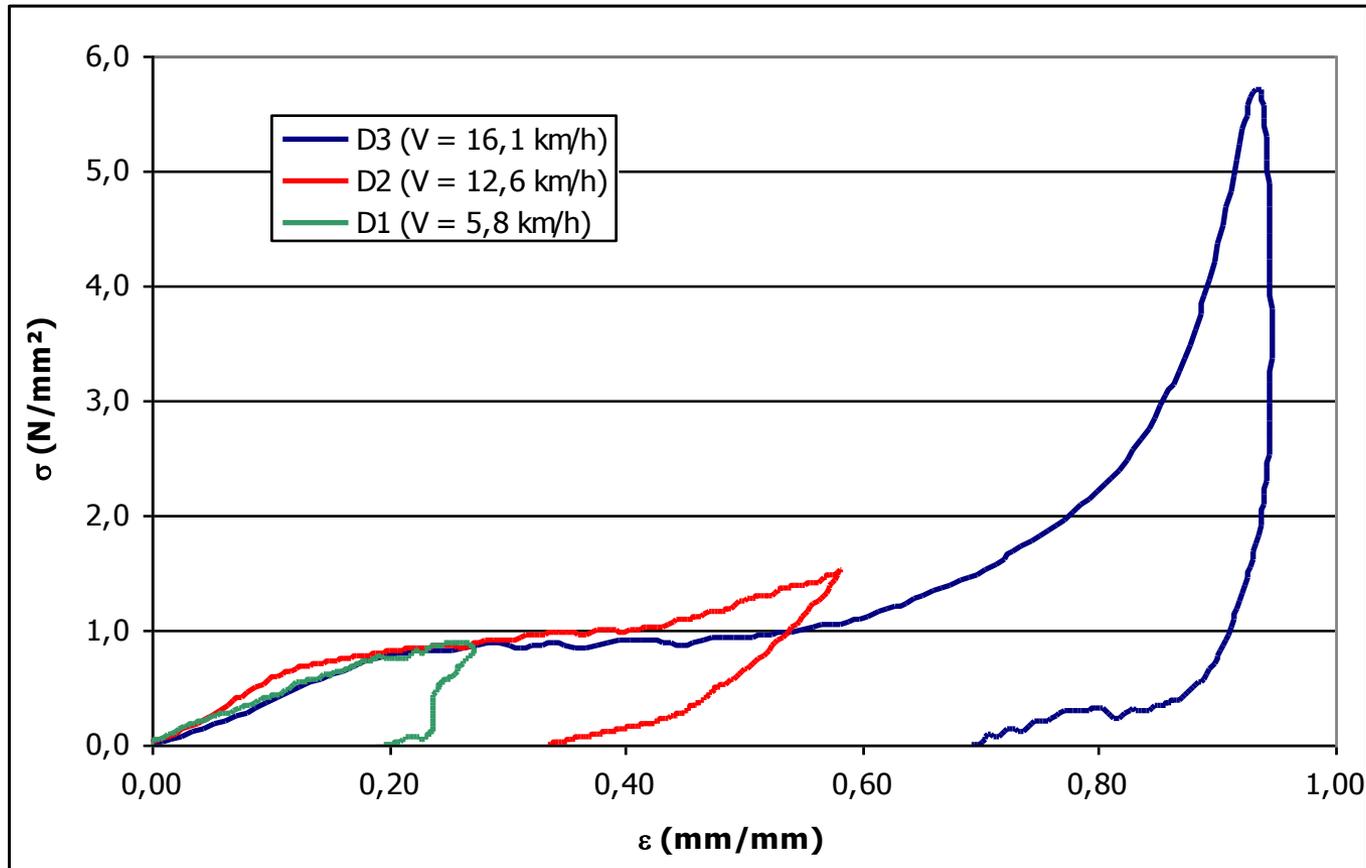
Un modo per misurare la forza applicata può essere quello di usare un **impattatore di massa nota con un accelerometro applicato sopra**. Per ricavare lo spostamento (e quindi la deformazione) è possibile integrare due volte l'accelerazione.

Applicazioni: prova di compressione



Macchina per le prove d'impatto

Applicazioni: prova di compressione



Confrontando con la prova statica si vede che a causa della velocità di applicazione del carico il materiale manifesta una maggiore rigidità (per avere le stesse deformazioni occorrono tensioni maggiori).