

**STRATEGIE INNOVATIVE  
DI PROGETTO  
DELLE STRUTTURE**

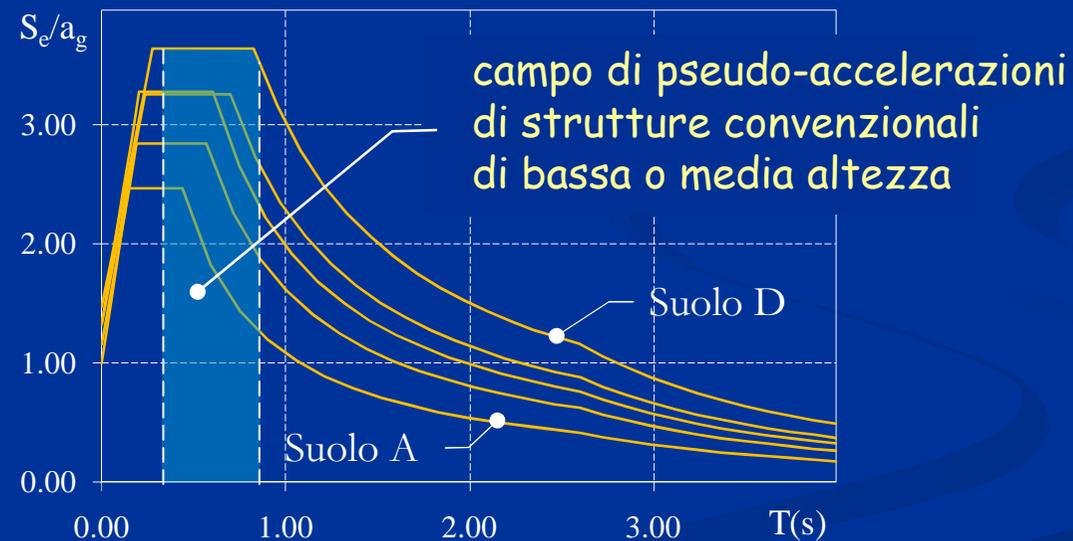
# Tecniche convenzionali di progettazione

LA PRATICA CONVENZIONALE DI COSTRUZIONE  
ASSUME CHE LE STRUTTURE SIANO FISSE ALLA BASE

- Le caratteristiche dinamiche delle strutture fisse alla base sono determinate dalle caratteristiche generali del sistema strutturale (resistenze dei materiali strutturali, tipologia strutturale, distribuzione degli spazi, ecc)
- Il progettista può modificare solo leggermente queste caratteristiche dinamiche

# Tecniche convenzionali di progettazione

La pratica convenzionale di costruzione fa sì che la maggior parte delle strutture per edifici abbiano caratteristiche dinamiche che danno luogo ad elevate risposte sismiche



Spettri di normativa in termini di pseudo-accelerazione normalizzata

# Tecniche convenzionali di progettazione

LA PRATICA CONVENZIONALE DI COSTRUZIONE  
ASSUME CHE LE STRUTTURE SIANO FISSE ALLA BASE

- Le strutture fisse alla base non possono essere realisticamente progettate per rimanere elastiche durante eventi sismici di notevole intensità
- La comune pratica tecnica prevede che esse siano progettate in modo tale da sviluppare danni controllati in occorrenza di eventi sismici

# Tecniche convenzionali di progettazione

Danni ad elementi strutturali



# Tecniche convenzionali di progettazione

Danni ad elementi non strutturali



# Obiettivi delle tecniche innovative

Migliorare la prestazione delle strutture a tutti i livelli di rischio :

- riducendo l'interruzione d'uso delle attività
- riducendo le accelerazioni al fine di minimizzare i danni agli oggetti contenuti nelle costruzioni
- riducendo il danno agli elementi strutturali e non-strutturali

# Controllo delle vibrazioni

Il miglioramento delle prestazioni sismiche delle strutture può essere ottenuto attraverso il controllo della risposta :

1.



CONTROLLO  
PASSIVO

2.



CONTROLLO  
SEMI-ATTIVO

3.



CONTROLLO  
ATTIVO

# Controllo delle vibrazioni

## CONTROLLO ATTIVO

Un sistema di controllo attivo è progettato per monitorare lo stato di una struttura ad un determinato istante, per processare questa informazione e per applicare, in breve tempo, un insieme di azioni tali da modificare questo stato nel modo desiderato.

Un sistema di controllo attivo é pertanto costituito da tre componenti:

- Un sistema di monitoraggio in grado di rilevare lo stato di risposta della struttura e di registrare le informazioni mediante un sistema di acquisizione;
- Un sistema di controllo che riceve i dati dal sistema di monitoraggio e decide sulle contromisure da applicare;
- Un sistema attuatore che fisicamente applica le contromisure alla struttura.

# Controllo delle vibrazioni

## CONTROLLO PASSIVO

Un sistema passivo è progettato per influenzare la risposta strutturale senza che le proprie caratteristiche siano modificate nel corso dell'evento sismico.

(ovvero il sistema passivo subisce la risposta sismica e non modifica le proprie caratteristiche al variare dell'risposta sismica della struttura)

## Attenzione !

Differentemente dai sistemi di controllo attivi, quelli passivi non richiedono alcuna fonte di energia esterna per il loro funzionamento.

# Controllo delle vibrazioni

## CONTROLLO SEMIATTIVO

I dispositivi semiattivi possono essere visti come dispositivi passivi controllabili

(Si citano dissipatori oleodinamici con fluido magneto-reologico, in grado cioè di variare le proprie caratteristiche meccaniche, in particolare la viscosità, al variare del campo magnetico in cui si trovano immersi. Il campo magnetico può essere agevolmente modificato controllando una corrente di bassa potenza che passa in circuiti elettrici opportunamente collocati attorno al dispositivo. Altri esempi sono dispositivi controllabili ad attrito e dispositivi a rigidità variabile)

## Attenzione !

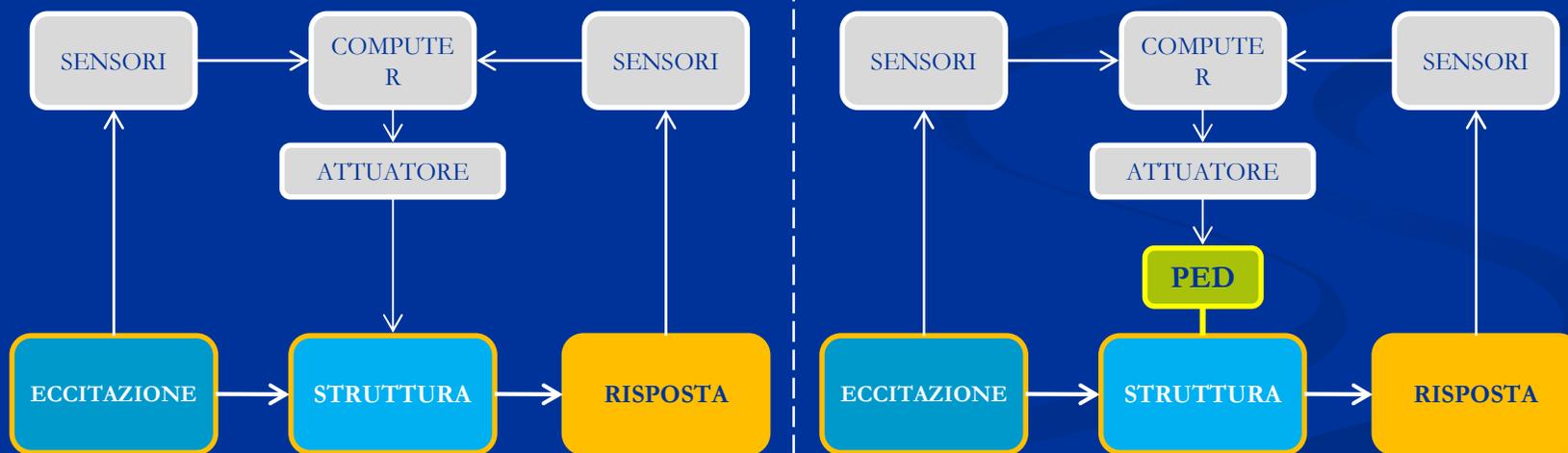
I dispositivi semiattivi richiedono quantità di energia che sono di ordini di grandezza inferiori a quelle necessarie per dispositivi pienamente attivi.

# Controllo delle vibrazioni



Struttura convenzionale

Struttura con controllo passivo



Struttura con controllo attivo

Struttura con controllo semiattivo

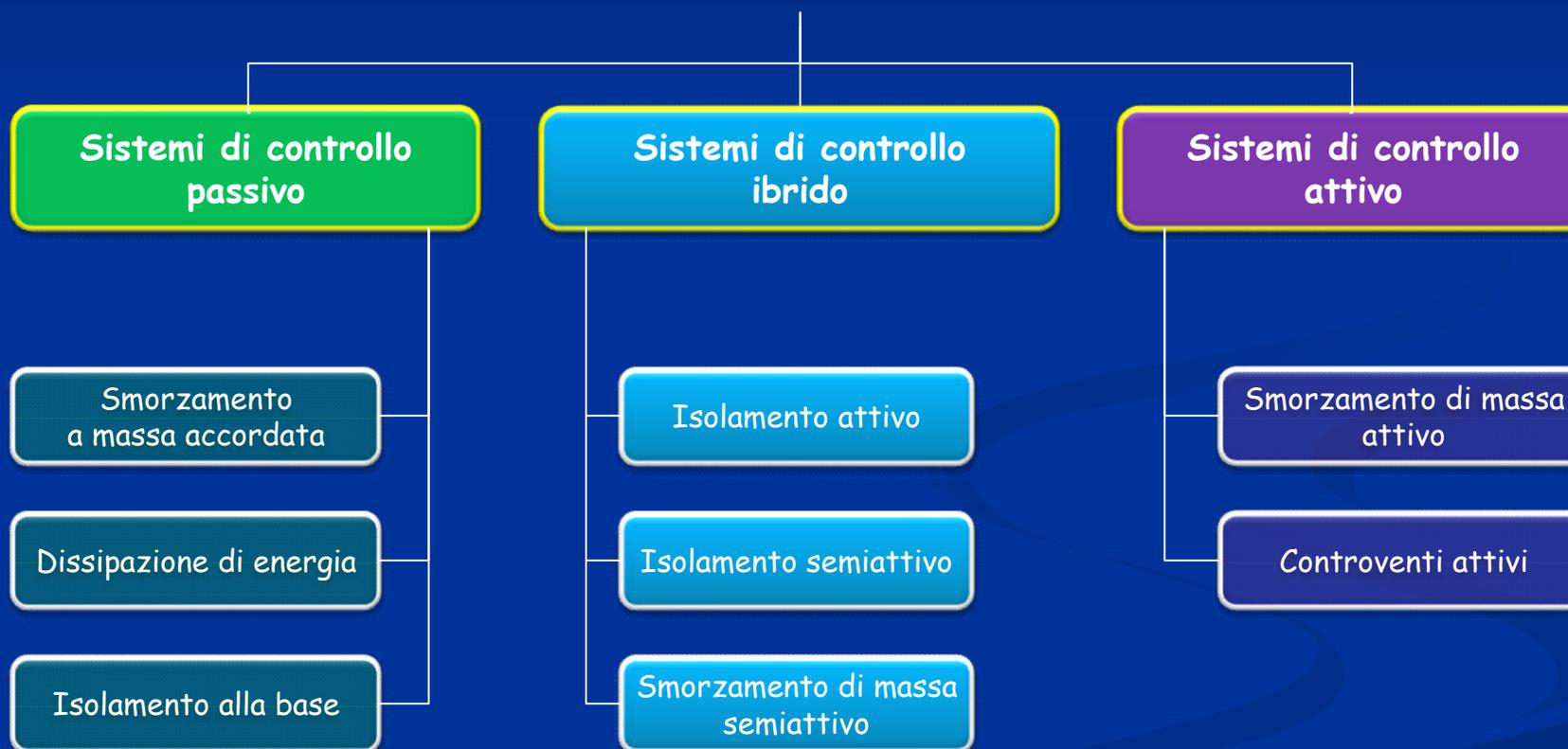
# Controllo delle vibrazioni

E' possibile avere anche un controllo ibrido, ovvero un controllo che utilizza dispositivi sia passivi che attivi.

## CONTROLLO IBRIDO

Questo tipo di controllo si giova dei vantaggi delle tipologie di controllo passivo ed attivo e ne limita gli svantaggi

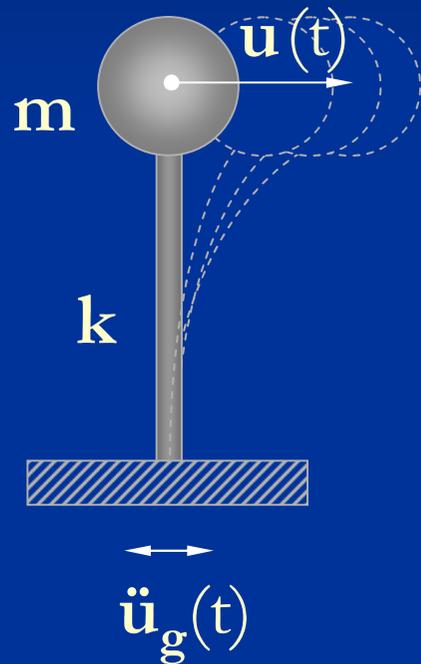
# Controllo delle vibrazioni



L'isolamento alla base è il sistema più comune

# Equazione di bilancio energetico

Formulazione assoluta



L'equazione del moto dell'oscillatore si può scrivere:

$$m\ddot{u}_t + c\dot{u} + f_s = 0$$

Integrando rispetto allo spostamento si ha:

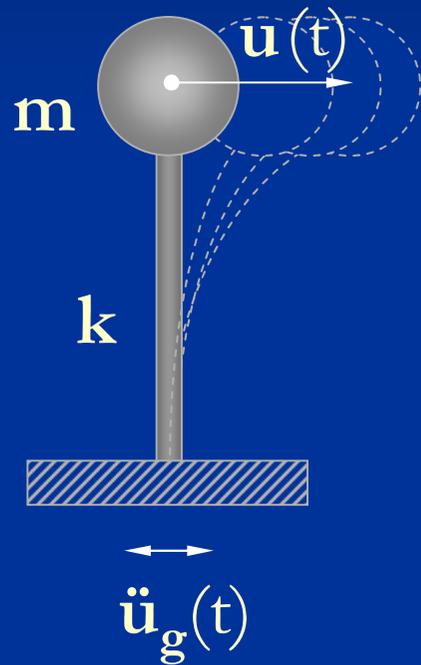
$$\int m\ddot{u}_t du + \int c\dot{u} du + \int f_s du = 0$$

dove:

$$\int m\ddot{u}_t du = \int m\ddot{u}_t (du_t - du_g) = \int m \frac{du_t}{dt} du_t - \int m\ddot{u}_t du_g = \frac{m\dot{u}_t^2}{2} - \int m\ddot{u}_t du_g$$

# Equazione di bilancio energetico

Formulazione assoluta<sup>2</sup>



Nell'equazione così ottenuta:

$$\frac{m\dot{u}_t^2}{2} + \int c\dot{u} du + \int f_s du = -\int m\ddot{u}_t du_g$$

1



$E_k$

energia cinetica assoluta

2



$E_v$

energia viscosa

3



$E_s$

energia di richiamo

4

$E_i$

energia di ingresso  
assoluta

# Equazione di bilancio energetico

## Formulazione assoluta

L'energia di ingresso assoluta  $E_i$   
può essere espressa come somma delle seguenti aliquote:

$$E_i = E_s + E_k + E_v + E_h$$

$E_s$  energia di richiamo elastico

$E_k$  energia cinetica assoluta

$E_v$  energia viscosa

$E_h$  energia isteretica

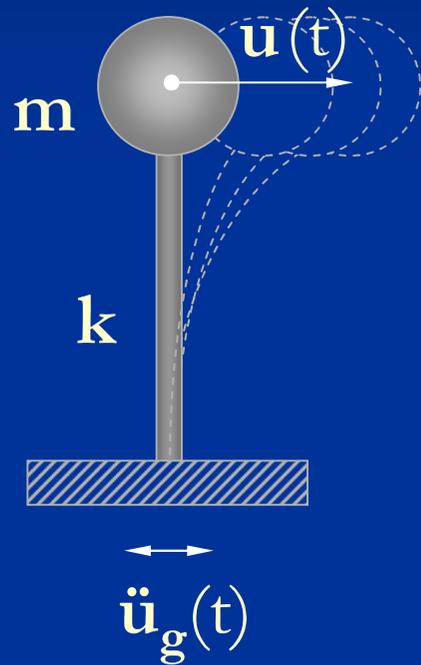


reversibili

irreversibili

# Equazione di bilancio energetico

Formulazione relativa



L'equazione del moto dell'oscillatore si può scrivere:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_s = -m\ddot{u}_g$$

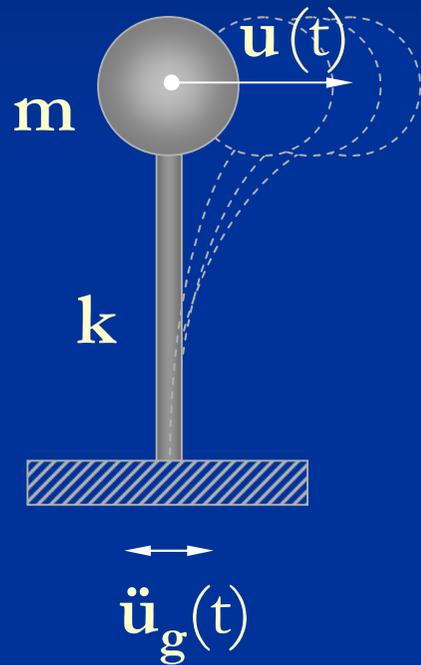
Integrando rispetto allo spostamento si ha:

$$\int m\ddot{u} du + \int c\dot{u} du + \int f_s du = -\int m\ddot{u}_g du$$

$$\text{dove: } \int m\ddot{u} du = \int m \frac{d\dot{u}}{dt} du = \int m\dot{u} d\dot{u} = \frac{m\dot{u}^2}{2}$$

# Equazione di bilancio energetico

Formulazione relativa



Nell'equazione così ottenuta:

$$\frac{m\dot{u}^2}{2} + \int c\dot{u} du + \int f_s du = -\int m\ddot{u}_g du$$

1



$E_k'$   
energia cinetica relativa

2



$E_v$   
energia viscosa

3



$E_s$   
energia di richiamo

4

$E_i'$   
energia di ingresso  
relativa

# Equazione di bilancio energetico

## Formulazione relativa

L'energia di ingresso relativa  $E_i'$   
può essere espressa come somma delle seguenti aliquote:

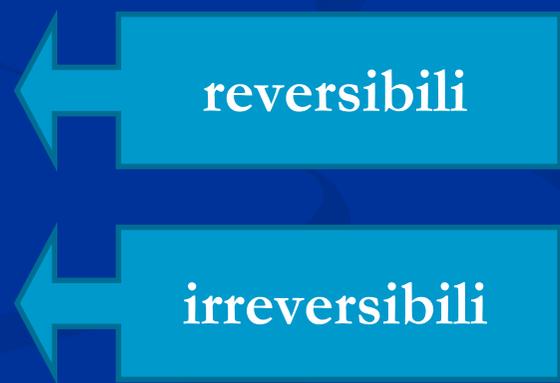
$$E_i' = E_s + E_k' + E_v + E_h$$

$E_s$  energia di richiamo elastico

$E_k$  energia cinetica relativa

$E_v$  energia viscosa

$E_h$  energia isteretica



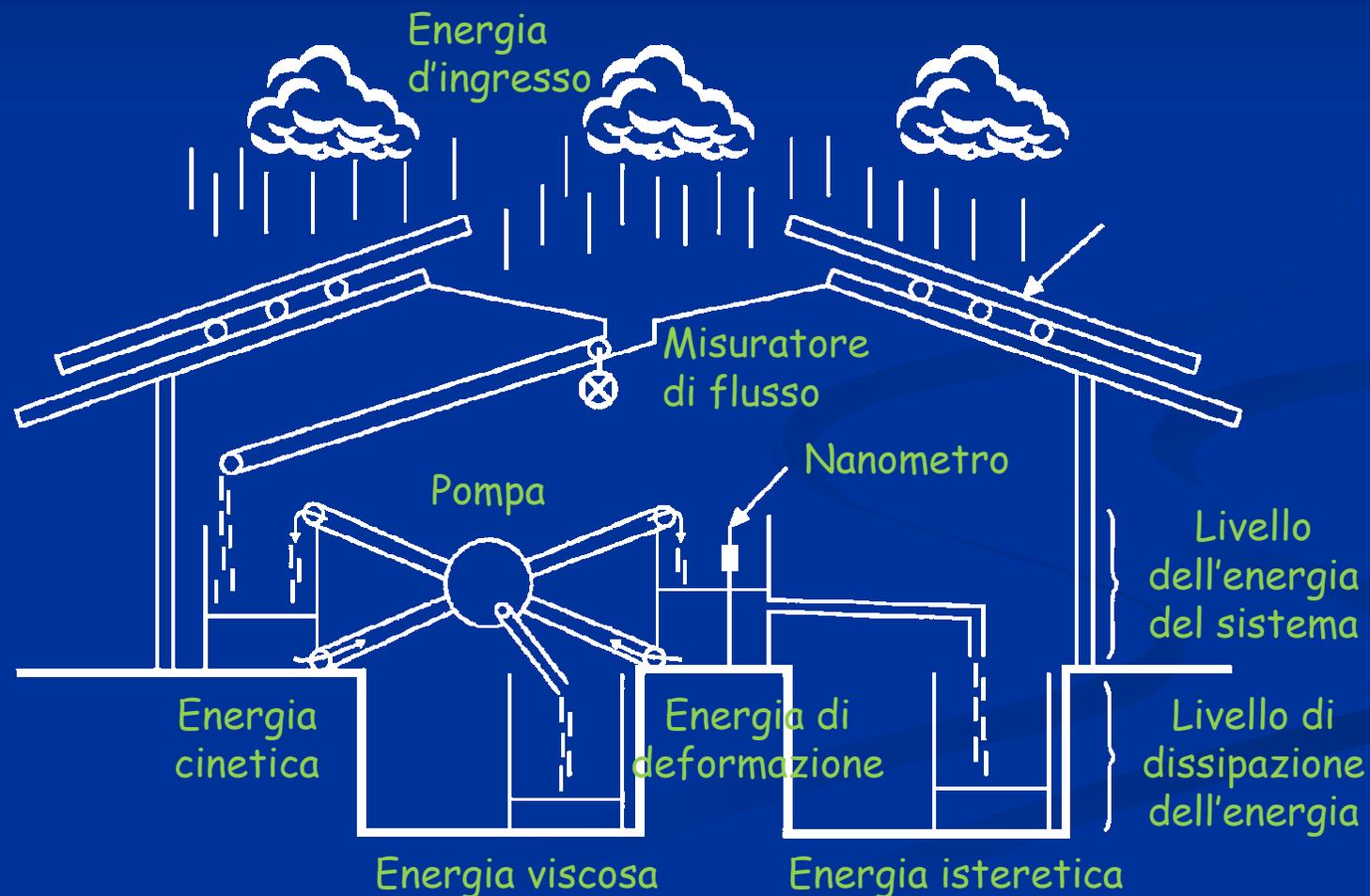
reversibili

irreversibili

# Equazione di bilancio energetico

Rappresentazione pratica

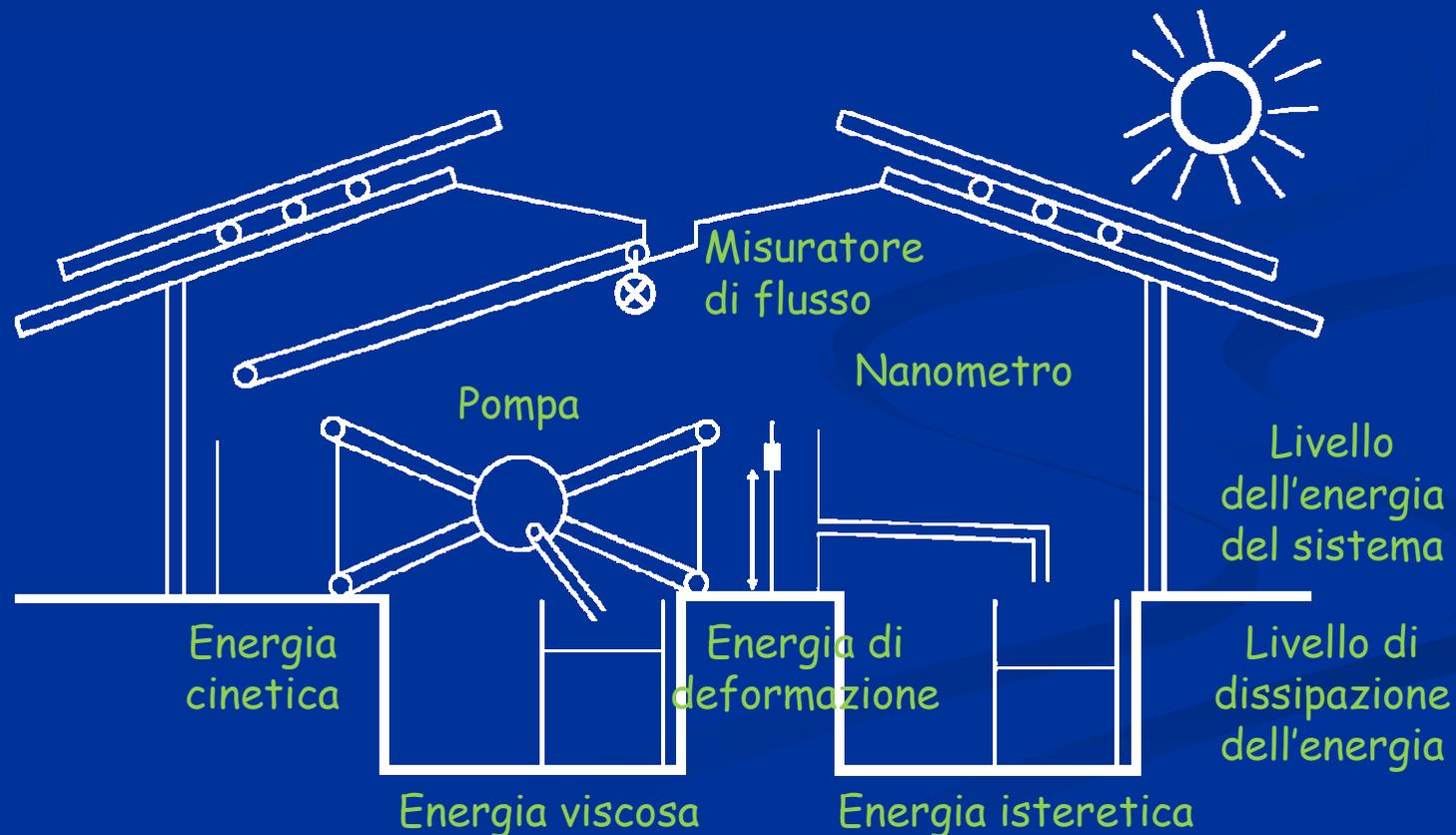
Durante l'evento sismico



# Equazione di bilancio energetico

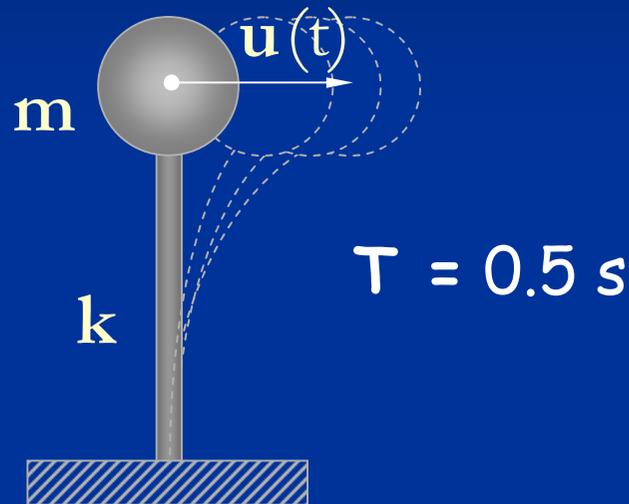
Rappresentazione pratica

Al termine  
dell'evento sismico



# Esempio - Oscillatore 1

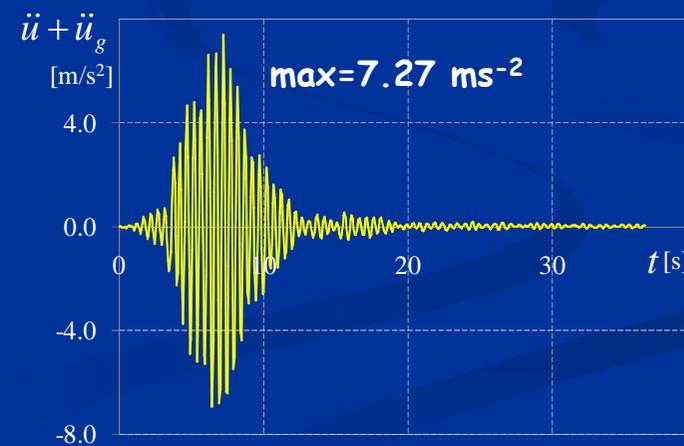
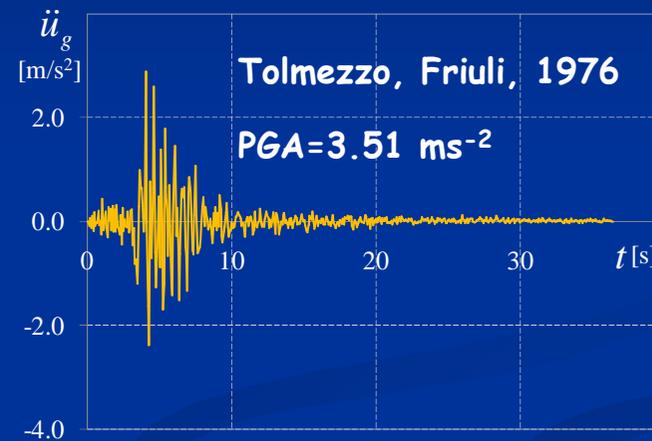
## Accelerazioni



$$m = 8.147 \quad \text{kN s}^2/\text{m}$$

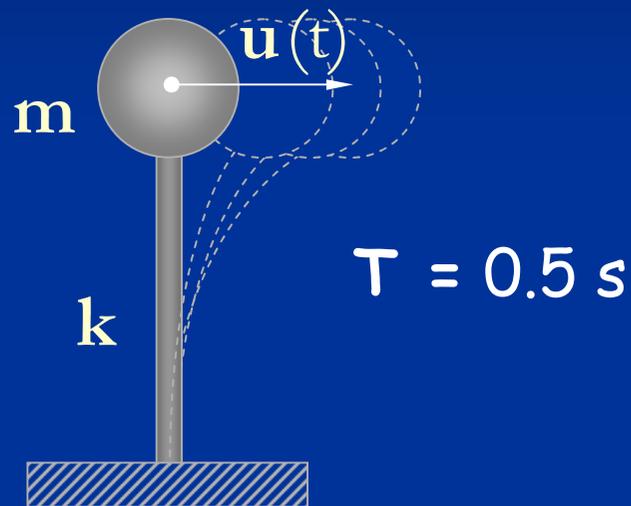
$$k = 1286.478 \quad \text{kN/m}$$

$$\xi = 0.05$$



# Esempio - Oscillatore 1

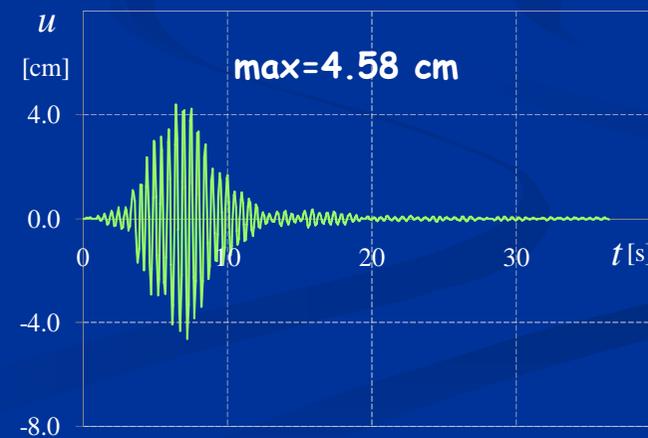
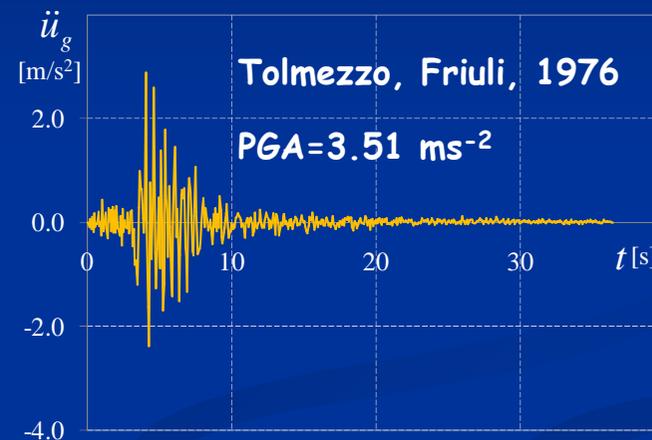
Spostamenti



$$m = 8.147 \quad \text{kN s}^2/\text{m}$$

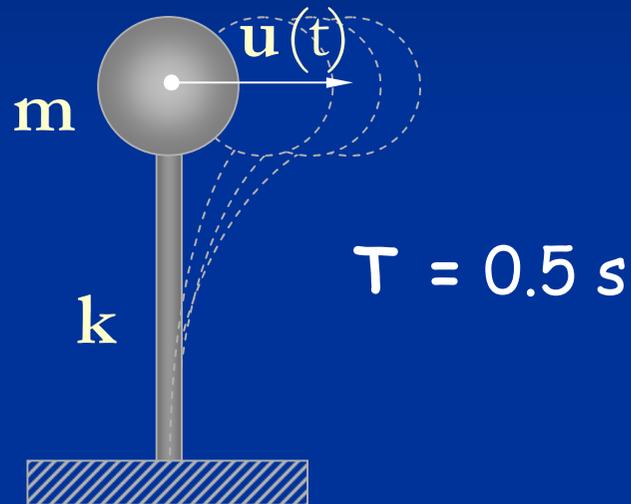
$$k = 1286.478 \quad \text{kN/m}$$

$$\xi = 0.05$$



# Esempio - Oscillatore 1

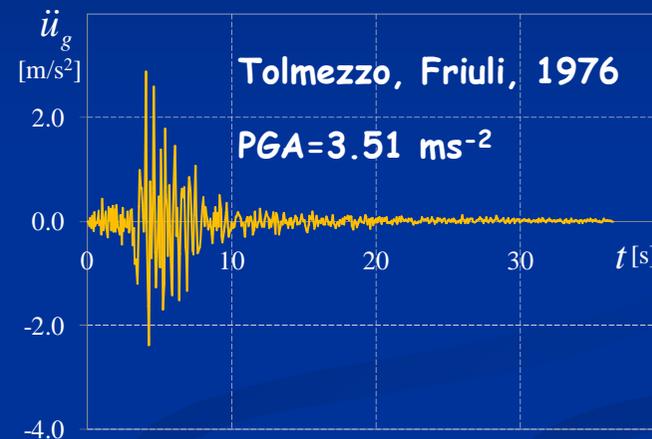
Energie



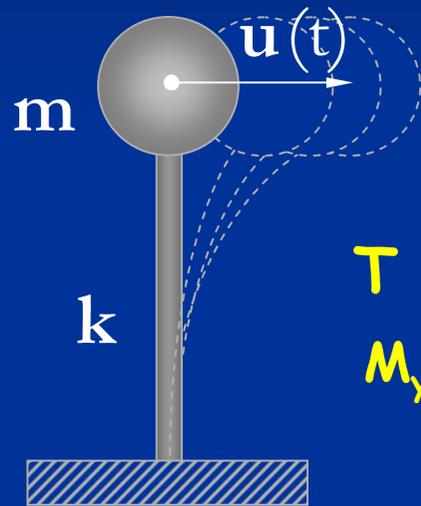
$$m = 8.147 \quad \text{kN s}^2/\text{m}$$

$$k = 1286.478 \quad \text{kN/m}$$

$$\xi = 0.05$$



# Esempio - Oscillatore 2



$$T = 0.5 \text{ s}$$

$$M_y = 0.20 M_{\max,el}$$

progettiamo secondo  
l'approccio convenzionale ...

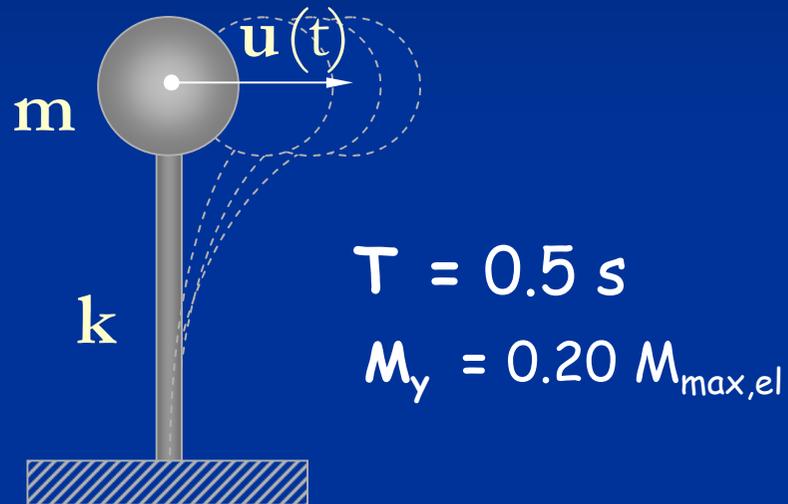
$$m = 8.147 \quad \text{kN s}^2/\text{m}$$

$$k = 1286.478 \quad \text{kN m}$$

$$\xi = 0.05$$

# Esempio - Oscillatore 2

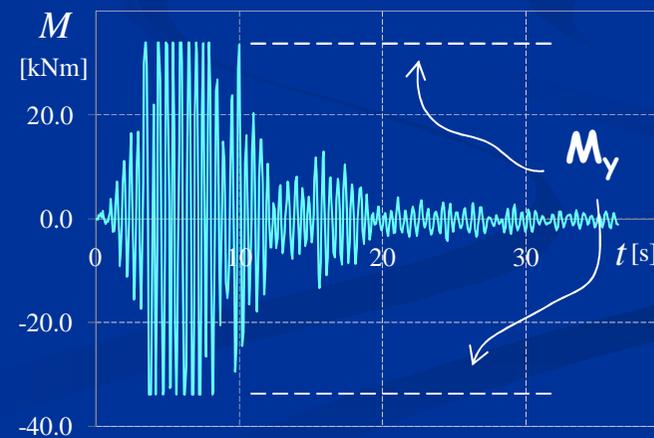
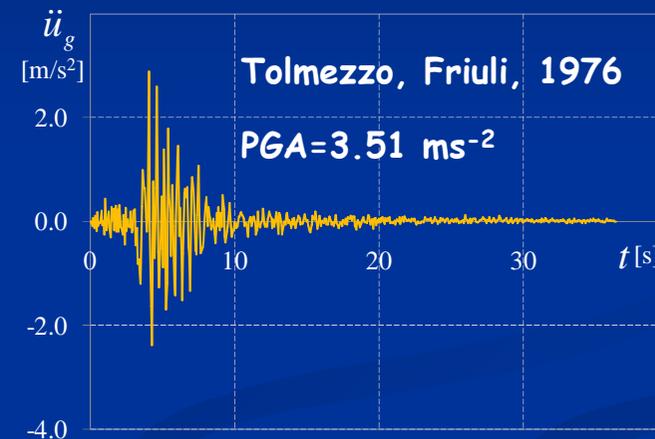
Spostamenti



$$m = 8.147 \quad \text{kN s}^2/\text{m}$$

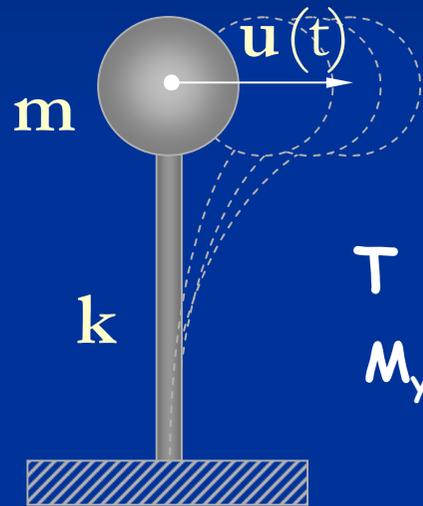
$$k = 1286.478 \quad \text{kN m}$$

$$\xi = 0.05$$



# Esempio - Oscillatore 2

## Accelerazioni



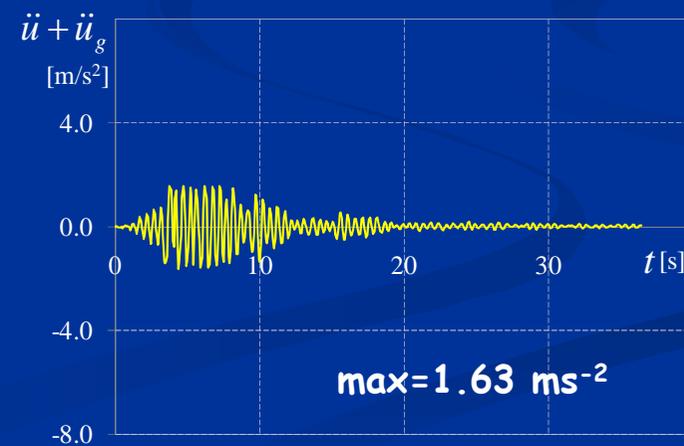
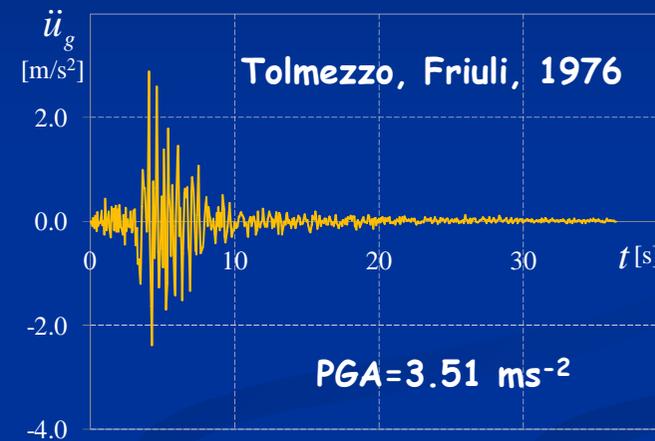
$$T = 0.5 \text{ s}$$

$$M_y = 0.20 M_{\max,el}$$

$$m = 8.147 \quad \text{kN s}^2/\text{m}$$

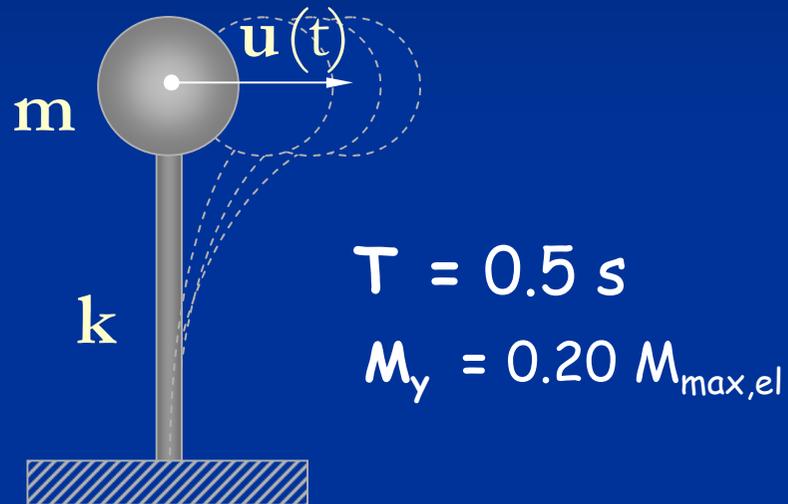
$$k = 1286.478 \quad \text{kN m}$$

$$\xi = 0.05$$



# Esempio - Oscillatore 2

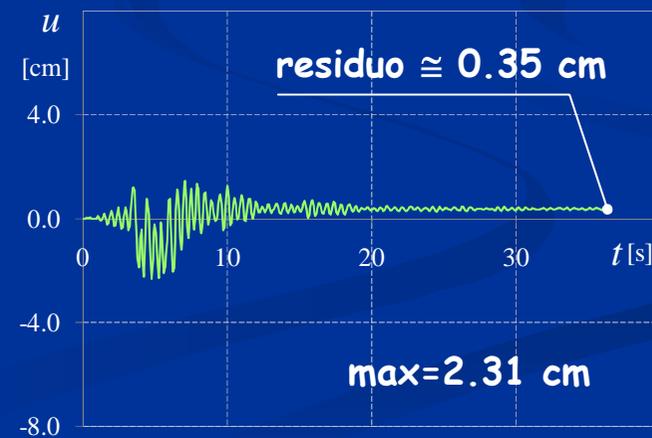
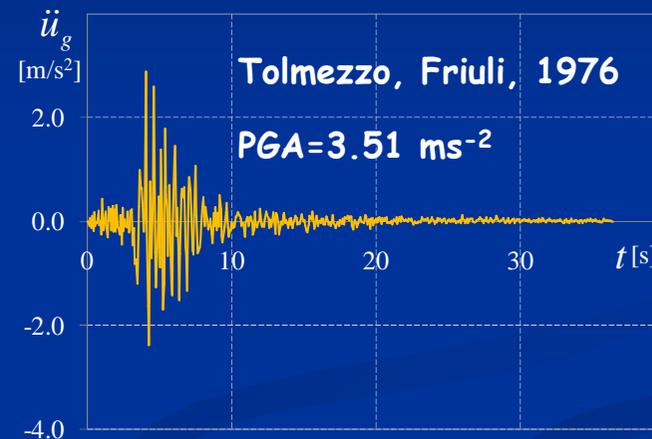
## Spostamenti



$$m = 8.147 \quad \text{kN s}^2/\text{m}$$

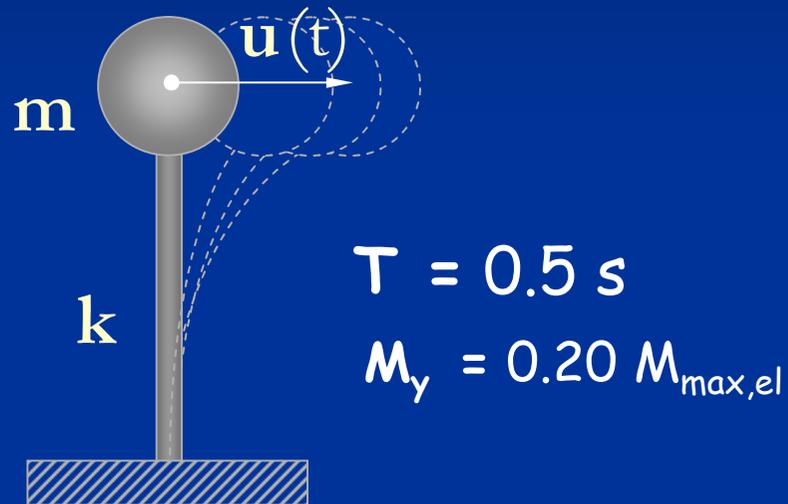
$$k = 1286.478 \quad \text{kN m}$$

$$\xi = 0.15$$



# Esempio - Oscillatore 2

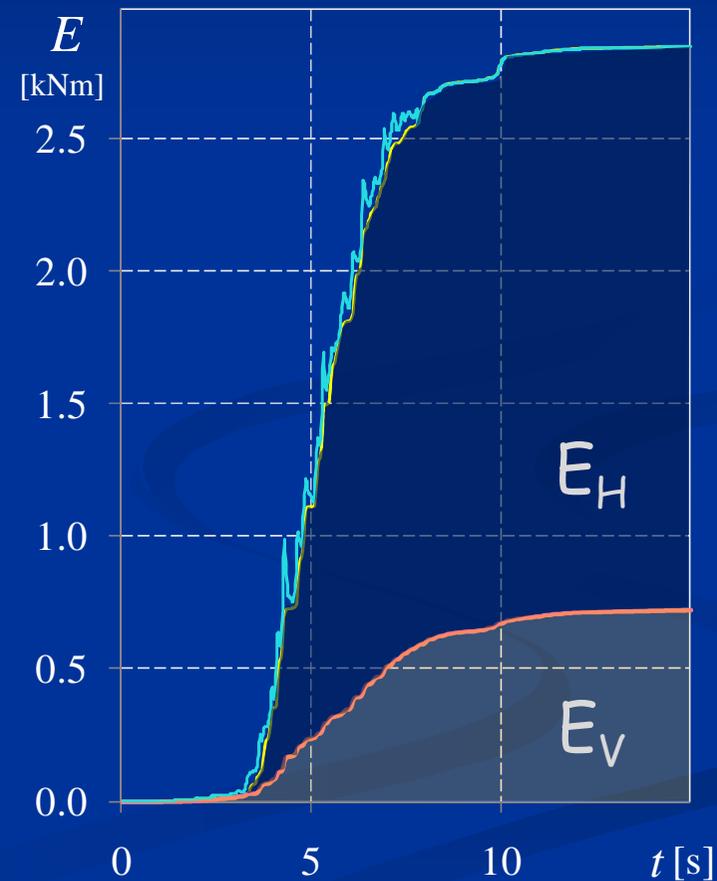
## Energie



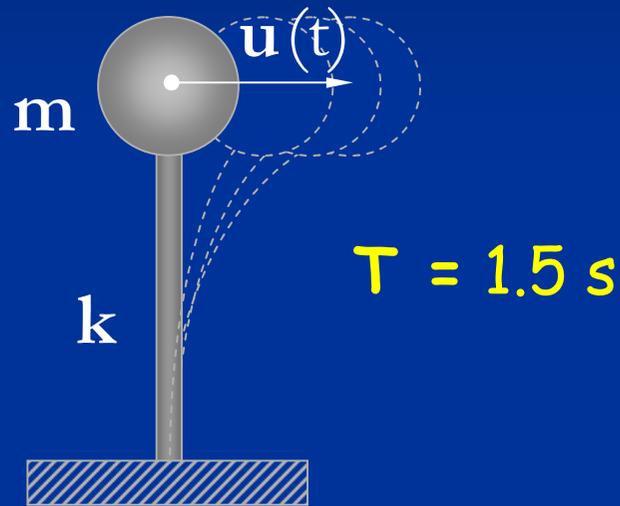
$$m = 8.147 \quad \text{kN s}^2/\text{m}$$

$$k = 1286.478 \quad \text{kN m}$$

$$\xi = 0.05$$



# Esempio - Oscillatore 3



oppure supponiamo il  
comportamento elastico  
ma aumentiamo il periodo  
dell'oscillatore ...

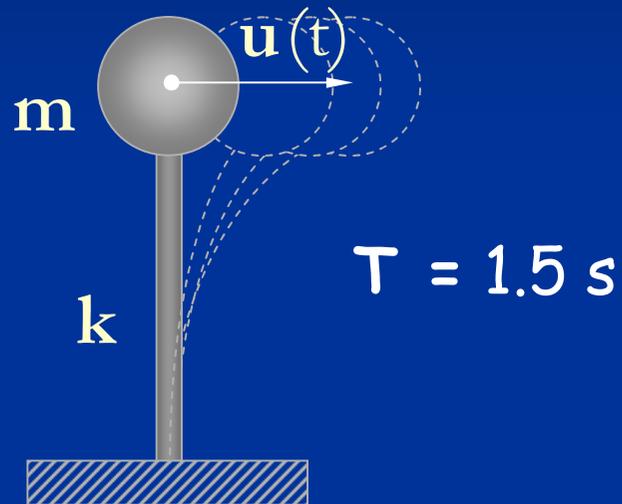
$$m = 73.320 \quad \text{kN s}^2/\text{m}$$

$$k = 1286.478 \quad \text{kN/m}$$

$$\xi = 0.05$$

# Esempio - Oscillatore 3

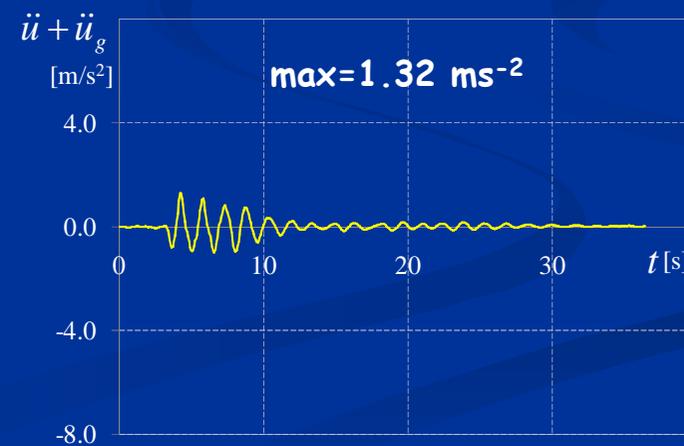
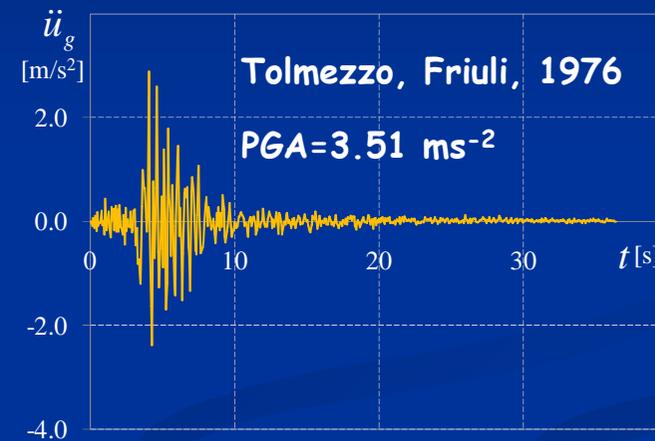
## Accelerazioni



$$m = 73.320 \quad \text{kN s}^2/\text{m}$$

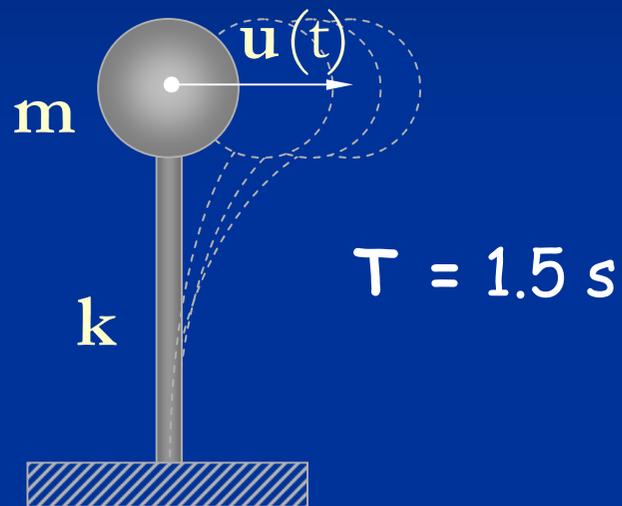
$$k = 1286.478 \quad \text{kN m}$$

$$\xi = 0.05$$



# Esempio - Oscillatore 3

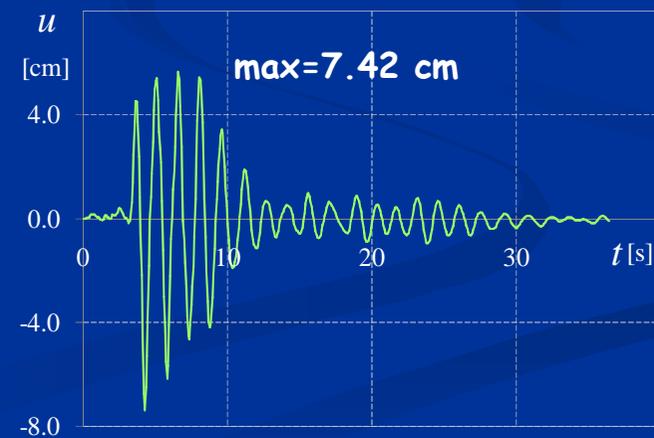
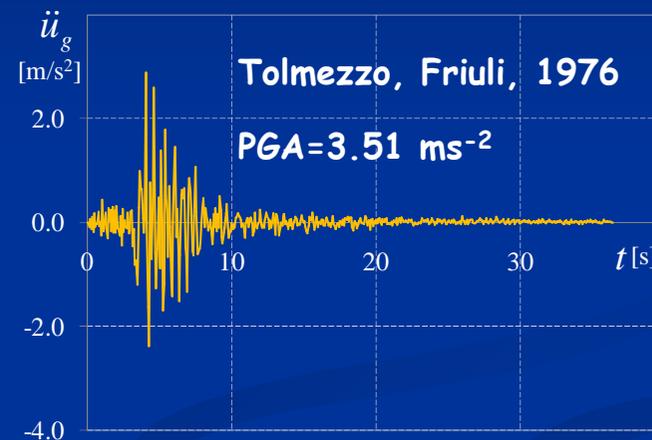
## Spostamenti



$$m = 73.320 \quad \text{kN s}^2/\text{m}$$

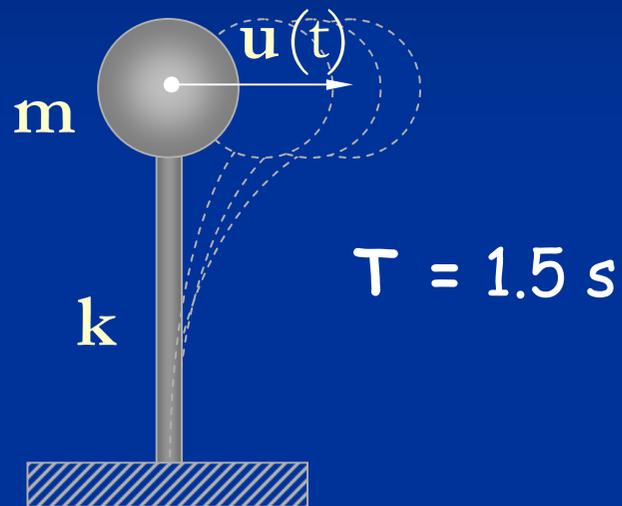
$$k = 1286.478 \quad \text{kN/m}$$

$$\xi = 0.05$$



# Esempio - Oscillatore 3

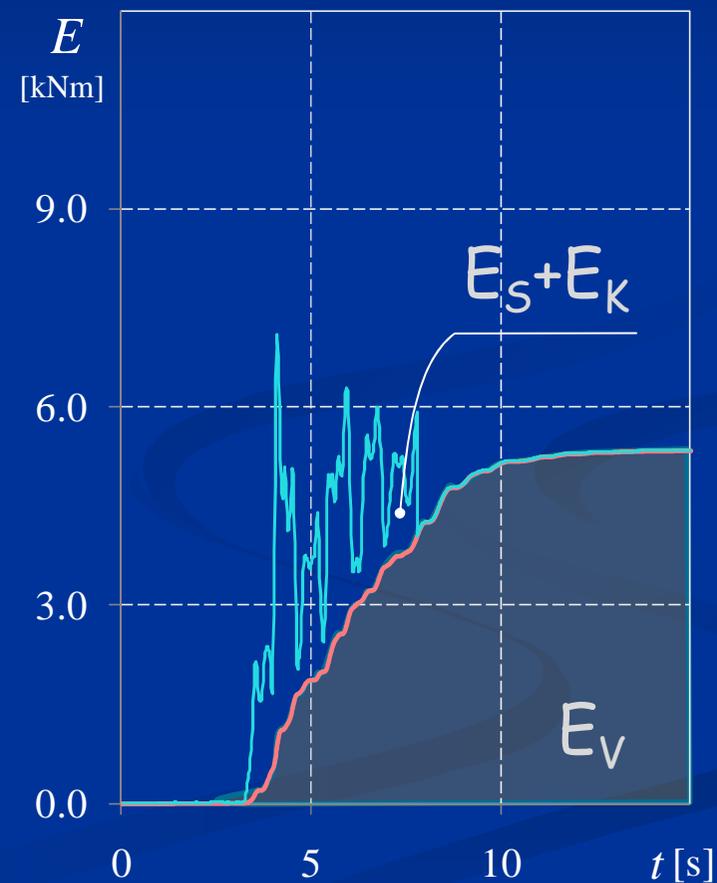
## Energie



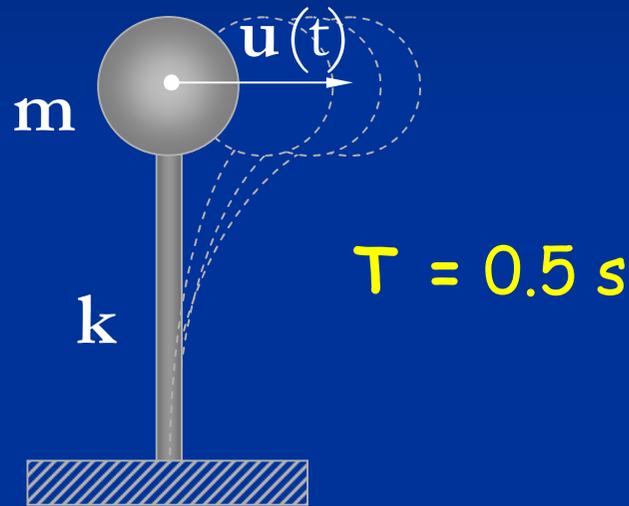
$$m = 73.320 \quad \text{kN s}^2/\text{m}$$

$$k = 1286.478 \quad \text{kN m}$$

$$\xi = 0.05$$



# Esempio - Oscillatore 4



oppure supponiamo il  
comportamento elastico  
ma aumentiamo lo  
smorzamento ...

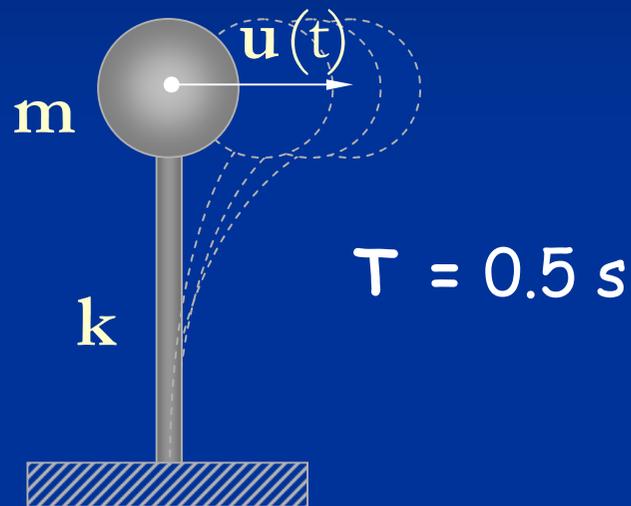
$$m = 8.147 \quad \text{kN s}^2/\text{m}$$

$$k = 1286.478 \quad \text{kN m}$$

$$\xi = 0.15$$

# Esempio - Oscillatore 4

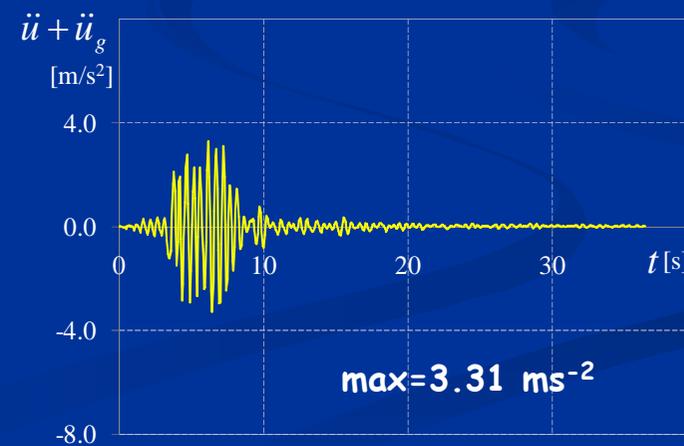
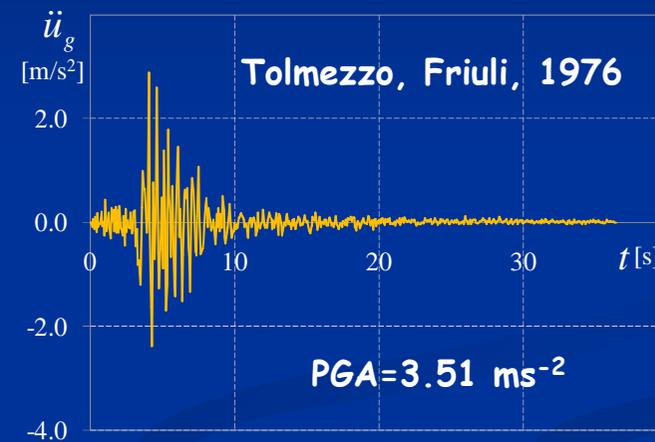
## Accelerazioni



$$m = 8.147 \quad \text{kN s}^2/\text{m}$$

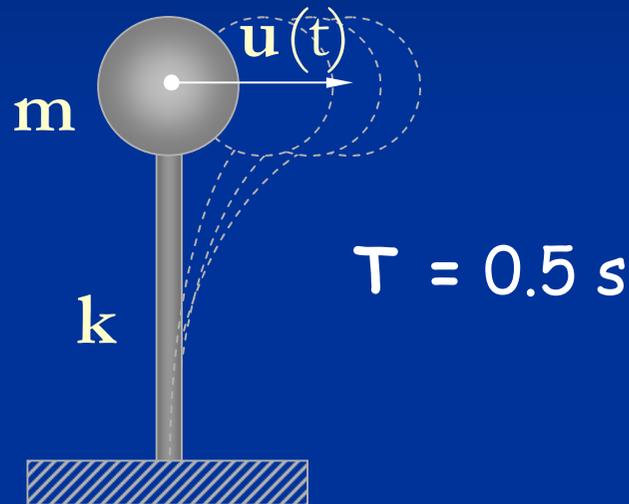
$$k = 1286.478 \quad \text{kN/m}$$

$$\xi = 0.15$$



# Esempio - Oscillatore 4

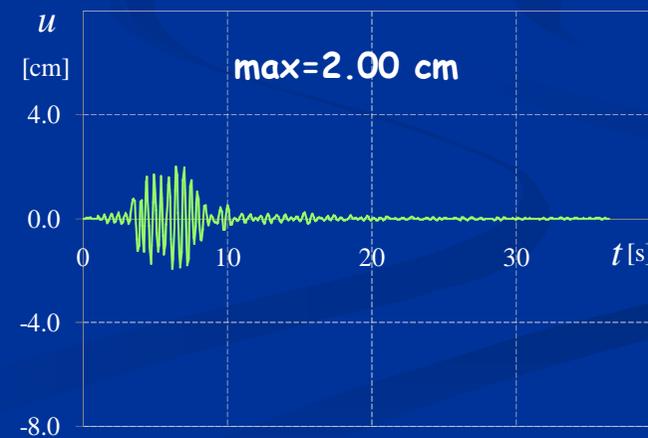
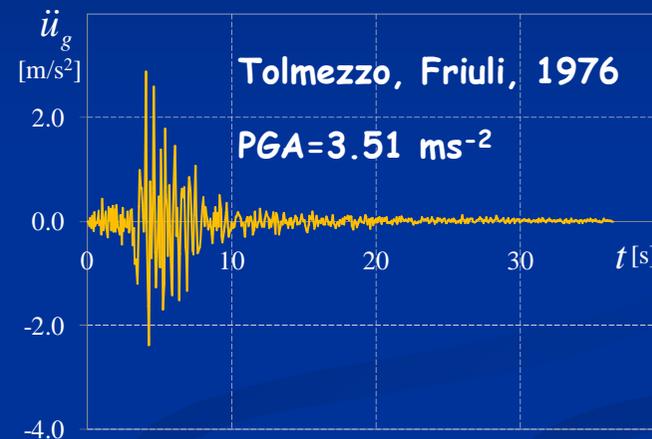
Spostamenti



$$m = 8.147 \quad \text{kN s}^2/\text{m}$$

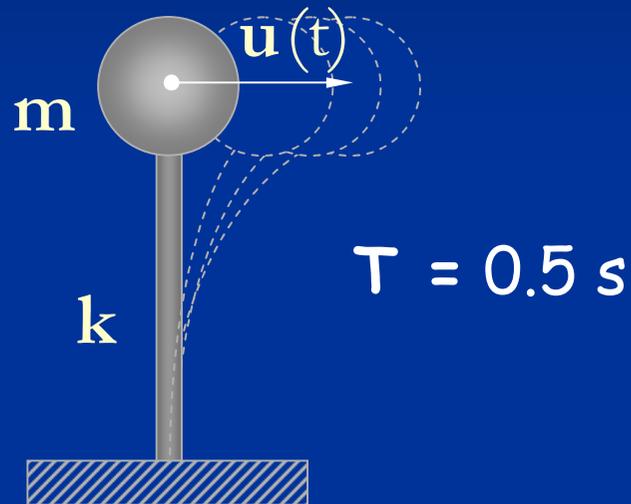
$$k = 1286.478 \quad \text{kN/m}$$

$$\xi = 0.15$$



# Esempio - Oscillatore 4

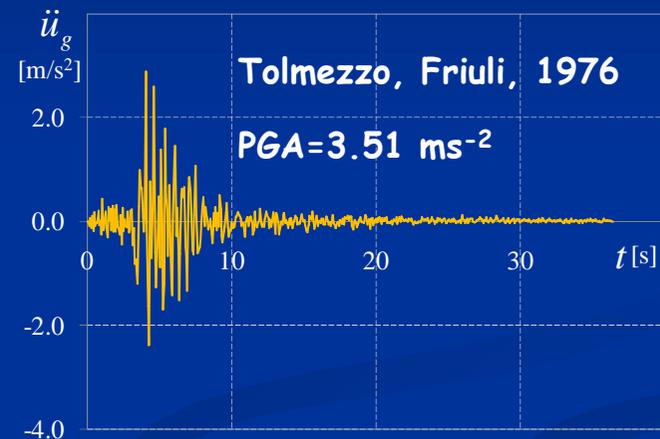
Energie



$$m = 8.147 \quad \text{kN s}^2/\text{m}$$

$$k = 1286.478 \quad \text{kN/m}$$

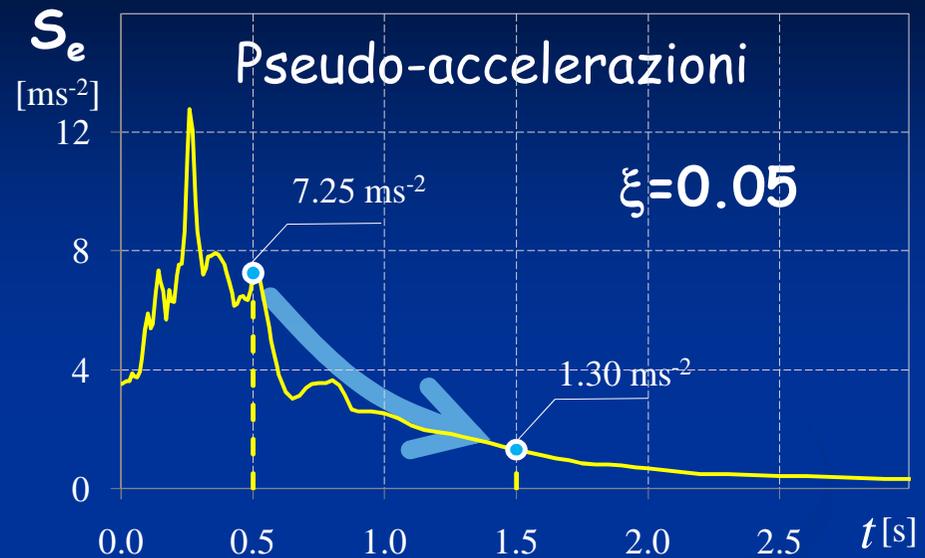
$$\xi = 0.15$$



# Esempio

Spettri elastici

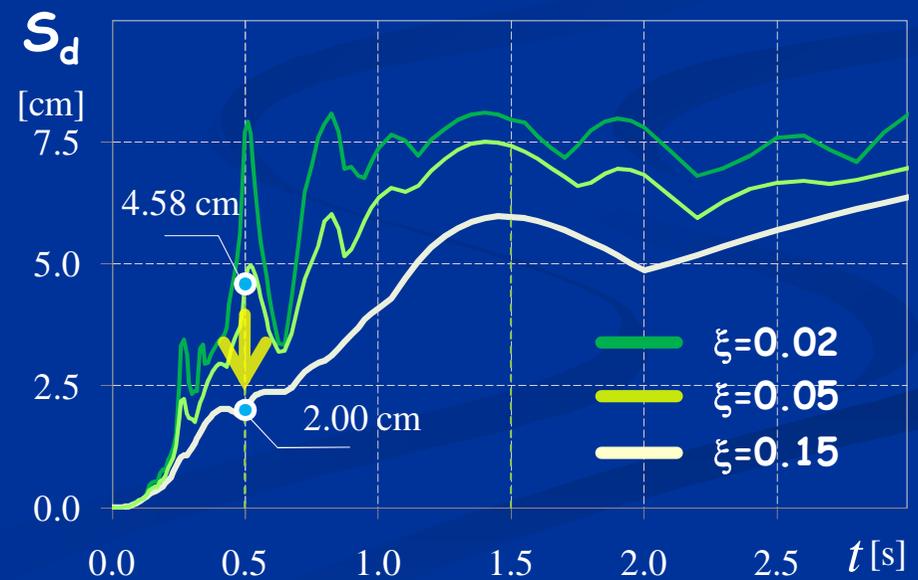
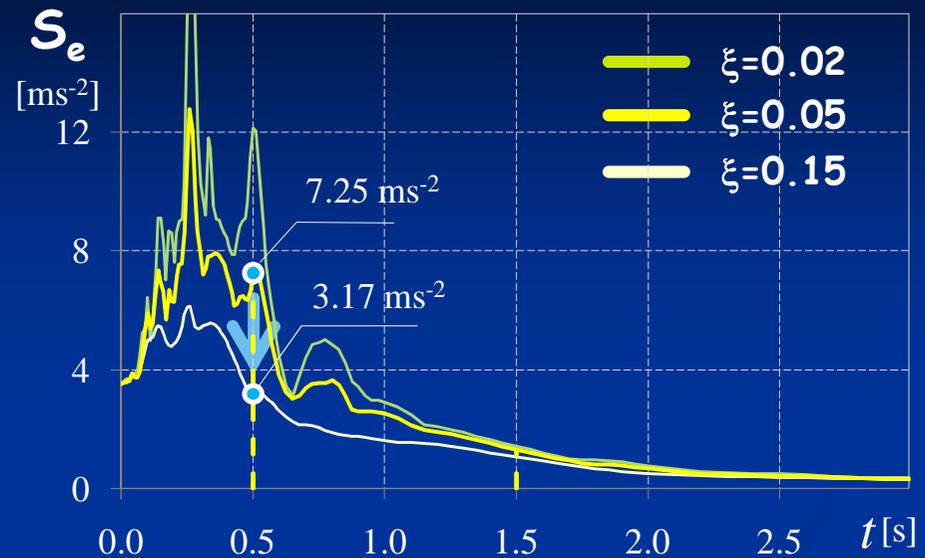
aumento  
del periodo  
di vibrazione



# Esempio

Spettri elastici

aumento  
dello  
smorzamento



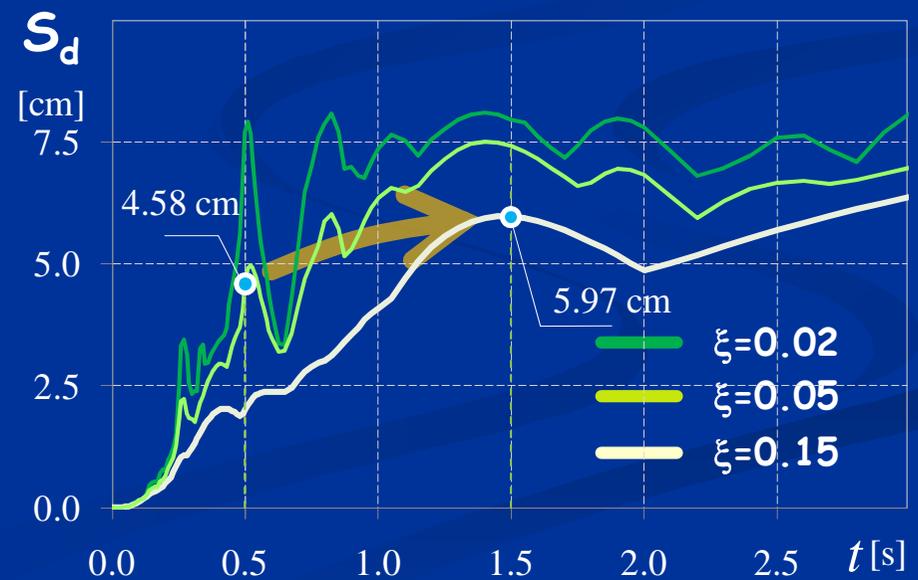
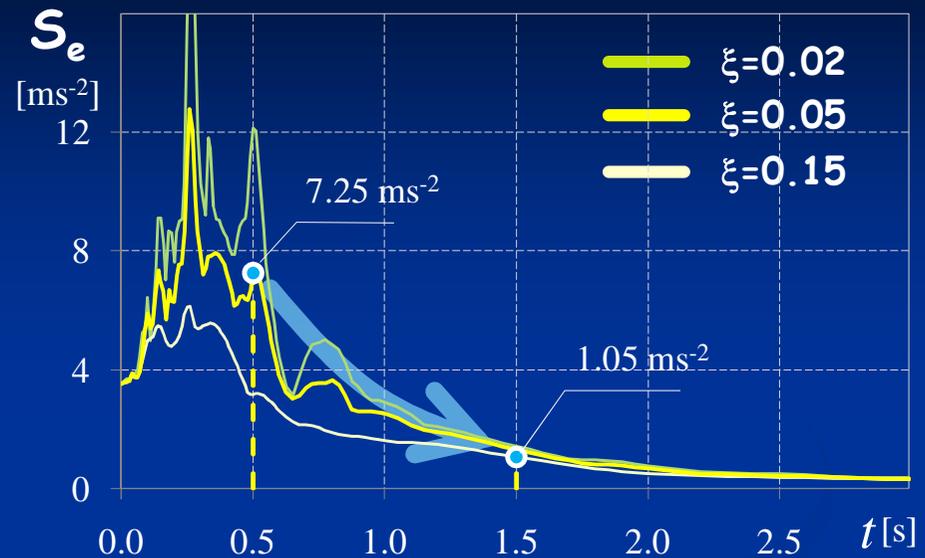
# Esempio

Spettri elastici

aumento  
del periodo  
di vibrazione

+

aumento  
dello  
smorzamento



# Sistemi isolati alla base

## Prime considerazioni

### All'atto del sisma

- un progetto secondo la strategia dell'isolamento alla base (ovvero dell'allungamento del periodo fondamentale di vibrazione) determina un abbattimento delle forze nella struttura in elevazione
- Al fine di ridurre o evitare danni nella struttura in elevazione gli spostamenti relativi vanno concentrati nello spessore di una interfaccia, detta interfaccia d'isolamento, posta nella parte bassa dell'edificio.

# Sistemi isolati alla base

Aspetto principale del comportamento sismico

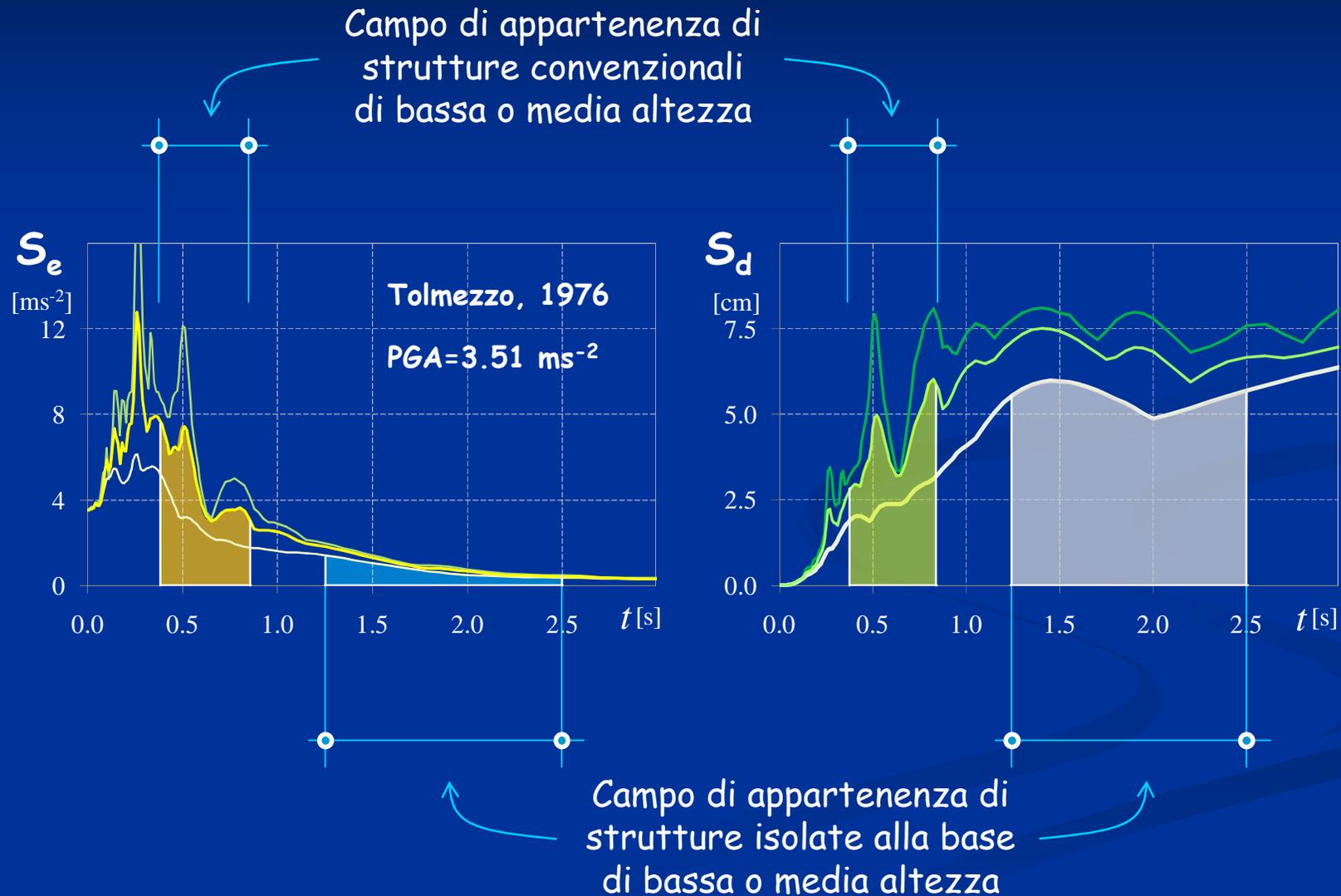


Senza isolamento alla base



Con isolamento alla base

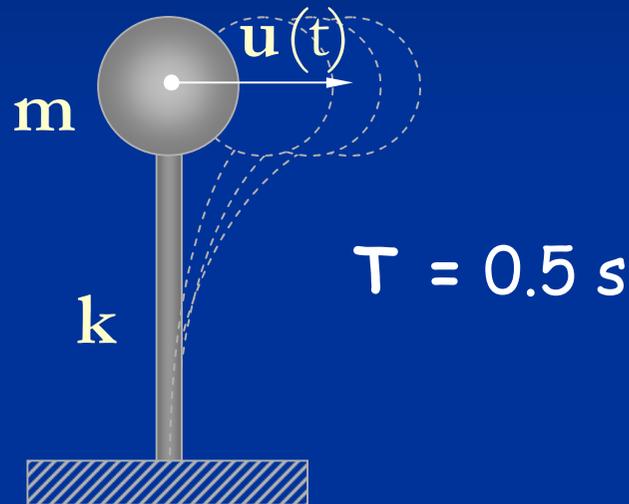
# Sistemi isolati e non isolati



Ma è sempre conveniente isolare alla base  
oppure  
esistono situazioni in cui l'isolamento alla base  
è sconsigliato ??

# Esempio - Oscillatore 5

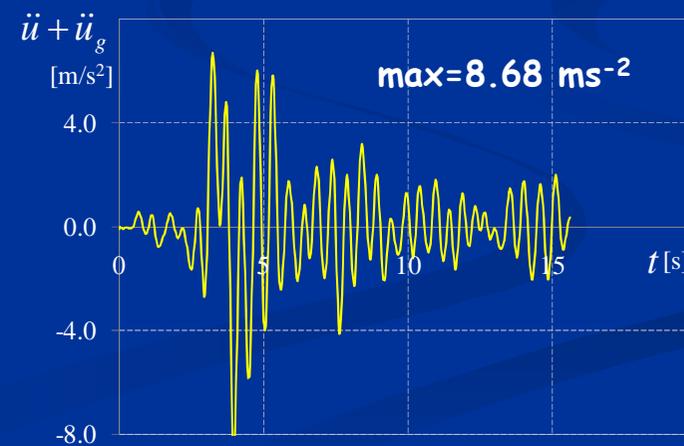
## Accelerazioni



$$m = 8.147 \quad \text{kN s}^2/\text{m}$$

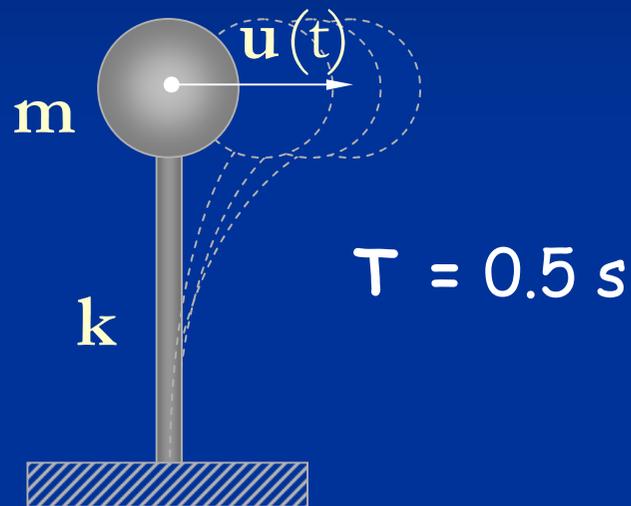
$$k = 1286.478 \quad \text{kN/m}$$

$$\xi = 0.05$$



# Esempio - Oscillatore 5

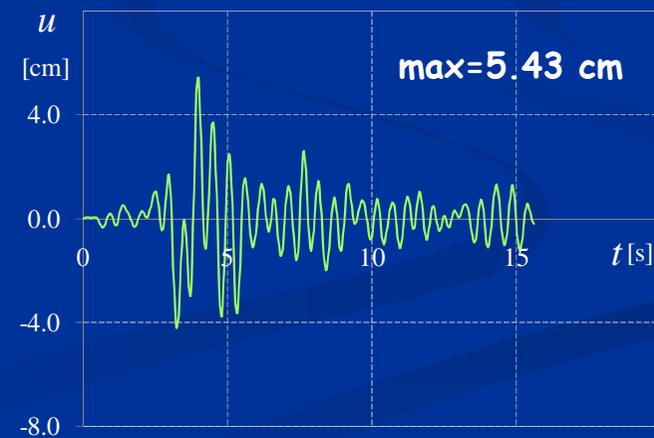
Spostamenti



$$m = 8.147 \quad \text{kN s}^2/\text{m}$$

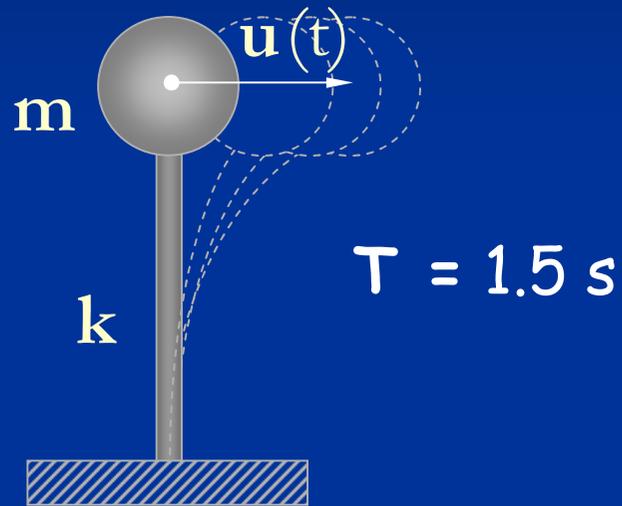
$$k = 1286.478 \quad \text{kN/m}$$

$$\xi = 0.05$$



# Esempio - Oscillatore 5

## Accelerazioni



$$m = 73.320 \quad \text{kN s}^2/\text{m}$$

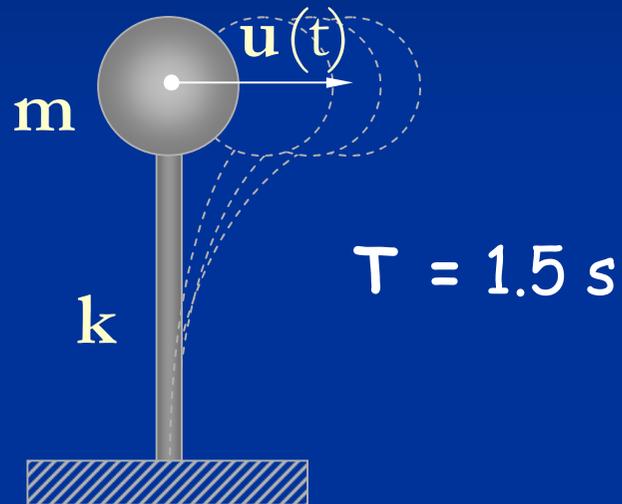
$$k = 1286.478 \quad \text{kN/m}$$

$$\xi = 0.15$$



# Esempio - Oscillatore 5

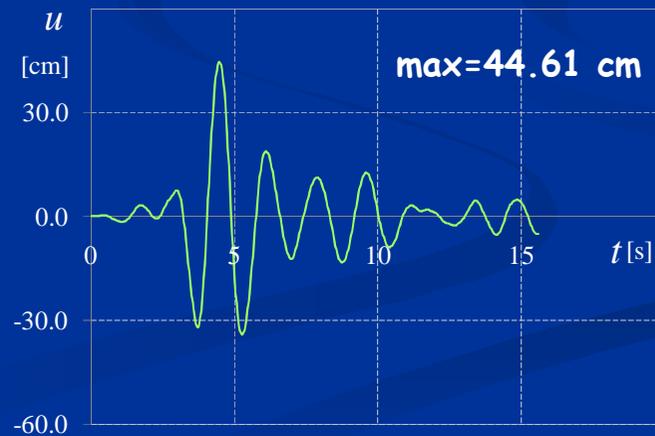
Spostamenti



$$m = 73.320 \quad \text{kN s}^2/\text{m}$$

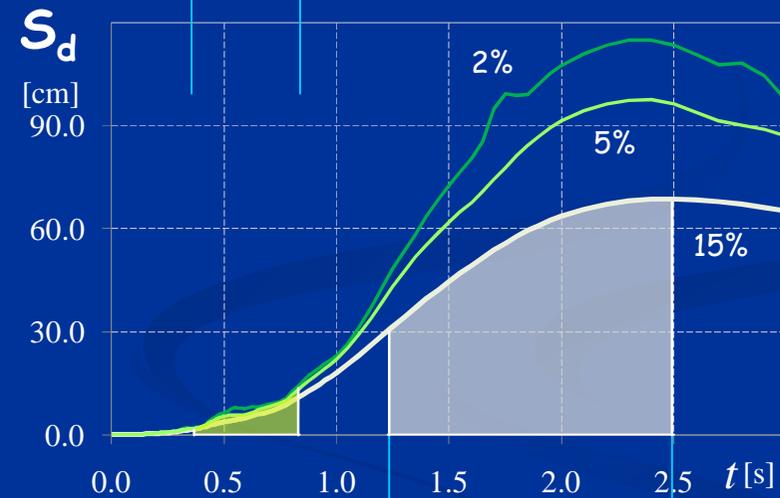
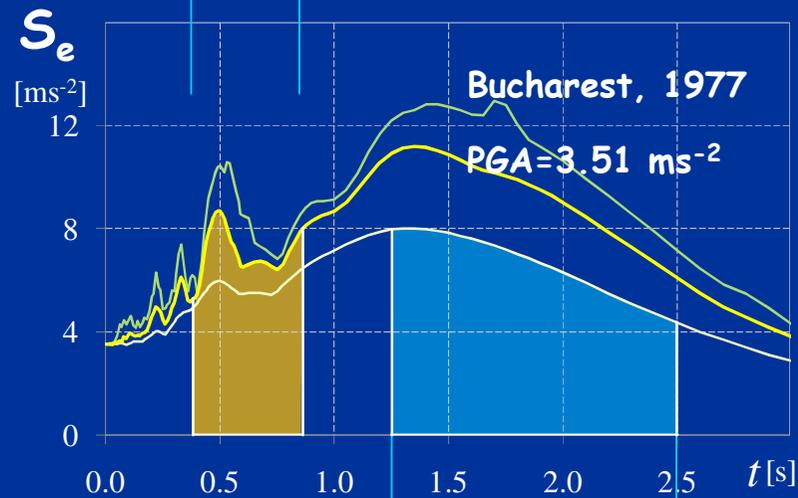
$$k = 1286.478 \quad \text{kN/m}$$

$$\xi = 0.15$$



# Sistemi isolati e non isolati

Campo di appartenenza di  
strutture convenzionali  
di bassa o media altezza



Campo di appartenenza di  
strutture isolate alla base  
di bassa o media altezza

# Applicabilità dei sistemi isolati alla base

## **Maggiormente efficace**

- Strutture su suolo rigido
- Strutture con basso periodo fondamentale di vibrazione (edifici di bassa altezza)

## **Meno efficace**

- Strutture su suolo soffice (o in prossimità di faglie attive)
- Strutture con alto periodo fondamentale di vibrazione (edifici di elevata altezza)

# Applicabilità dei sistemi isolati alla base

**Come vengono ridotti/eliminati i danni nelle strutture sismicamente isolate?**

- Comportamento essenzialmente elastico delle sovrastrutture
- Riduzione delle accelerazioni sismiche nelle sovrastrutture
- Riduzione delle forze sismiche nelle sovrastrutture
- Riduzione degli spostamenti di interpiano nelle sovrastrutture

## **Benefici a breve termine**

- Possibile riduzione sezioni resistenti
- Risparmio in strutture con geometria irregolare

## **Benefici a lungo termine**

- Sicurezza globale maggiore
- Riduzione costi riparazione
- Operatività continua

*Ma come  
isolare alla base ??*

# Isolamento alla base

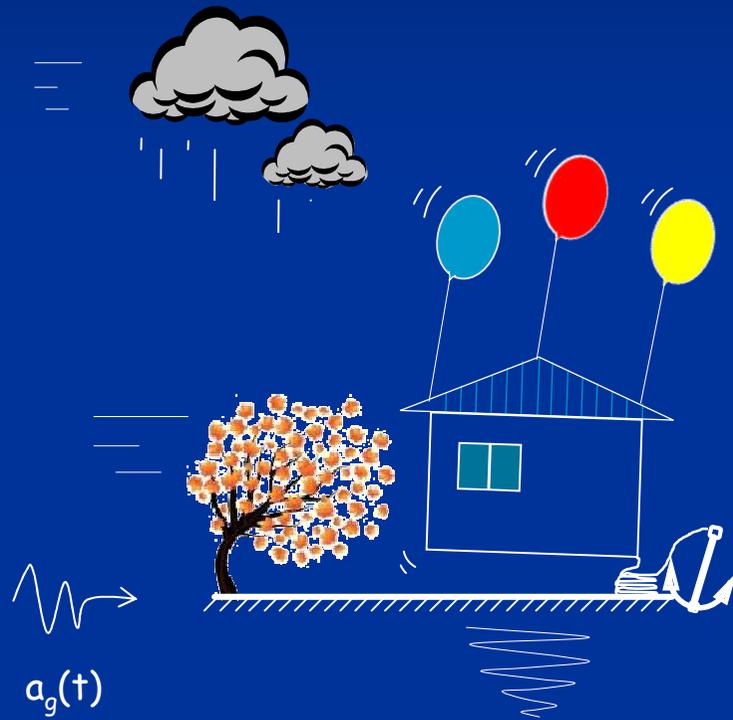
Modalita' di realizzazione



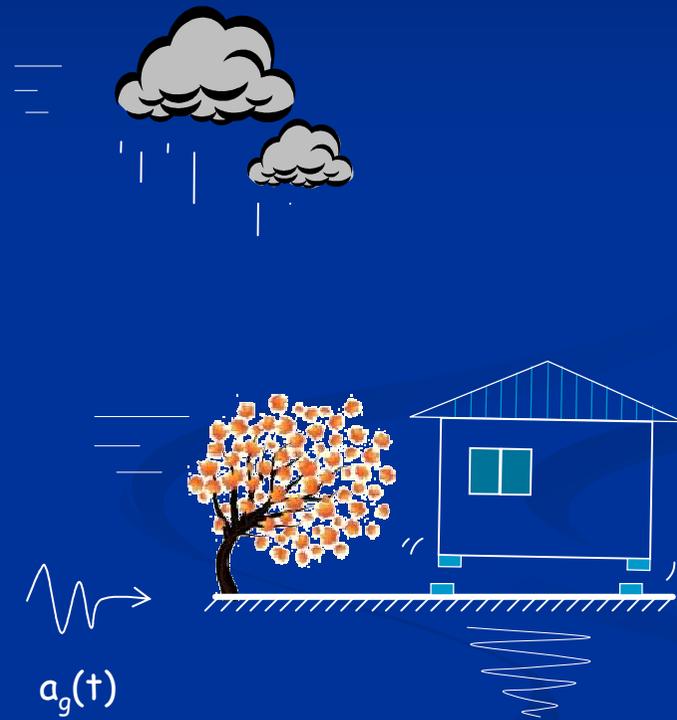
Corda ??

# Isolamento alla base

Modalita' di realizzazione



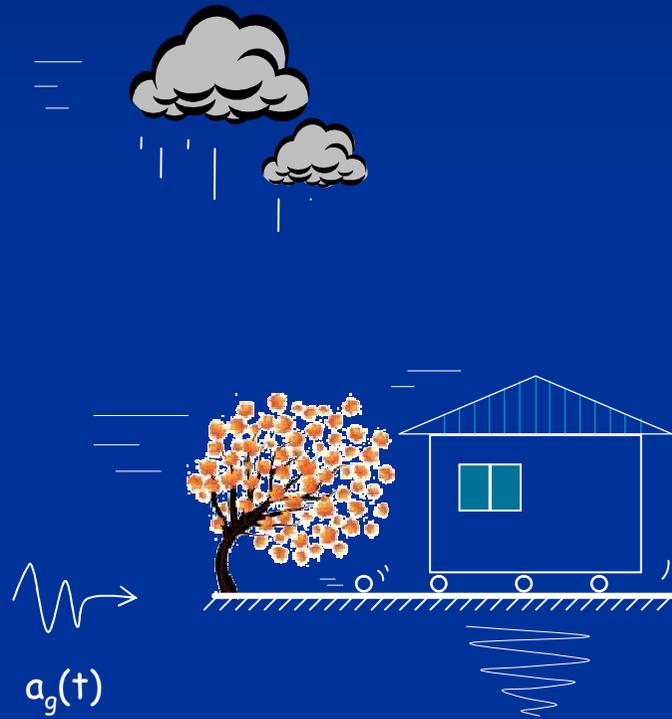
Palloncini ??



Forze magnetiche ??

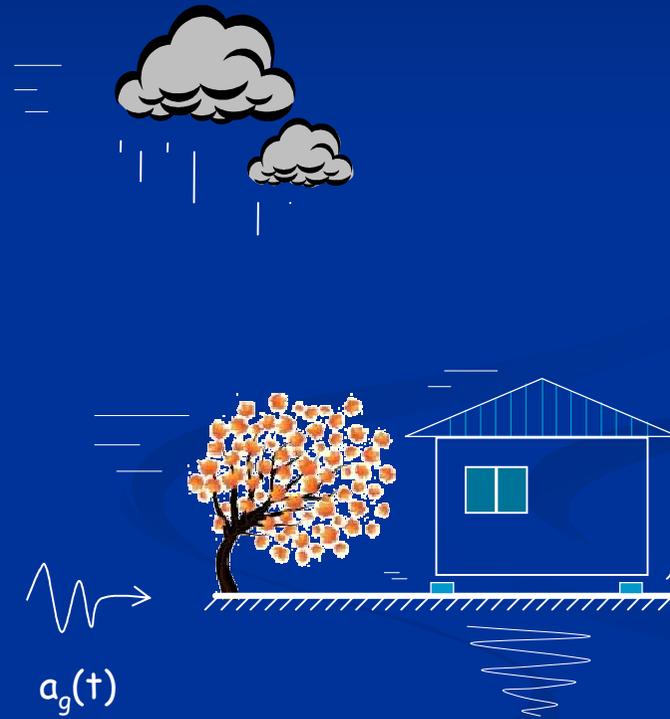
# Isolamento alla base

Modalita' di realizzazione



Dispositivi di rotolamento ??

richiederebbe un blocco !

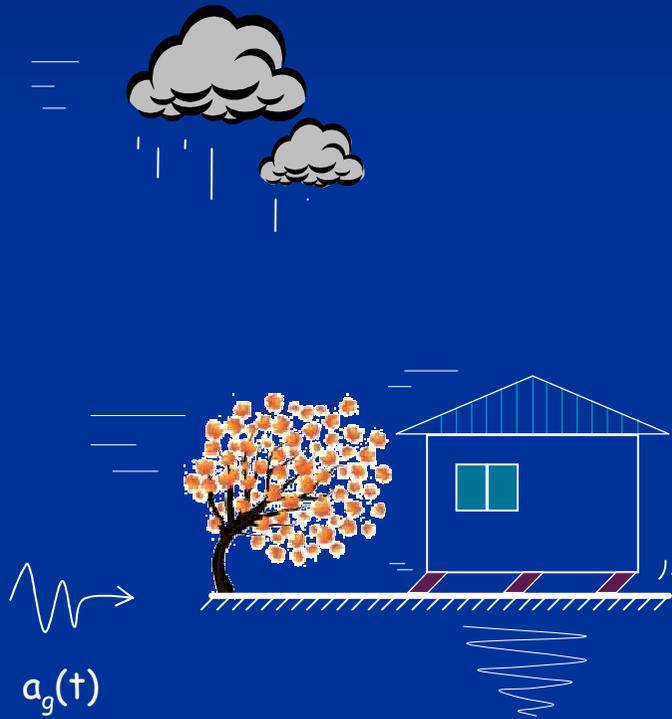


Dispositivi di scivolamento ??

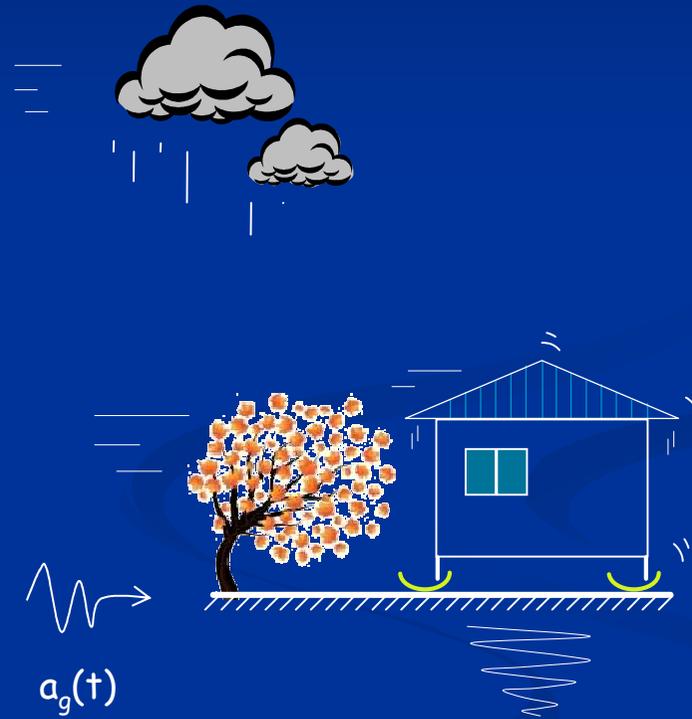
richiederebbe attrito !

# Isolamento alla base

Modalita' di realizzazione



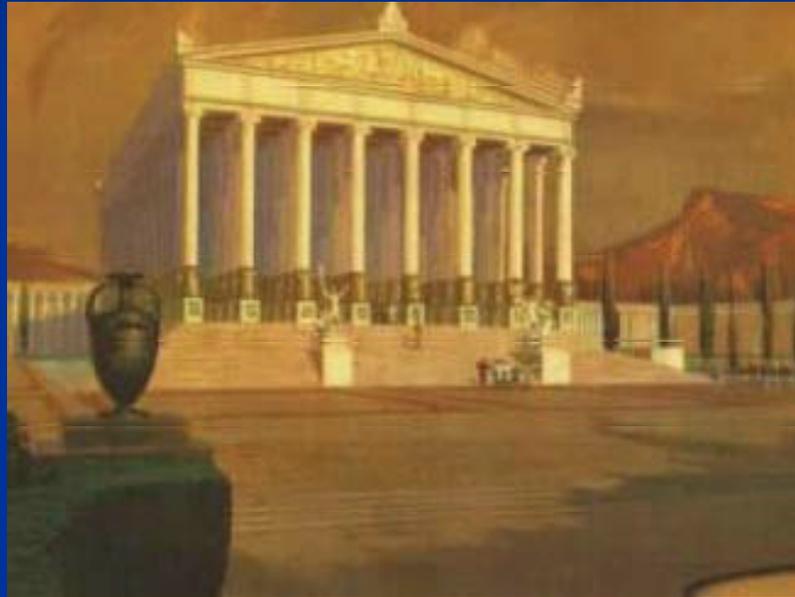
Dispositivi elastici ??



Dispositivi di scivolamento  
su superficie curva ??

# Isolamento alla base

## Prime applicazioni



## Tempio di Diana a Efeso

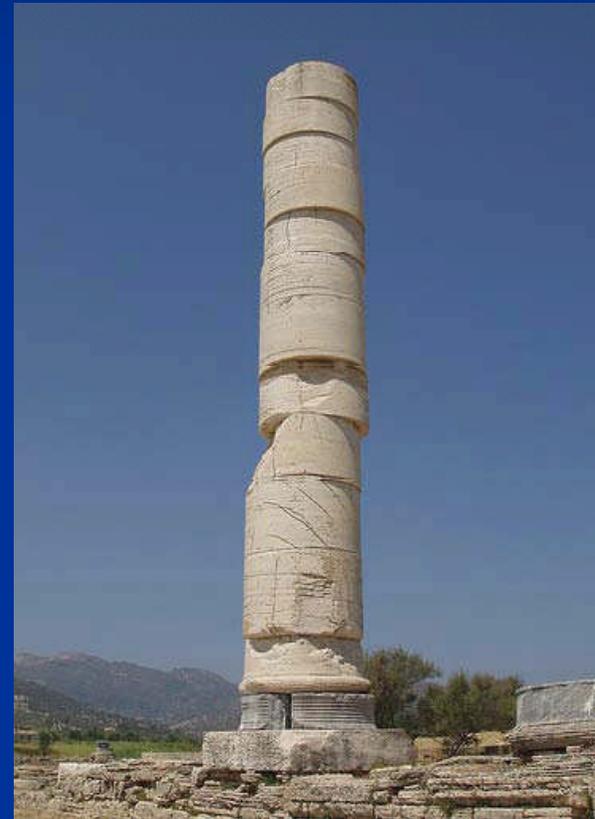
*"Graecae magnificentiae vera admiratio extat templum Ephesiae Dianae CXX annis factum a tota Asia. In solo id palustri fecere, ne terrae motus sentiret aut hiatus timeret, rursus ne in lubrico atque instabili fundamenta tantae molis locarentur, calcatis ea substravere carbonibus, dein velleribus lanae"*

Gaio Plinio Secondo, *Naturalis Historia*, Libro XXXVI, §95

# Isolamento alla base

## Prime applicazioni

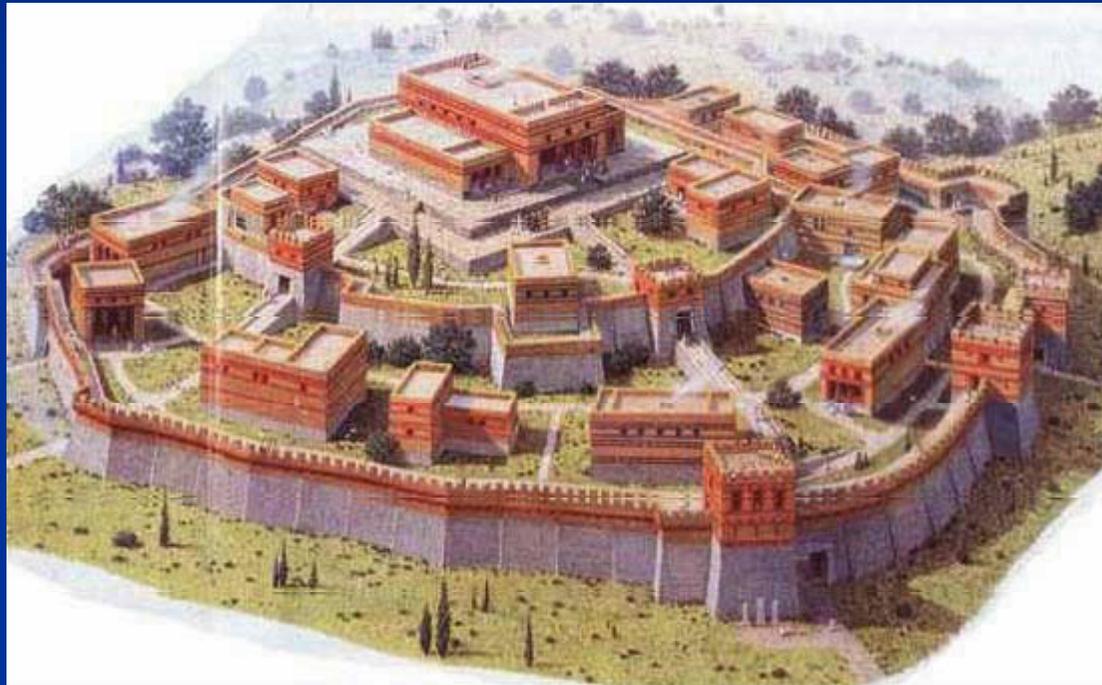
Secondo Diogene Laerzio (III secolo d.C.), l'idea di poggiare le fondazioni del tempio di Artemide su strati alterni di carbone e velli di lana fu suggerita da Theodoros di Samo, un grande architetto dell'epoca, che applicò la stessa tecnica per l'edificazione del tempio di Heraion a Samo (VI secolo a.C.), crollato dopo 10 anni dalla costruzione probabilmente per un terremoto.



Tempio di Heraion - Samo

# Isolamento alla base

Prime applicazioni



Mura di Troia (1500 a.c.)

fondate su uno strato di terra compatta lasciato volutamente  
tra la roccia e il piano di posa

# Isolamento alla base

Prime applicazioni



Poseidonia (Paestum - 273 a.c)

dominata dalla presenza di tre templi dorici le cui fondazioni sono separate dalla roccia di base da uno strato di sabbia

# Isolamento alla base

Prime applicazioni



Monastero di Santa Catalina ad Arequipa (XVI secolo) circa 1000 km a sud di Lima.

Fondazioni realizzate con uno strato isolante di sabbia e sassi profondo all'incirca 1 m,  
che permetteva alla struttura di assestarsi senza subire danni

# Isolamento alla base

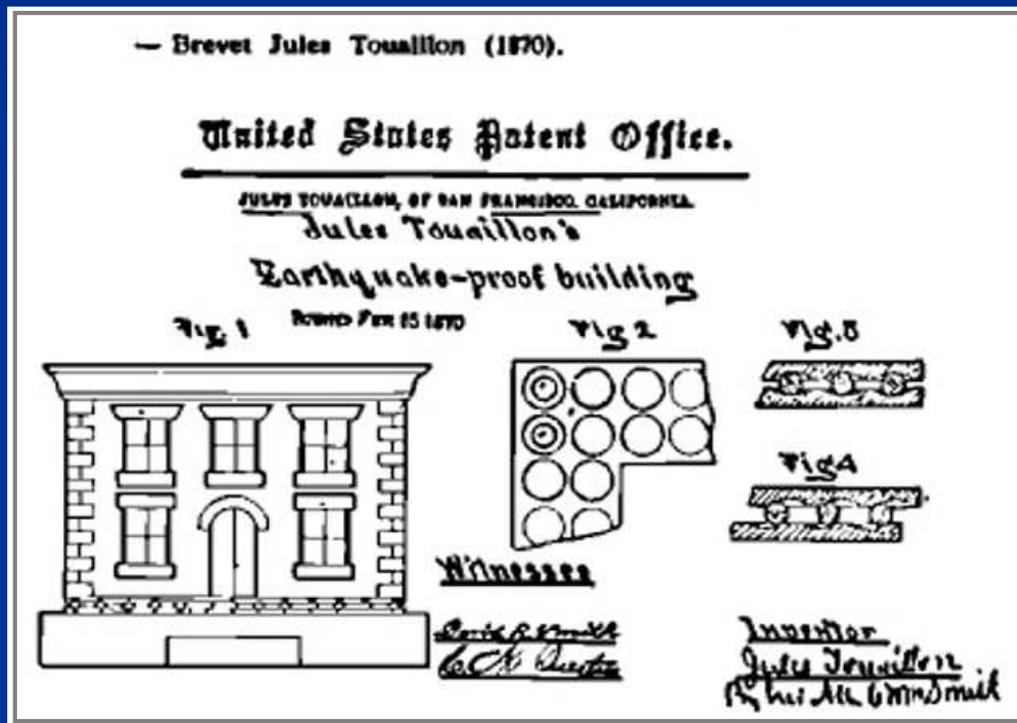
Prime applicazioni



Cittadella della Casbah, Algeri

# Isolamento alla base

## Prime applicazioni



Rulli in apposite nicchie sferiche tra sovrastruttura e fondazione

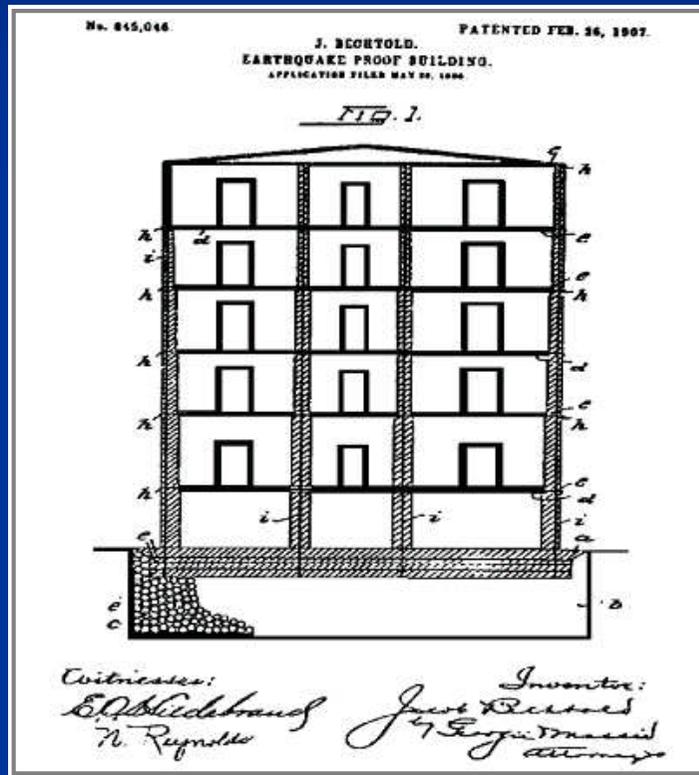
Ritorno alla posizione iniziale garantito dalla geometria del sistema di alloggiamento

Touaillon (1870)

Primo brevetto per un sistema d'isolamento

# Isolamento alla base

## Prime applicazioni



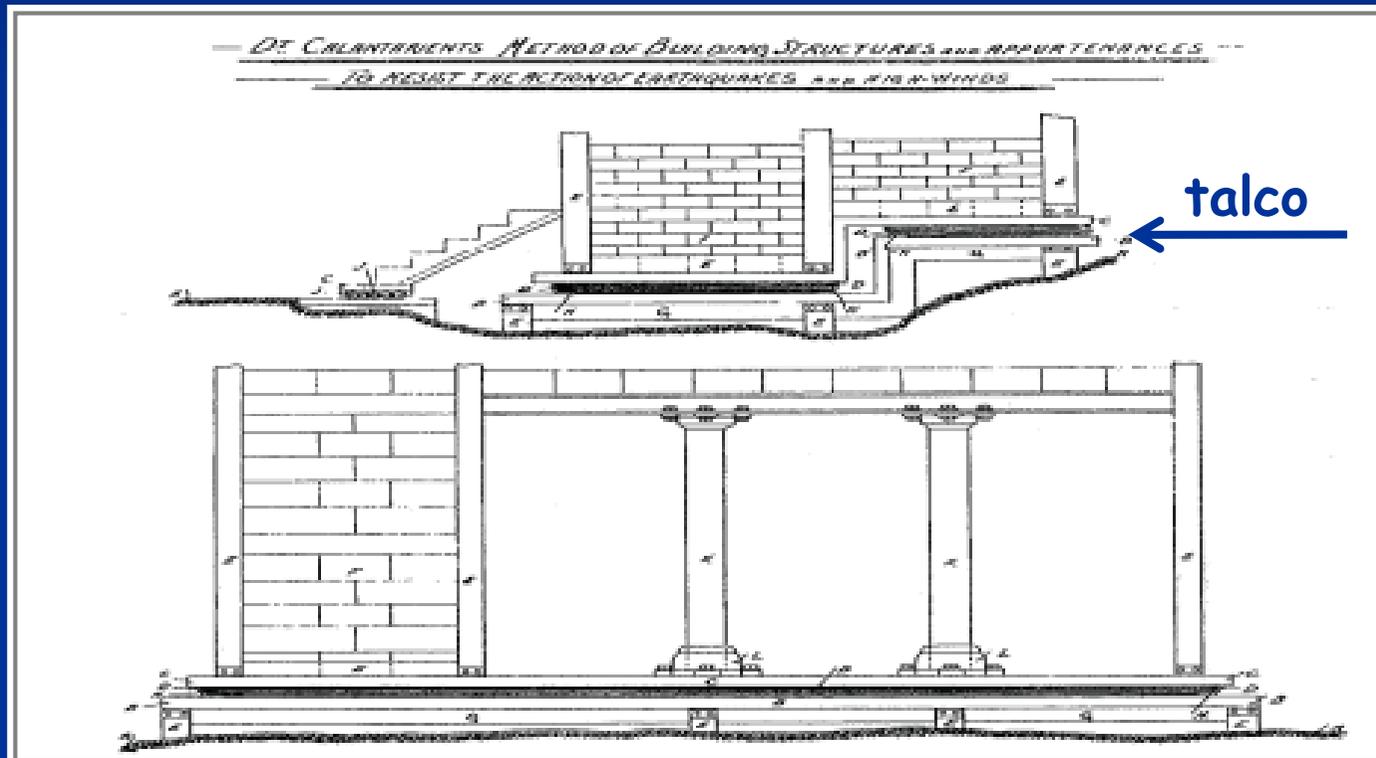
Brevetto per struttura sismoresistente con piastra poggiata su corpi sferici di materiale rigido

Bechtold (1906)

Brevetto per un sistema d'isolamento

# Isolamento alla base

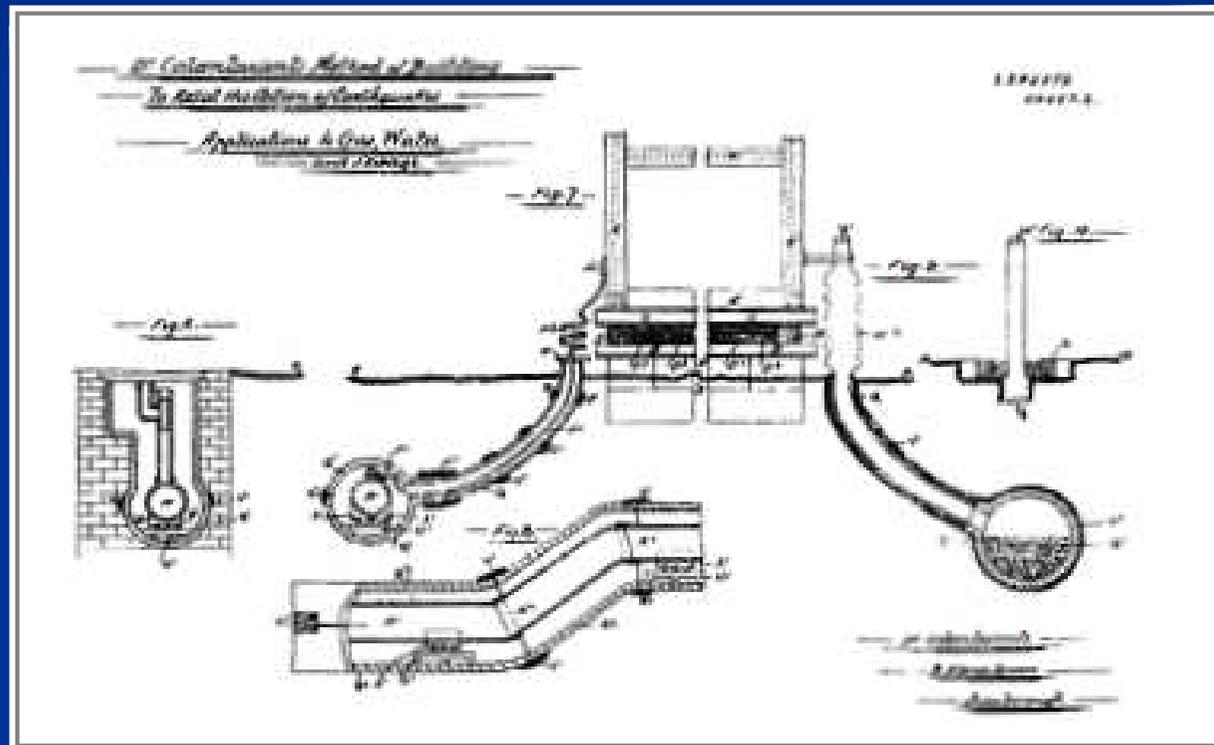
Prime applicazioni



Calantarietes (1909)  
Brevetto per un sistema d'isolamento

# Isolamento alla base

Prime applicazioni



Calantarietes (1909)  
Brevetto per un sistema d'isolamento

# Isolamento alla base

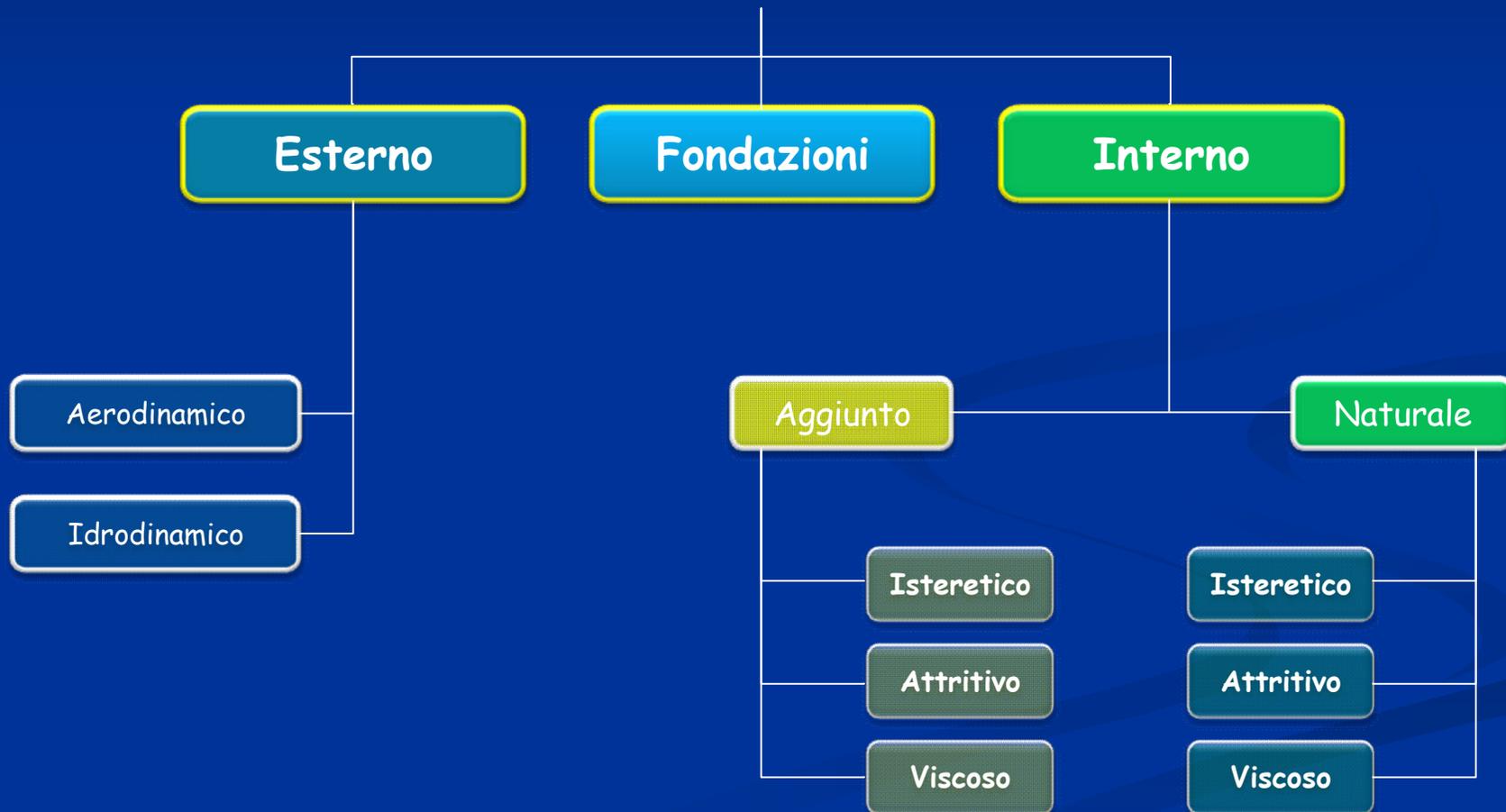
## Importanza dello smorzamento

Al fine di ridurre gli spostamenti in corrispondenza dell'interfaccia d'isolamento é opportuno disporre di una o più fonti importanti di

## SMORZAMENTO

**Nota !** Tale principio é indipendente dalla modalità di realizzazione dell'isolamento alla base

# Fonti di smorzamento della risposta sismica

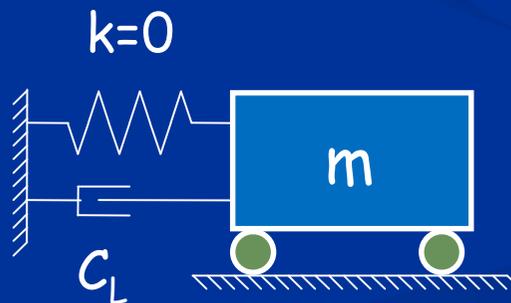


# Dispositivi di dissipazione viscosa lineare

Nei dispositivi di dissipazione viscosa lineare la forza sviluppata dal dispositivo è legata alla velocità relativa tra gli estremi del dispositivo dalla seguente relazione:

$$F(t) = C_L \dot{x}(t)$$

La costante  $C_L$  è detta costante di smorzamento viscoso lineare.



Schema di sistema viscoso

# Dispositivi di dissipazione viscosa lineare

Se si imprime un moto relativo di tipo sinusoidale  
agli estremi del dispositivo:

$$x(t) = X_0 \text{ sen } \omega t$$

la forza sviluppata dal dispositivo è:

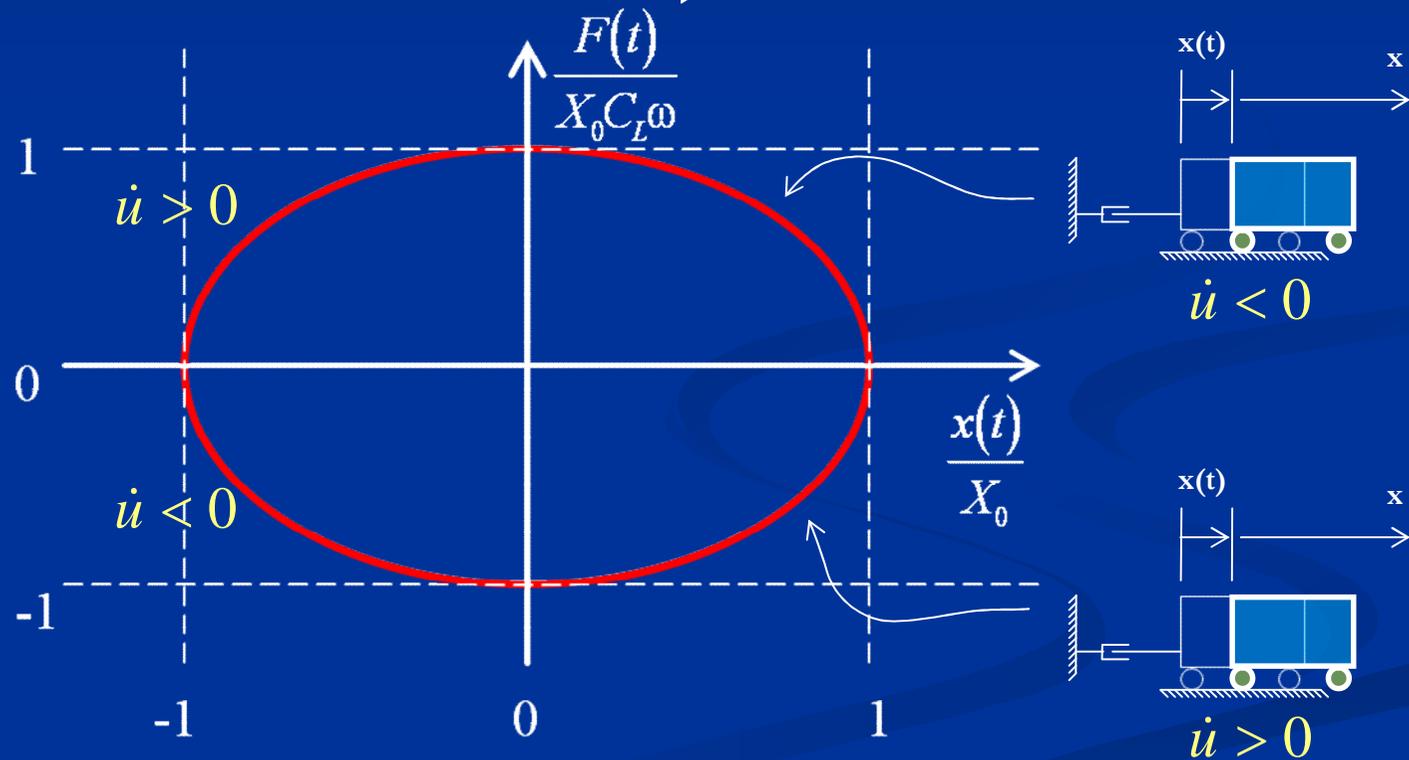
$$F(t) = C_L \omega X_0 \text{ cos } \omega t$$

ovvero,  
ricordando che  $\cos \omega t = \pm \sqrt{1 - \text{sen}^2 \omega t}$

$$F(t) = \pm C_L \omega \sqrt{X_0^2 - x^2(t)}$$

# Dispositivi di dissipazione viscosa lineare

$$\frac{F(t)}{X_0 C_L \omega} = \pm \sqrt{1 - \left[ \frac{x(t)}{X_0} \right]^2}$$



# Dispositivi di dissipazione viscosa lineare

La forza sviluppata dal dissipatore viscoso

✧ è massima quando lo spostamento relativo tra le estremità del dispositivo è nullo

✧ è nulla quando lo spostamento relativo tra le estremità del dispositivo è massimo

Inoltre, la forza sviluppata dal dissipatore viscoso è direttamente proporzionale:

- ✦ allo spostamento massimo impresso
- ✦ alla pulsazione dell'onda di spostamento
- ✦ alla costante di smorzamento viscoso

# Dispositivi di dissipazione viscosa lineare

L'energia dissipata dal dissipatore viscoso lineare  
in un ciclo di spostamento è pari a :

$$E_{vd} = \int_0^{2\pi/\omega} F(t) \dot{x}(t) dt = C_L \omega^2 X_0^2 \int_0^{2\pi/\omega} \cos^2 \omega t dt$$

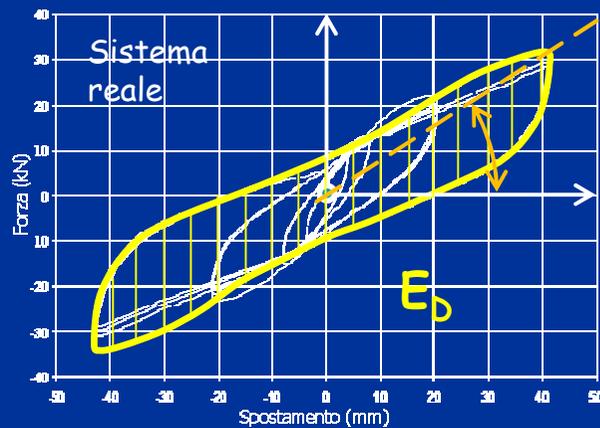
ovvero :

$$E_{vd} = C_L \omega^2 X_0^2 \left[ \frac{t}{2} + \frac{1}{4\omega} \text{sen } 2\omega t \right] \Bigg|_0^{2\pi/\omega} = C_L \pi \omega X_0^2$$

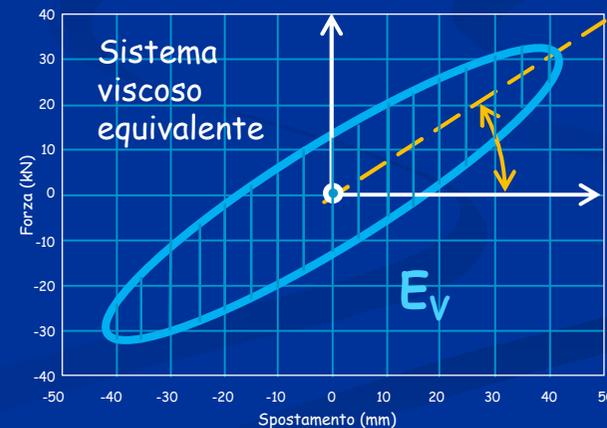
# Smorzamento viscoso equivalente

## Definizione

Si definisce smorzamento viscoso equivalente il valore dello smorzamento che un sistema con smorzamento di tipo viscoso lineare dovrebbe avere per dissipare in un ciclo, muovendosi con pulsazione pari alla pulsazione del sistema reale, la quantità di energia dissipata dal sistema reale nello stesso ciclo:



$$E_D = E_V$$



# Smorzamento viscoso equivalente

## Definizione

A tal fine, si può riscrivere la formula dell'energia dissipata dal sistema con smorzamento viscoso lineare:

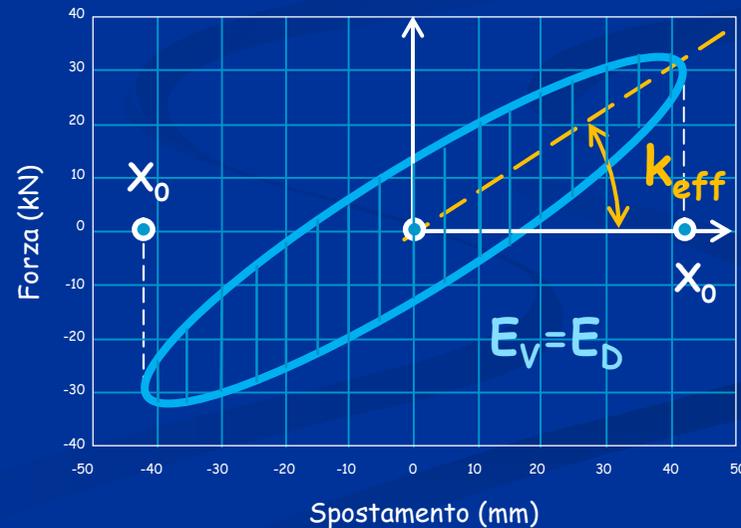
$$E_D = C_L \pi \omega X_0^2$$

In particolare, ricordando che

$$C_L = 2\xi_{eq} \omega m$$

si ha:

$$\begin{aligned} E_D &= 2\pi\xi_{eq} \omega^2 m X_0^2 \\ &= 2\pi\xi_{eq} k_{eff} X_0^2 \end{aligned}$$



# Smorzamento viscoso equivalente

## Definizione

Pertanto, possiamo calcolare lo smorzamento viscoso equivalente mediante le relazioni:

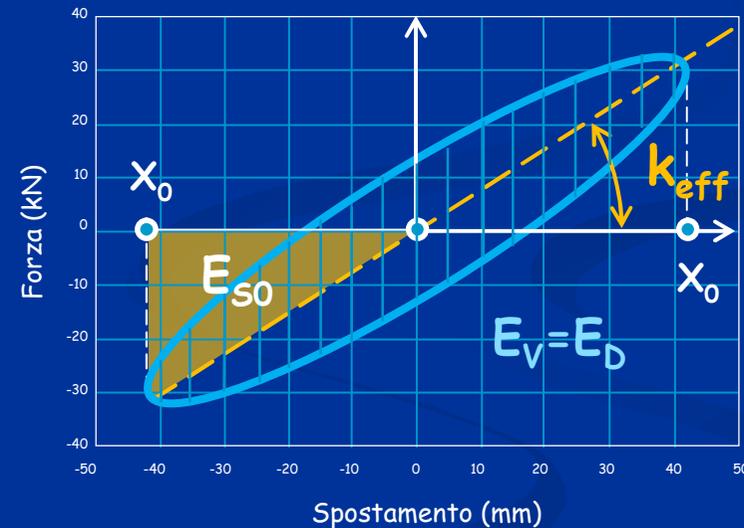
$$\xi_{eq} = \frac{E_D}{2\pi k_{eff} X_0^2}$$

ovvero:

$$\xi_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{S0}}$$

dove

$E_{S0}$  ( $1/2 k_{eff} X_0^2$ ) è l'energia elastica corrispondente allo spostamento massimo considerato



# Smorzamento viscoso equivalente

## Valori convenzionali

Materiali	Smorzamento (%)
<b>Cemento Armato</b>	
Piccola ampiezza (non fessurato)	0.7-1.0
Media ampiezza (fessurato)	1.0-4.0
Grande ampiezza (fessurato no snervamento acciaio)	4.0-8.0
<b>Acciaio</b>	1.0-2.0
<b>Isolatori elastomerici</b>	10-30

# Dispositivi di isolamento



# Isolatori elastomerici

*Gli isolatori elastomerici sono costituiti da strati alterni di acciaio e elastomero collegati mediante vulcanizzazione.*

# Isolatori elastomerici

## Caratteristiche fisico-meccaniche dell'elastomero

		Mescola			
		Normale nd	Morbida	Normale	Dura
Durezza	Shore A3	50±3	40±3	60±3	75±3
Resistenza a rottura (trazione)	MPa	20	20	20	18
Allungamento a rottura	%	600	750	600	500
Modulo di elasticita'	MPa	0.9	0.4	0.8	1.4
Smorzamento viscoso equivalente del solo elastomero	%	4	10	10	16

# Isolatori elastomerici

## Caratteristiche fisiche



Zanca d'ancoraggio

Caratteristiche fisiche dei dispositivi di isolamento

# Isolatori elastomerici

## Caratteristiche fisiche



Dispositivo di isolamento

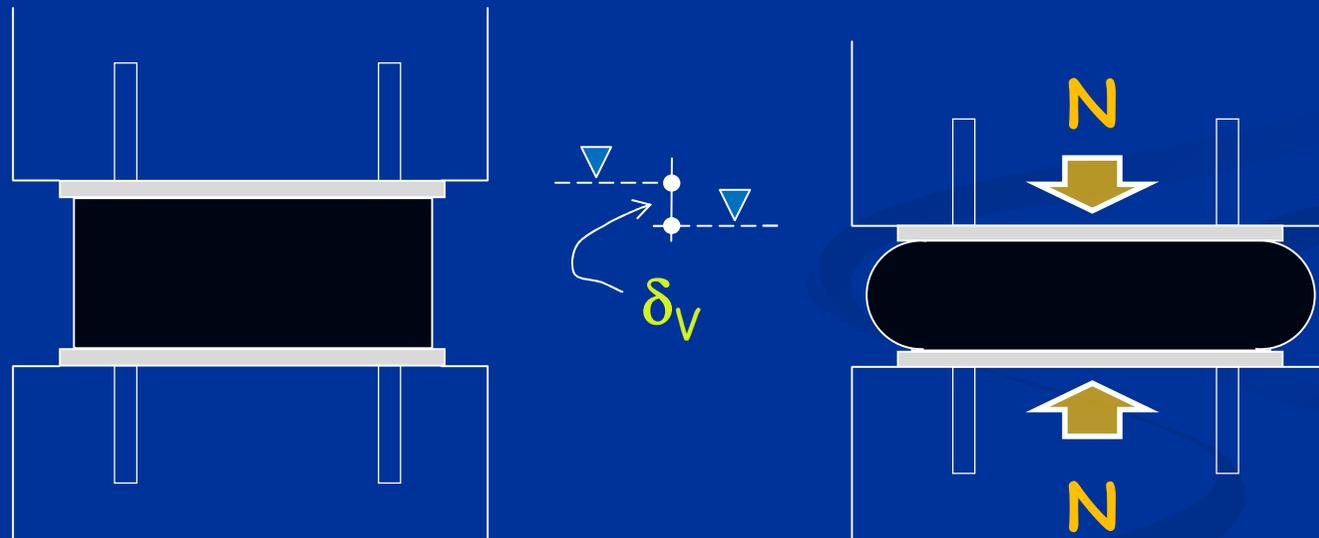
# Isolatori elastomerici

## Effetto delle piastre d'armatura

### In assenza di piastre di confinamento

Prima che sia trasmesso lo sforzo normale

Allorche' e' trasmesso lo sforzo normale



Effetto di vincolo esercitato dalle piastre in acciaio  
sulla gomma dei dispositivi di isolamento

# Isolatori elastomerici

## Effetto delle piastre d'armatura

In assenza di piastre di confinamento

1. Sono possibili importanti spostamenti verticali differenziali tra le basi dei pilastri  
(con notevoli rispercussioni sulle travi in elevazione)
2. Sono possibili moti di "rocking" durante l'evento sismico o in occorrenza di venti di forte intensita'  
(con notevole fastidio per gli occupanti e aumento di sollecitazioni sugli elementi strutturali)

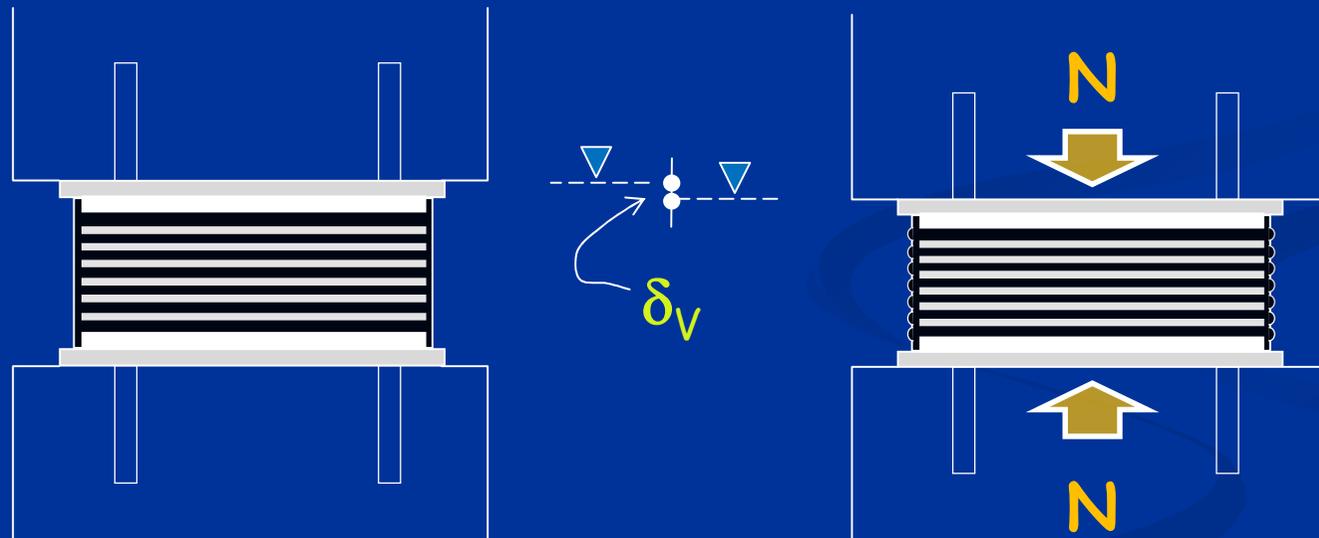
# Isolatori elastomerici

## Effetto delle piastre d'armatura

In presenza di piastre di confinamento

Prima che sia trasmesso lo sforzo normale

Allorche' e' trasmesso lo sforzo normale



**Risultato:** Le piastre di confinamento aumentano notevolmente la rigidità verticale degli isolatori

# Isolatori elastomerici

Effetto delle piastre in acciaio



Effetto di vincolo esercitato dalle piastre in acciaio  
sulla gomma dei dispositivi di isolamento

# Isolatori elastomerici

## Ipotesi di calcolo

La modellazione analitica della risposta di uno strato di gomma confinato da piastre rigide, soggetto ad un carico verticale presenta delle difficoltà a causa della forte non linearità del fenomeno e della non omogeneità dello stato deformativo.

L'assunzione di base considera il campo di spostamenti totali derivanti dalla sovrapposizione di

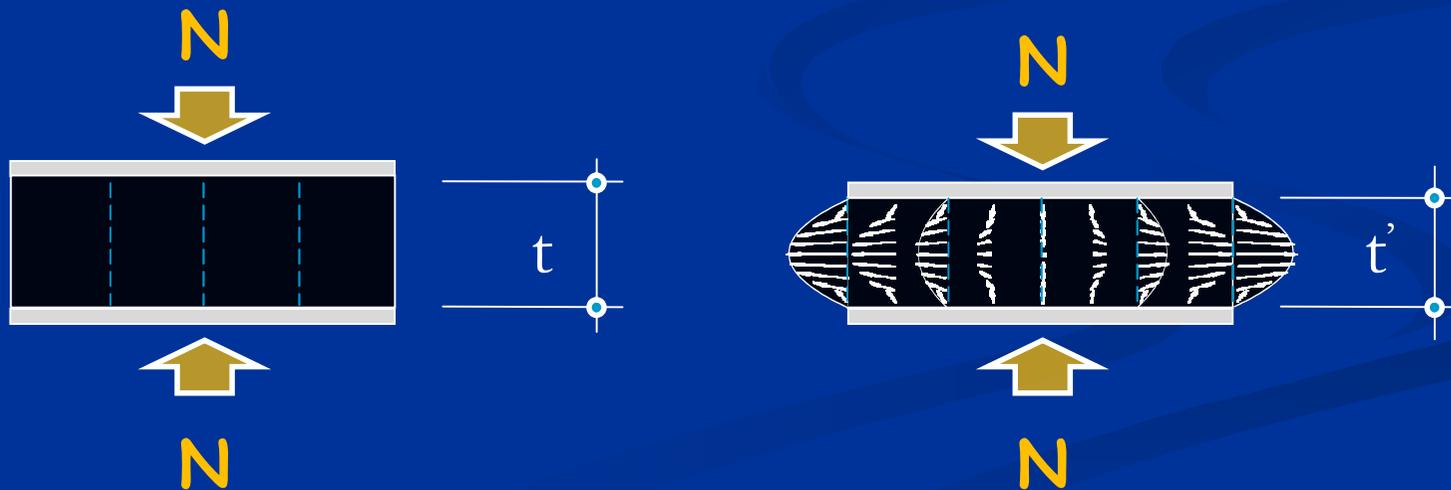
- campo di spostamenti provenienti dalla compressione omogenea dello strato di gomma libera
- campo distorsionale necessario a ristabilire la condizione di confinamento e di incompressibilità media.

# Isolatori elastomerici

## Ipotesi di calcolo

Ipotesi della modellazione analitica :

- le sezioni orizzontali rimangono piane dopo la deformazione;
- le superfici cilindriche, inizialmente verticali, diventano paraboliche;
- elastomero incompressibile, cioè  $\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = 0$ ;



# Isolatori elastomerici

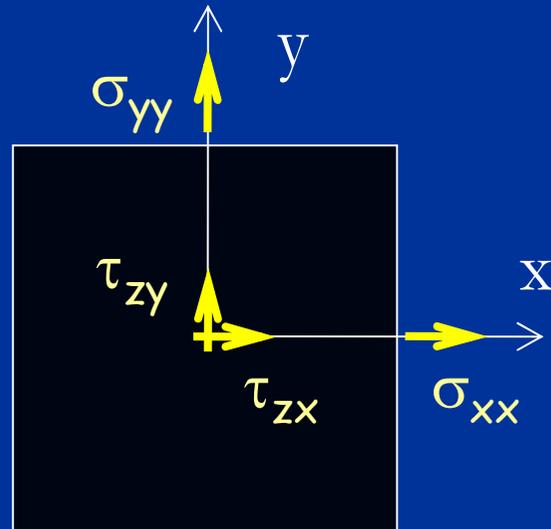
## Stato tensionale

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = p$$

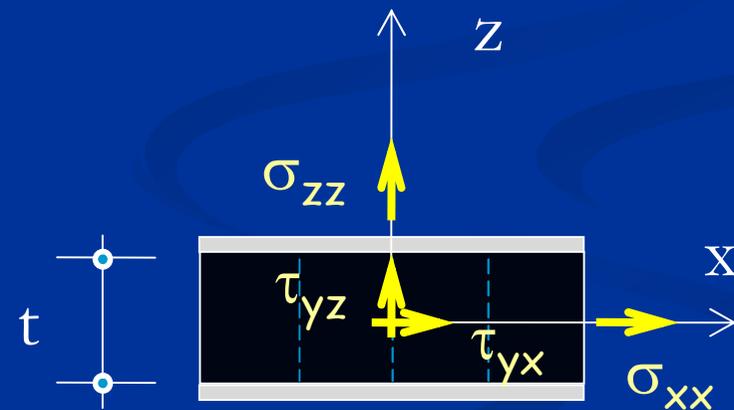
$$\tau_{xy} = 0 \quad \tau_{xz} \neq 0 \quad \tau_{yz} \neq 0$$

pressione idrostatica

tensioni tangenziali generate  
dal confinamento  
delle piastre in acciaio



Pianta



Sezione verticale

# Isolatori elastomerici

## Rigidezza verticale

La rigidezza verticale dell'isolatore è calcolata mediante la relazione

$$K_V = \frac{N}{\delta_V} = \frac{E A}{t_r}$$

dove :

**E** è il modulo istantaneo a compressione dell'insieme elastomero + piastre d'acciaio

**A** è l'area trasversale totale dell'elastomero (normalmente al limite della piastra)

**t<sub>r</sub>** è lo spessore totale dell'elastomero

# Isolatori elastomerici

## Modulo elastico a compressione

Il modulo  $E_c$  dell'isolatore puo' essere ricavato nell'ipotesi che il campo di forze sia fornito dalla sovrapposizione di due campi di forze semplici:

- la forza  $F_1$   
associata allo stato di deformazione verticale e applicato al blocco di gomma considerato libero di deformarsi (ovvero in assenza del confinamento determinato dalla presenza dei piatti metallici);
- la forza  $F_2$   
associata allo spostamento radiale che si deve imporre per ristabilire la congruenza tra blocco elastomerico e piatti metallici, cioè per annullare gli spostamenti orizzontali dei punti appartenenti alle superfici di attacco gomma-acciaio.

# Isolatori elastomerici

## Modulo elastico a compressione

In ogni caso :

$$F_1 = E_0 A \varepsilon$$

dove :

$E_0$  è il modulo di Young della gomma;

$A$  è l'area della sezione dell'appoggio;

$\varepsilon$  è pari a  $\Delta t/t$  e rappresenta la deformazione verticale della gomma;

# Isolatori elastomerici

## Modulo elastico a compressione

Nel caso di isolatore circolare :

$$F_2 = \frac{\pi E_0 \delta R^4}{2t^3} = p_m A \quad \text{e quindi ...} \quad E_c = \frac{(F_1 + F_2)}{A \varepsilon} = E_0 \left( 1 + \frac{p_m A}{\varepsilon E_0 A} \right)$$

Poiche'

$$p_m A = \frac{3G\pi R^4}{2t^2} \varepsilon_c$$

si ha (materiale comprimibile) :

$$E_c = 6GS_1^2 \left( 1 - \frac{8GS_1^2}{K} \right) \quad \text{dove } K \text{ e' il modulo di modulo di comprimibilita' volumetrica}$$

# Isolatori elastomerici

## Modulo elastico a compressione

Nell'ipotesi di materiale incomprimibile il modulo istantaneo a compressione dell'insieme elastomero + piastre d'acciaio vale

$$E = 6G S_1^2$$

Dispositivo a sezione circolare

$$E = 6.73G S_1^2$$

Dispositivo a sezione quadrata

$$E = 6\lambda G S_1^2$$

Dispositivo a sezione circolare  
con foro centrale

dove :

$$\lambda = \frac{b^2 + a^2 - \left[ (b^2 - a^2) / (\ln b / a) \right]}{(b - a)^2}$$

essendo  
a e b i raggi interni e esterni  
dell'elastomero

# Isolatori elastomerici

Fattore di forma primario

Il fattore di forma  $S_1$  del singolo strato di gomma è definito dalla relazione :

$$S_1 = \frac{\textit{area caricata}}{\textit{area libera}}$$

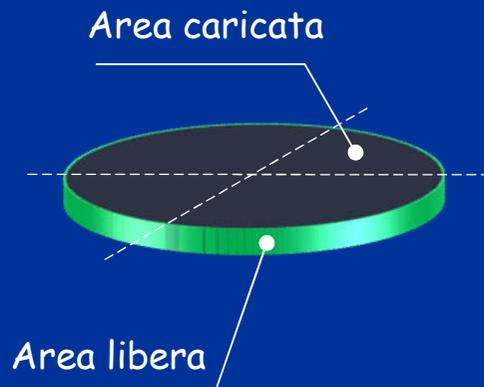
Esso controlla il confinamento della gomma  
e quindi  
la rigidità verticale

# Isolatori elastomerici

Fattore di forma primario

Nel caso di un isolatore elastomerico a sezione circolare

$$S_1 = \frac{\text{area caricata}}{\text{area libera}}$$



$$\Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow S_1 = \frac{\pi R^2}{2\pi R t} = \frac{R}{2t}$$

dove :

$R$  è il raggio del singolo strato di elastomero

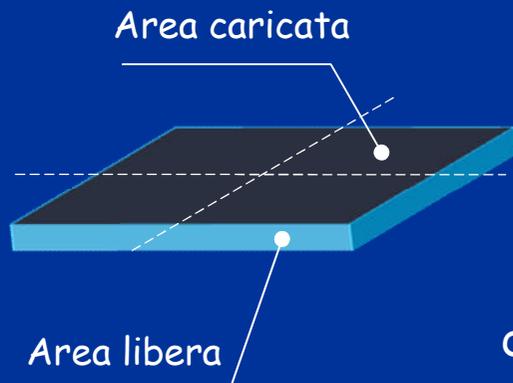
$t$  è lo spessore del singolo strato di elastomero

# Isolatori elastomerici

Fattore di forma primario

Nel caso di un isolatore elastomerico a sezione rettangolare

$$S_1 = \frac{\text{area caricata}}{\text{area libera}}$$



⇒ ⇒ ⇒ ⇒ ⇒ ⇒  $S_1 = \frac{a^2}{4at} = \frac{a}{4t}$

dove :

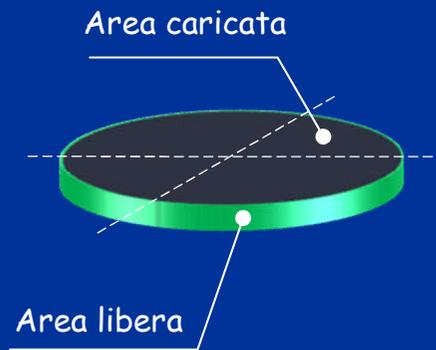
**a** è il lato del singolo strato di elastomero

**t** è lo spessore del singolo strato di elastomero

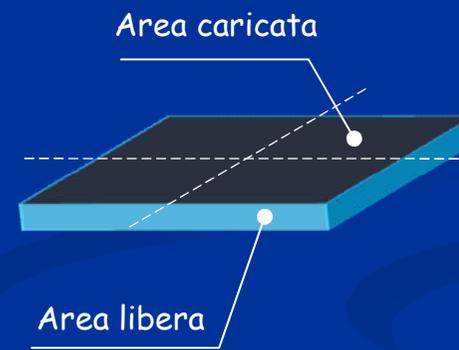
# Isolatori elastomerici

Fattore di forma primario

$$K_V = \frac{E A}{t_r}$$



$$E = 6G S_1^2$$



$$E = 6.73G S_1^2$$

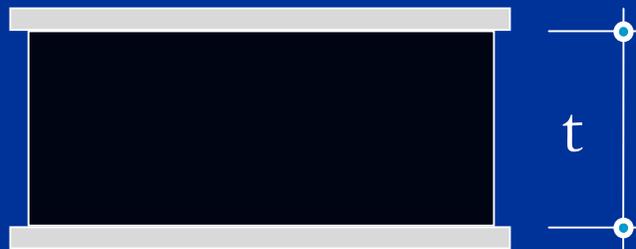
Al fine di ottenere una elevata rigidezza verticale è opportuno avere il fattore di forma  $S_1 > 12$

# Isolatori elastomerici

Fattore di forma primario

In funzione dell'altezza degli strati di elastomero e di acciaio

$$S_1 = \frac{\text{area caricata}}{\text{area libera}}$$



S1 basso



S1 alto

# Isolatori elastomerici

## Deformazione a taglio per compressione

Sotto compressione diretta il vincolo fornito dalle piastre di confinamento produce una deformazione massima da taglio nell'elastomero:

$$\gamma_c = 6 S_1 \varepsilon_c$$

dove :

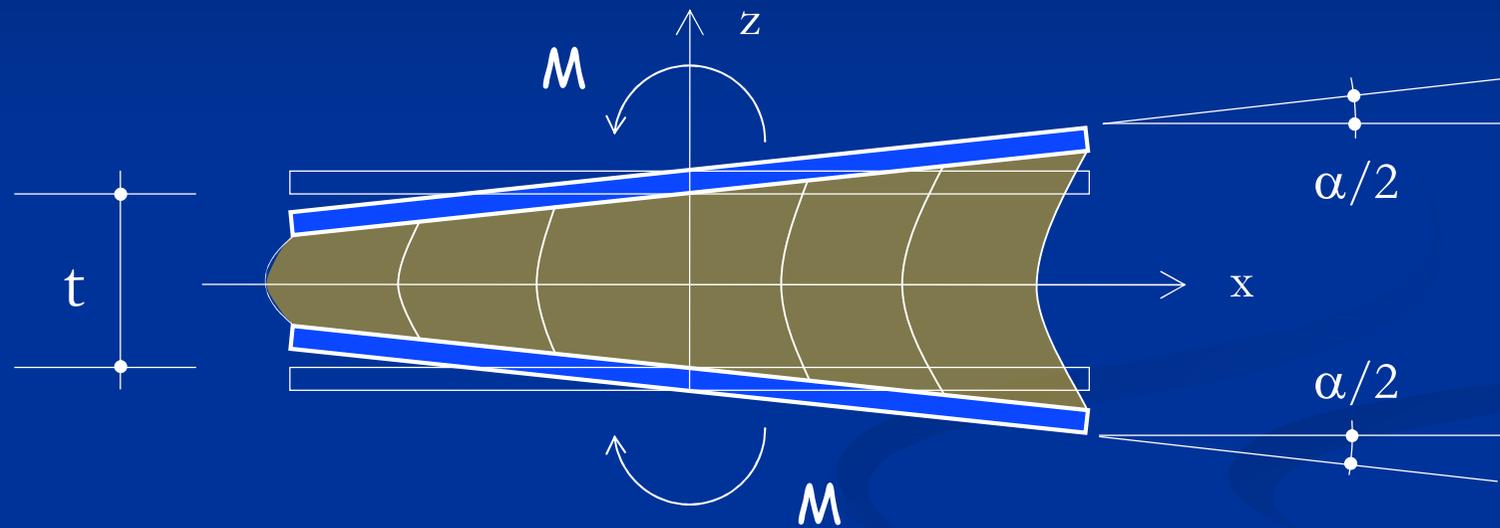
$\varepsilon_c = \delta_v / t_r$  è la deformazione normale indotta dai carichi verticali

$\delta_v$  è lo spostamento verticale indotto dai carichi verticali

$t_r$  è lo spessore totale dell'elastomero

# Isolatori elastomerici

Rigidezza flessionale



$$M = (EI)_{eff} \frac{\alpha}{t}$$

# Isolatori elastomerici

## Rigidezza flessionale

La rigidità flessionale dello strato può essere valutata come :

$$(EI)_{eff} = \frac{3G}{2t^2} \frac{\pi R^6}{12}$$

Dispositivo a sezione circolare

$$(EI)_{eff} = 6G S_1^2 (0.329 I)$$

Dispositivo a sezione quadrata

$$(EI)_{eff} = 2G S_1^2 I \frac{(b+a)}{(b^2 - a^2)}$$

Dispositivo a sezione circolare  
con foro centrale

dove :

$a, b$  sono i raggi interni ed esterni dello strato

$t$  è lo spessore del singolo strato di elastomero

# Isolatori elastomerici

## Deformazione a taglio per flessione

Le deformazioni da taglio indotte da momento flettente sono valutate mediante la relazione :

$$\gamma_{\alpha} = 6 S_1 \varepsilon_{\alpha}$$

dove :

$\varepsilon_{\alpha} = R\alpha/t$  è la def. normale max indotta da momento flettente

$\alpha$  è la rotazione relativa tra le due facce dello strato di elastomero

$R$  è il raggio dello strato di elastomero

$t$  è lo spessore del singolo strato di elastomero

# Isolatori elastomerici

Deformazione a taglio per flessione

Isolatore elastomerico con sezione circolare :

$$\gamma_{\alpha} = 6 \frac{R}{2t} \frac{R\alpha}{t_e} = \frac{3D^2\alpha}{4tt_e}$$

dove :

$\alpha$  è la rotazione relativa tra le due facce dello strato di elastomero

$R$  è il raggio dello strato di elastomero

$D$  è il diametro dello strato di elastomero

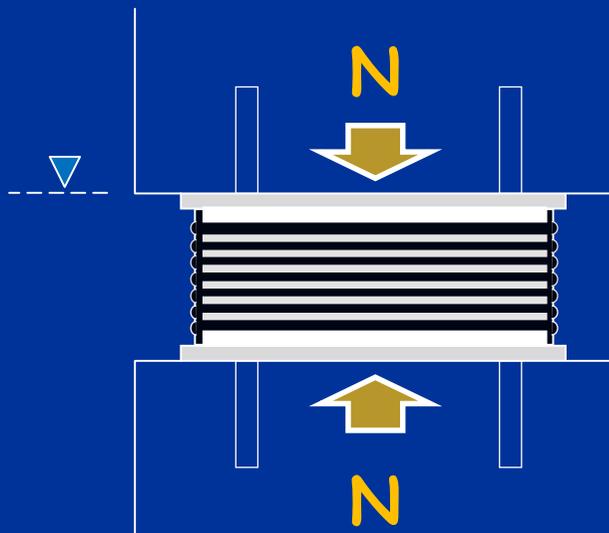
$t$  è lo spessore del singolo strato di elastomero

$t_e$  è lo spessore totale degli strati di elastomero

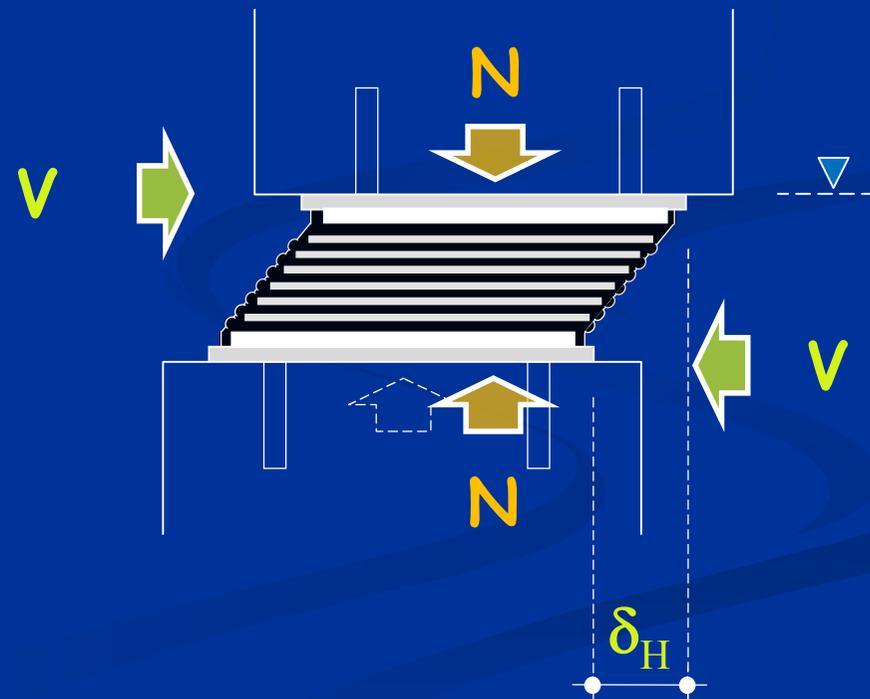
# Isolatori elastomerici

## Comportamento a taglio

Prima che sia trasmesso il taglio



Allorche' e' trasmesso il taglio



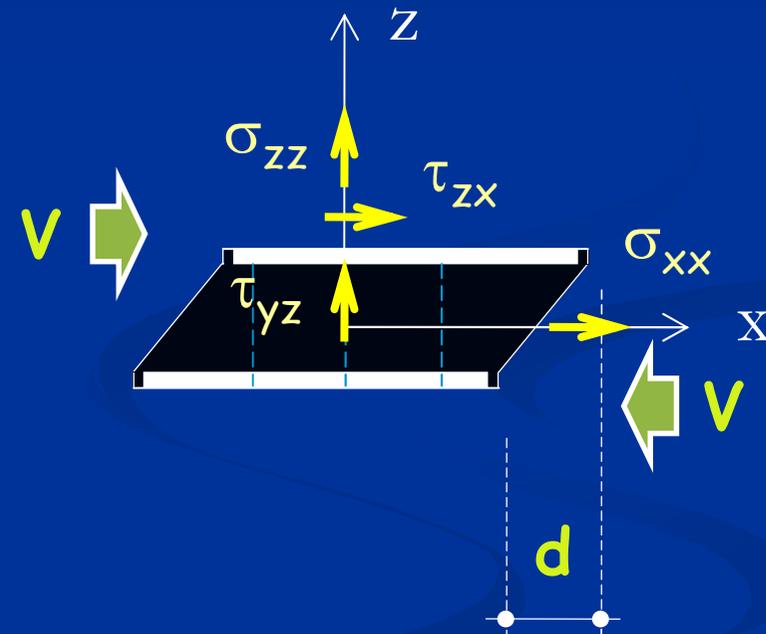
# Isolatori elastomerici

## Comportamento a taglio

La forza  $V$  induce nell'elastomero tensioni tangenziali  $\tau_{xz}$  e  $\tau_{yz}$ .

Il campo delle  $\tau_{yz}$  avrà risultante nulla, mentre la risultante delle  $\tau_{xz}$  sarà uguale in modulo ma di verso contrario alla forza  $V$ .

Nelle ipotesi che le sezioni orizzontali rimangano piane e di gomma incompressibile, le tensioni normali risultano essere nulle essendo nulla la pressione media verticale  $p_m$ .



Strato di elastomero soggetto a taglio

# Isolatori elastomerici

## Rigidezza laterale

La rigidezza laterale dell'isolatore è calcolata mediante la relazione

$$K_H = \frac{V}{\delta} = \frac{GA}{t_r}$$

dove :

$G$  è il modulo a taglio dell'elastomero

$A$  è l'area trasversale totale dell'elastomero

$t_r$  è lo spessore totale dell'elastomero

La deformazione a taglio dell'elastomero è'  $\gamma = \frac{\delta}{t_r}$

# Isolatori elastomerici

## Smorzamento

Nei dispositivi di isolamento elastomerici lo smorzamento è in parte viscoso e in parte isteretico.

Esso e':

- variabile in funzione della tipologia di isolatore
- utilizzato per tener conto di fonti di smorzamento diverse dalla viscosa nell'ambito di modellazioni ed analisi lineari

Quali sono i dispositivi di isolamento  
sul mercato ?

# Isolatori elastomerici a basso smorzamento

## Comportamento

Lineare a taglio  
fino a deform. non superiori al 100%

## Smorzamento viscoso equivalente

2 - 3%

## Vantaggi:

- Semplice da fabbricare
- Facile da modellare
- Risposta non molto sensibile alla velocità di carico, alla storia di carico, alla temperatura e all' invecchiamento

## Svantaggi:

Necessita' di un sistema di smorzamento supplementare

# Isolatori elastomerici a basso smorzamento

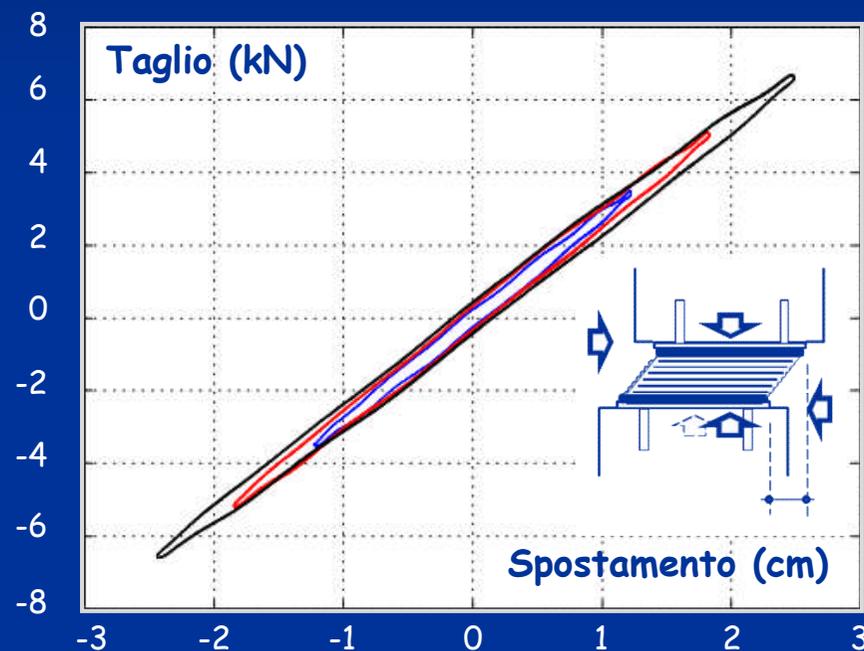


Diagramma taglio-spostamento  
di un dispositivo di isolamento in gomma a basso smorzamento

# Isolatori elastomerici ad elevato smorzamento

Lo smorzamento è incrementato  
aggiungendo nerofumo, oli, resine e altri filler.

## Comportamento

Non Lineare  
con max def. a taglio = 200 - 350%

## Smorzamento viscoso equivalente

10 - 15%  
per deformazioni a taglio del 100%

## Modulo a taglio

0.4-1.4 MPa

## Nota !

Rigidezza e smorzamento efficaci  
dipendono da:

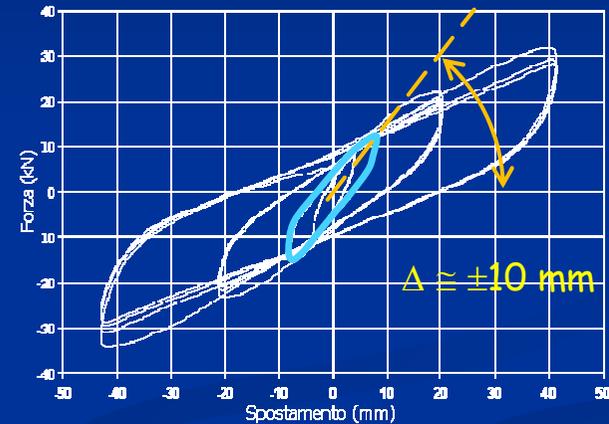
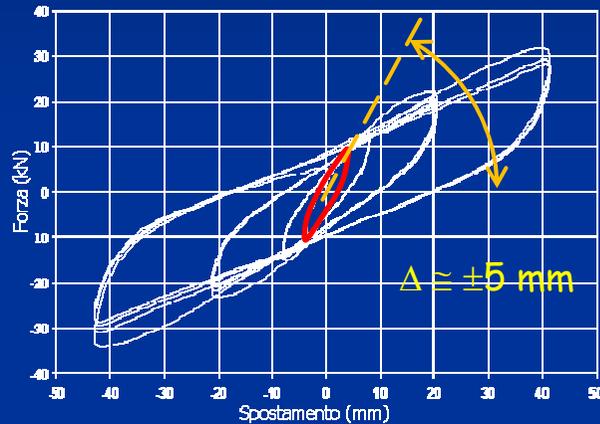
- Elastomero e filler
- Pressione di contatto
- Velocità di carico
- Storia di carico
- Temperatura

# Isolatori elastomerici ad elevato smorzamento

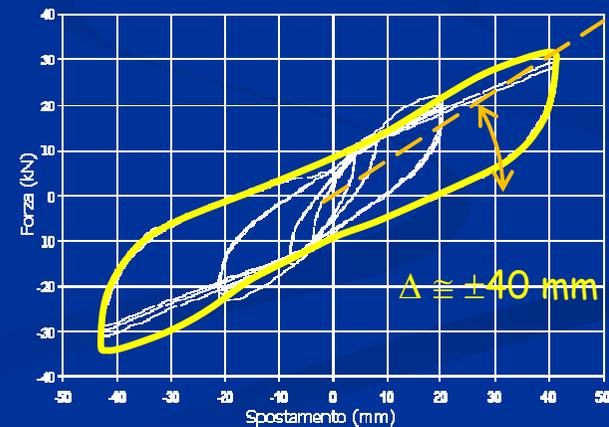
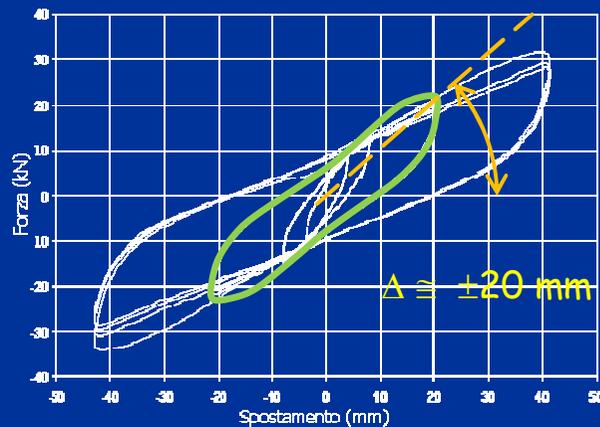


Diagramma taglio-deformazione  
di un dispositivo di isolamento in gomma ad alto smorzamento

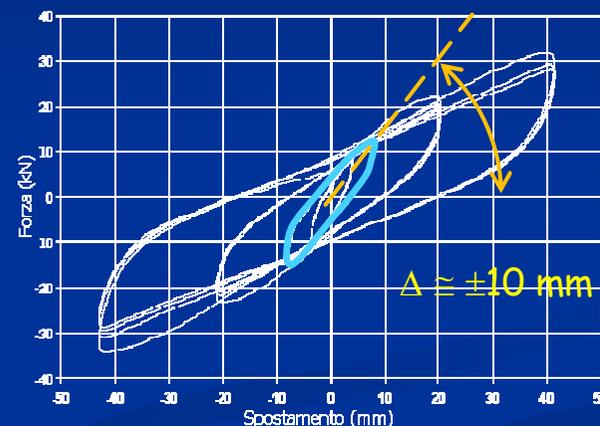
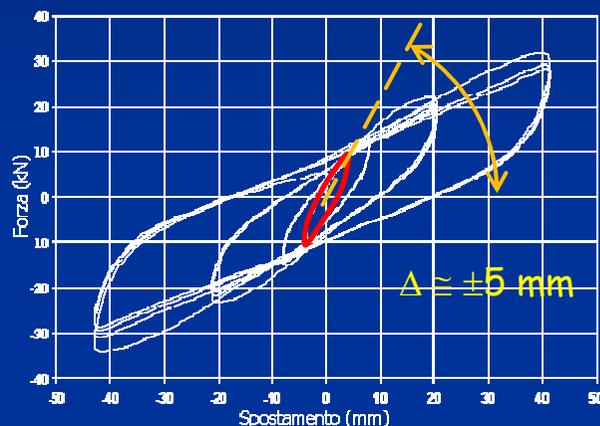
# Isolatori elastomerici ad elevato smorzamento



La rigidezza efficace dipende dall'entità dello spostamento max



# Isolatori elastomerici ad elevato smorzamento



La rigidezza è elevata  
in corrispondenza di piccole deformazioni a taglio dell'isolatore



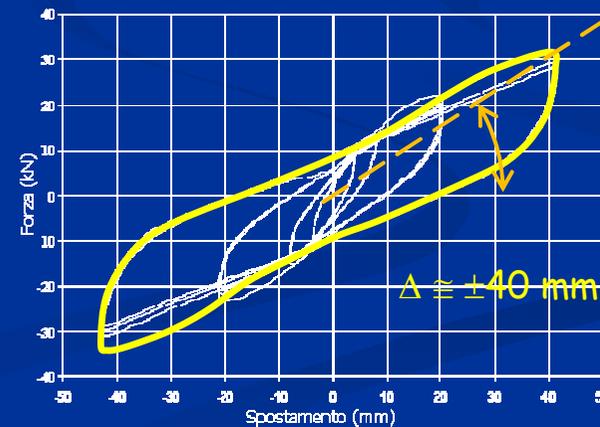
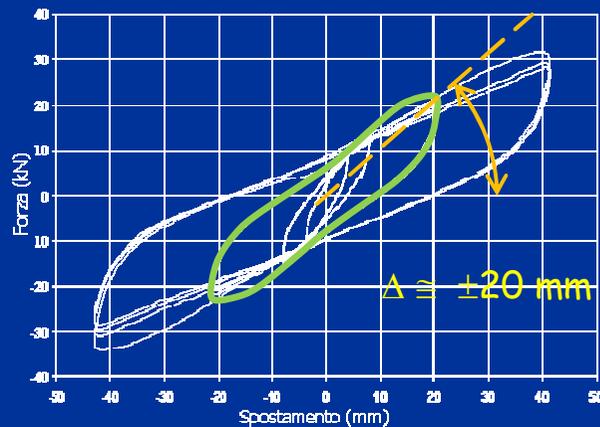
Ciò consente di ridurre l'ampiezza delle vibrazioni  
in presenza di forze di taglio di moderata intensità (ad es. vento)

# Isolatori elastomerici ad elevato smorzamento

La rigidità è bassa  
in corrispondenza di grandi deformazioni a taglio dell'isolatore

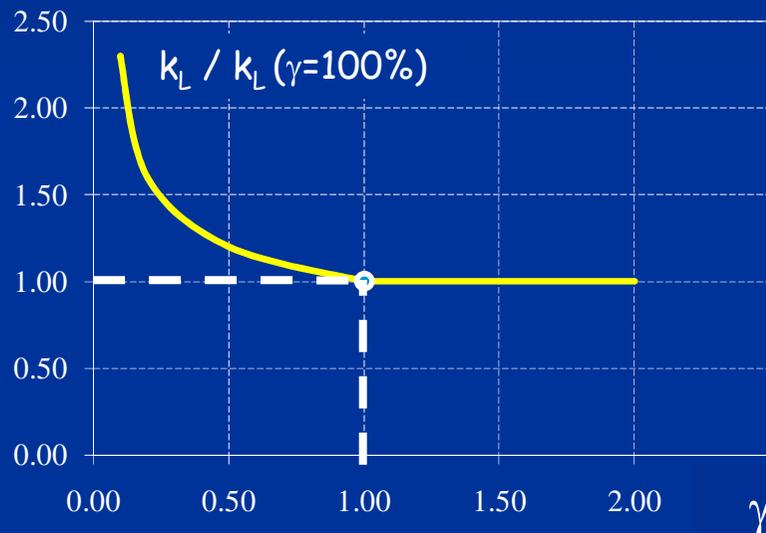


Ciò consente di ridurre le azioni da sisma sulla sovrastruttura



# Isolatori elastomerici ad elevato smorzamento

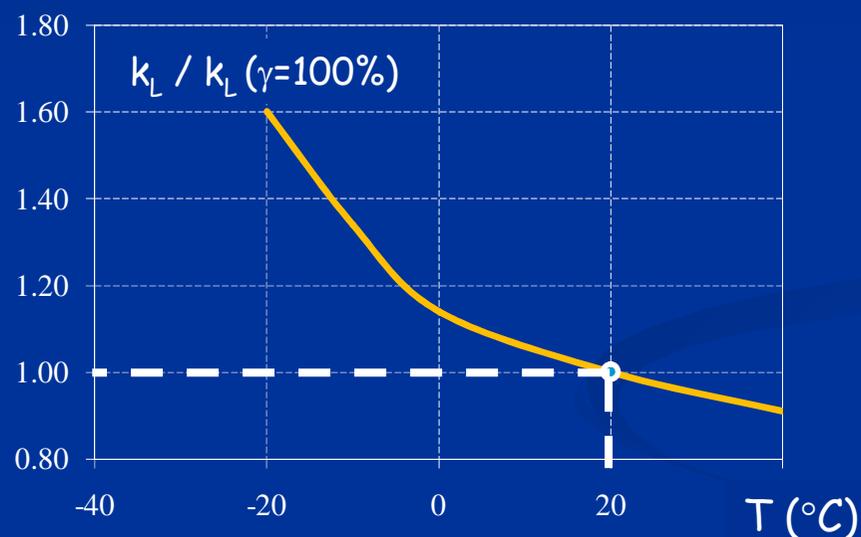
Variazione delle rigidezza laterale con la deformazione a taglio



- La rigidezza laterale e' quasi costante per deformazioni da taglio comprese tra il 100 e il 150-200%.
- Per piccoli valori della deform. da taglio, la rigidezza laterale assume valori anche tripli rispetto a quelli in corrispondenza del 100 % di deform. da taglio
- Per deformazioni da taglio superiori al 200% si osserva un incremento della rigidezza laterale conseguente alla cristallizzazione della gomma

# Isolatori elastomerici ad elevato smorzamento

Variazione delle rigidezza laterale con la temperatura



Variazione relativa di rigidezza  
di un dispositivo di isolamento in gomma ad alto smorzamento  
in funzione della temperatura

# Isolatori elastomerici ad elevato smorzamento

Si è visto sperimentalmente che

- la rigidezza equivalente  $k_{eff}$  non dipende fortemente dalla pressione verticale agente,

- lo smorzamento equivalente  $\xi$  cresce notevolmente al crescere del carico assiale:

al raddoppiarsi del carico lo smorzamento  $\xi$  può aumentare dal 50% al 100%.

# Isolatori elastomerici

**D 450 B 500 Z 370**

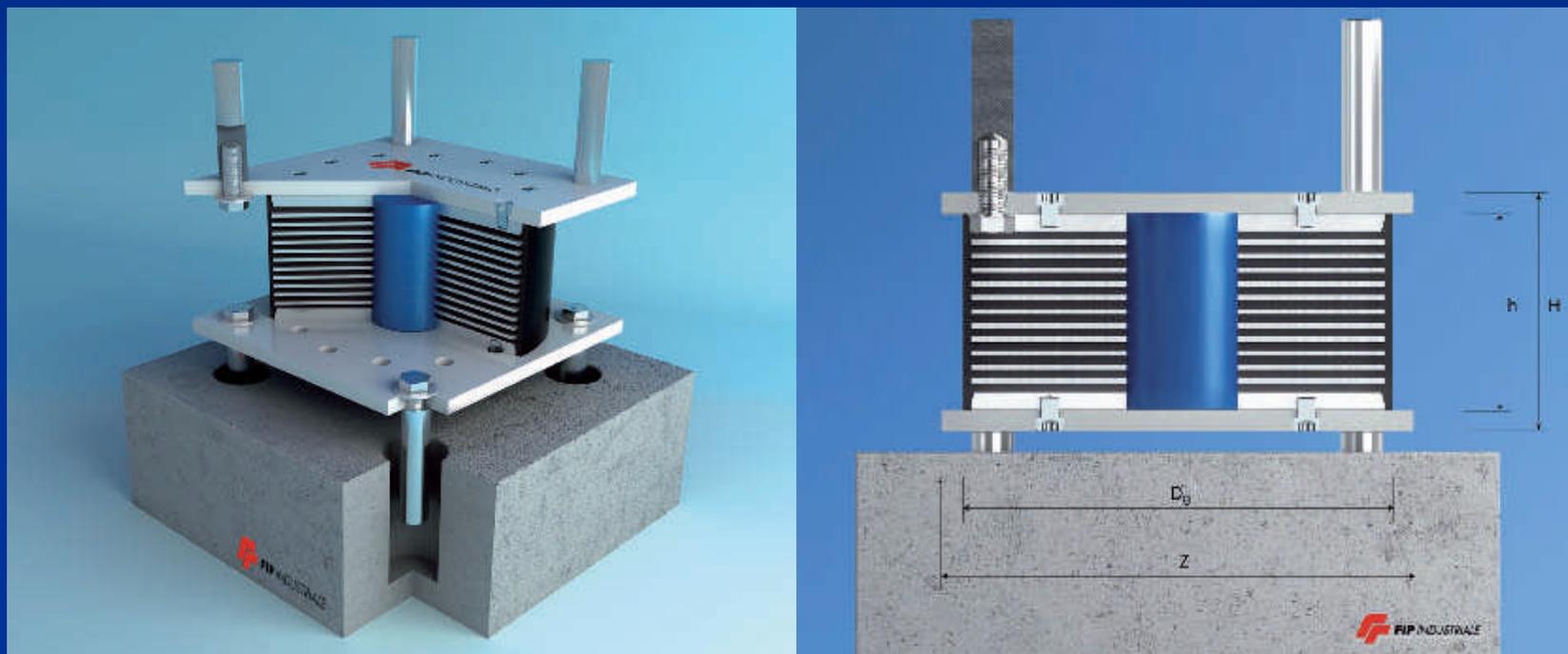
① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦

- ① Spessore elastomero
- ② Altezza totale isolatore
- ③ Spostamento di progetto

- ④ Carico verticale massimo allo SLU con spostamento nullo
- ⑤ Carico verticale in condizione sismica
- ⑥ Rigidezza verticale dinamica
- ⑦ Rigidezza laterale

t <sub>e</sub>	H	G=0.4 MPa (ξ=10%)					G=0.8 MPa (ξ=10%)					G=1.4 MPa (ξ=16%)				
		S <sub>max</sub>	V <sub>max</sub>	V <sub>sisma</sub>	K <sub>r</sub>	K <sub>v</sub>	S <sub>max</sub>	V <sub>max</sub>	V <sub>sisma</sub>	K <sub>r</sub>	K <sub>v</sub>	S <sub>max</sub>	V <sub>max</sub>	V <sub>sisma</sub>	K <sub>r</sub>	K <sub>v</sub>
mm	mm	mm	kN	kN	kN/mm	kN/mm	mm	kN	kN	kN/mm	kN/mm	mm	kN	kN	kN/mm	kN/mm
48	138	100	1300	1300	1.05	1287	100	2650	2650	2.09	2280	100	4650	4650	3.67	3405
56	150	120	1400	1400	0.90	1104	120	2850	2850	1.80	1954	120	5000	5000	3.14	2919
64	162	130	1500	1300	0.79	966	130	3050	2650	1.57	1710	130	5350	4650	2.75	2554
72	174	150	1550	1100	0.70	858	150	3150	2200	1.40	1520	150	5500	3850	2.44	2270
80	195	160	1600	950	0.63	772	160	3250	1900	1.26	1368	160	5650	3350	2.20	2043
88	198	180	1450	800	0.57	702	180	2900	1600	1.14	1244	180	5100	2800	2.00	1857
96	219	200	1300	650	0.52	644	200	2600	1350	1.05	1140	200	4600	2400	1.83	1703
104	222	210	1200	600	0.48	594	210	2400	1200	0.97	1052	210	4200	2150	1.69	1572
112	221	230	1051	500	0.45	552	230	2150	1050	0.90	977	230	3800	1850	1.57	1459
120	232	240	1000	450	0.42	515	240	2000	950	0.84	912	240	3550	1650	1.47	1362
128	243	260	900	400	0.39	483	260	1850	800	0.79	855	250	3250	1400	1.37	1277

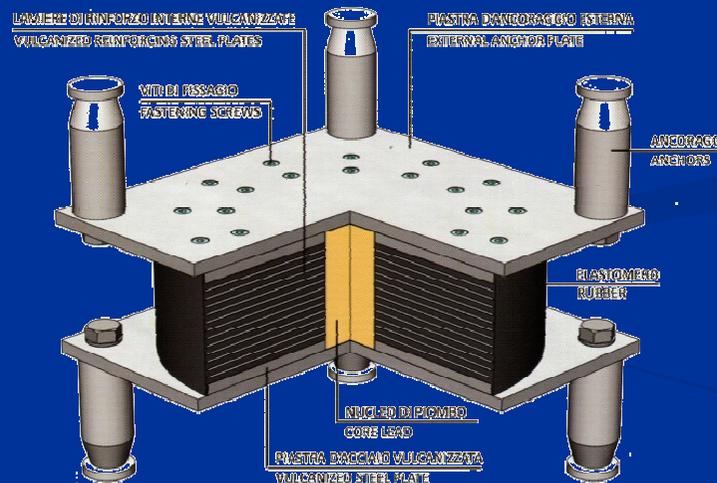
# Isolatori elastomerici con elemento in piombo



Caratteristiche fisiche dei dispositivi di isolamento  
con elemento centrale in piombo

# Isolatori elastomerici con elemento in piombo

L'isolatore e' in gomma a basso smorzamento  
con un elemento centrale in piombo



## Piombo

- La tensione di snervamento e' circa 10MPa
- La tensione di snervamento si riduce con cicli ripetuti di carico in virtu' dell'aumento di temperatura

# Isolatori elastomerici con elemento in piombo

L'isolatore e' in gomma a basso smorzamento con un elemento centrale in piombo

## Comportamento

Fortemente Non Lineare  
con max def. a taglio = 125 - 200%

## Smorzamento viscoso equivalente

$\cong 30\%$   
per deformazioni a taglio del 100%

## Nota !

Rigidezza e smorzamento efficaci  
sono meno variabili che negli isolatori  
ad elevato smorzamento

# Isolatori elastomerici con elemento in piombo

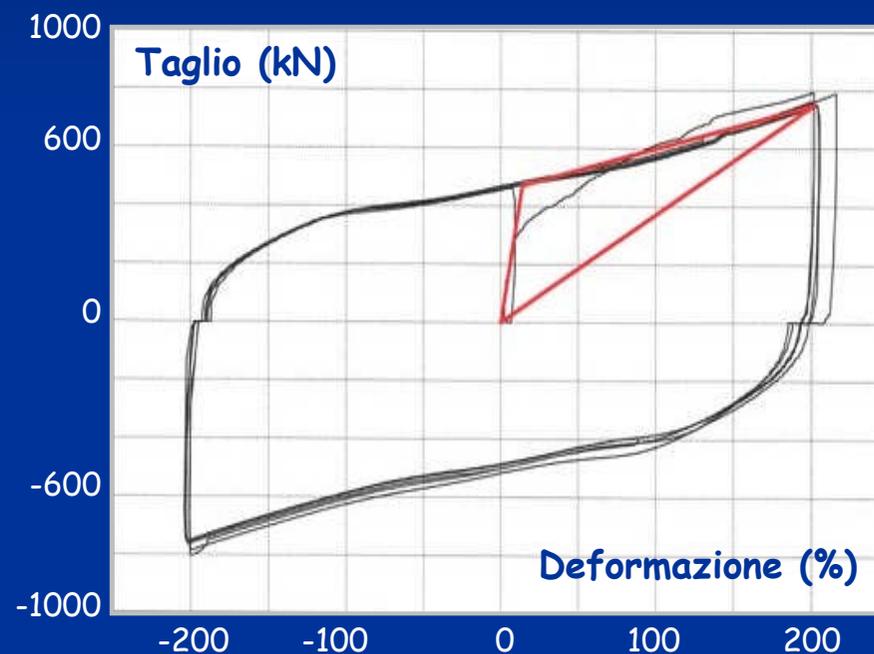


Diagramma taglio-deformazione  
di un dispositivo di isolamento in gomma con elemento centrale in piombo

# Isolatori elastomerici con piombo

**D 450 B 500 Z 370**

- ① Rigidezza laterale contr. piombo
- ② Carico snerv. piombo
- ③ Rigidezza orizzontale efficace
- ④ Smorzamento efficace

①      ②      ③      ④

t <sub>e</sub>	H	G=0.4 MPa (ξ=10%)									G=0.9 MPa (ξ=4%)								
		S <sub>max</sub>	V <sub>max</sub>	V <sub>sisma</sub>	K <sub>r</sub>	K <sub>piombo</sub>	F <sub>y</sub>	k <sub>eff</sub>	β <sub>eff</sub>	K <sub>V</sub>	S <sub>max</sub>	V <sub>max</sub>	V <sub>sisma</sub>	K <sub>r</sub>	K <sub>piombo</sub>	F <sub>y</sub>	k <sub>eff</sub>	β <sub>eff</sub>	K <sub>V</sub>
mm	mm	mm	kN	kN	kN/mm	kN/mm	kN	kN/mm	%	kN/mm	mm	kN	kN	kN/mm	kN/mm	kN	kN/mm	%	kN/mm
48	138	100	1450	1450	1.28	13.61	55	1.79	28.88	1840	100	2750	2750	2.65	47.86	187	4.42	29.88	2793
56	150	120	1650	1650	1.10	13.17	61	1.57	30.04	1559	120	3100	3100	2.227	41.02	187	3.74	29.47	2394
64	169	130	1800	1800	0.96	10.21	55	1.35	29.21	1380	130	3500	3500	2.00	33.54	175	3.27	29.18	2140
72	182	150	1900	1900	0.86	9.08	55	1.19	28.88	1227	150	3600	3350	1.77	31.91	187	2.95	29.88	1862
80	195	160	2000	1450	0.77	8.17	55	1.08	29.41	1104	160	3850	2950	1.60	26.83	175	2.64	29.49	1712
88	218	180	2050	1300	0.70	7.43	55	0.98	29.12	1004	180	3950	2550	1.46	24.39	175	2.38	29.08	1556
96	221	200	2000	1150	0.64	6.81	55	0.89	28.88	920	200	3800	2150	1.33	23.93	187	2.21	29.88	1396
104	234	210	1850	1000	0.59	6.28	55	0.83	29.28	849	210	3550	1950	1.23	20.64	175	2.02	29.27	1317
112	247	230	1700	850	0.55	5.83	55	0.77	29.07	789	230	3250	1700	1.15	19.17	175	1.86	29.02	1223
120	260	240	1550	800	0.51	5.45	55	0.72	29.41	736	240	3000	1500	1.07	17.89	175	1.76	29.40	1141
128	258	260	1450	700	0.48	5.11	55	0.67	29.21	690	260	2750	1300	1.00	16.77	175	1.64	29.18	1070

# Isolatori elastomerici

## Resistenza a trazione

In passato, gli sforzi di trazione nei dispositivi elastomerici non erano ammessi. Questa regola era dettata dalla scarsa conoscenza che si aveva delle proprietà dei dispositivi elastomerici.

Da prove sperimentali su dispositivi elastomerici con  $G$  pari a 1MPa si è notato che la deformazione di rottura a trazione dei dispositivi risulta essere circa pari al 150%. La rigidità a trazione risulta essere elastica fino ad una tensione di trazione pari a circa 40MPa e deformazione circa pari al 15%. Dopo il campo elastico la rigidità si riduce per cavitazione della gomma.

Oggi si ammette una tensione di trazione pari al minimo tra  $2G$  e 1MPa.

# Isolatori elastomerici

Prove di laboratorio



Prove di laboratorio  
di isolatore elastomerico

# Isolatori elastomerici

Prove di laboratorio



Prove di laboratorio  
di isolatore elastomerico

# Isolatori a scorrimento a superficie piana



Foto di isolatori a scorrimento a superficie piana

# Isolatori a scorrimento a superficie piana

Gli isolatori a scorrimento a superficie piana sono apparecchi di appoggio multidirezionali con superficie di scorrimento a basso attrito.

Comportamento

Rigido plastico

Non ricentrante

Coefficiente di attrito

circa 1-2%

Per questo motivo, il contributo delle forze attrittive alle forze orizzontali è quasi sempre trascurato.



Sono sempre utilizzati in combinazione con altri dispositivi antisismici (isolatori e/o dissipatori).

# Isolatori a scorrimento a superficie piana con dissipatori

*Gli isolatori a scorrimento a superficie piana con dissipatori costituiscono la combinazione di un apparecchio d'appoggio e di dissipatori isteretici in acciaio o viscosi.*

*Possono essere multidirezionali o monodirezionali e possono comprendere anche dispositivi di vincolo dinamico o dispositivi di vincolo fusibile meccanico.*

# Isolatori a scorrimento a superficie piana con dissipatori

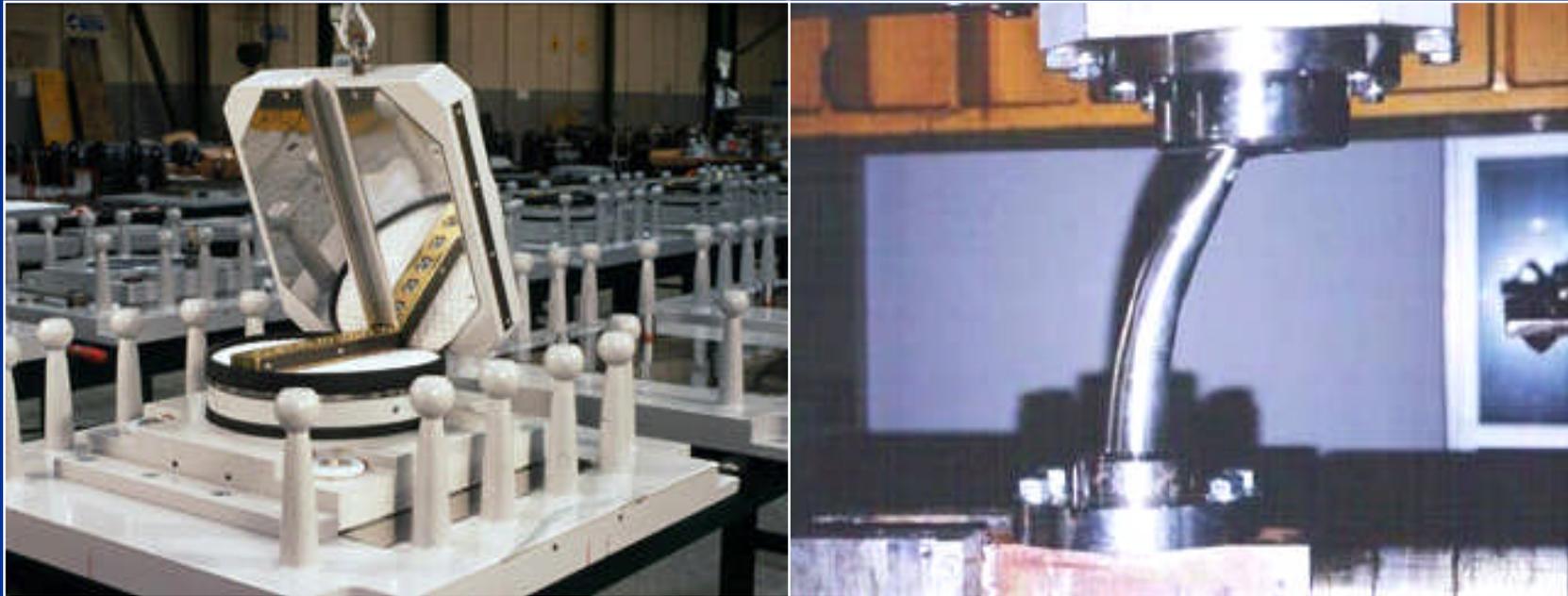


Foto di isolatori a scorrimento a superficie piana  
con pioli a comportamento isteretico

# Isolatori a scorrimento a superficie piana con dissipatori



Foto di isolatori a scorrimento a superficie piana  
con elementi a C a comportamento isteretico

# Isolatori a scorrimento a superficie piana con dissipatori



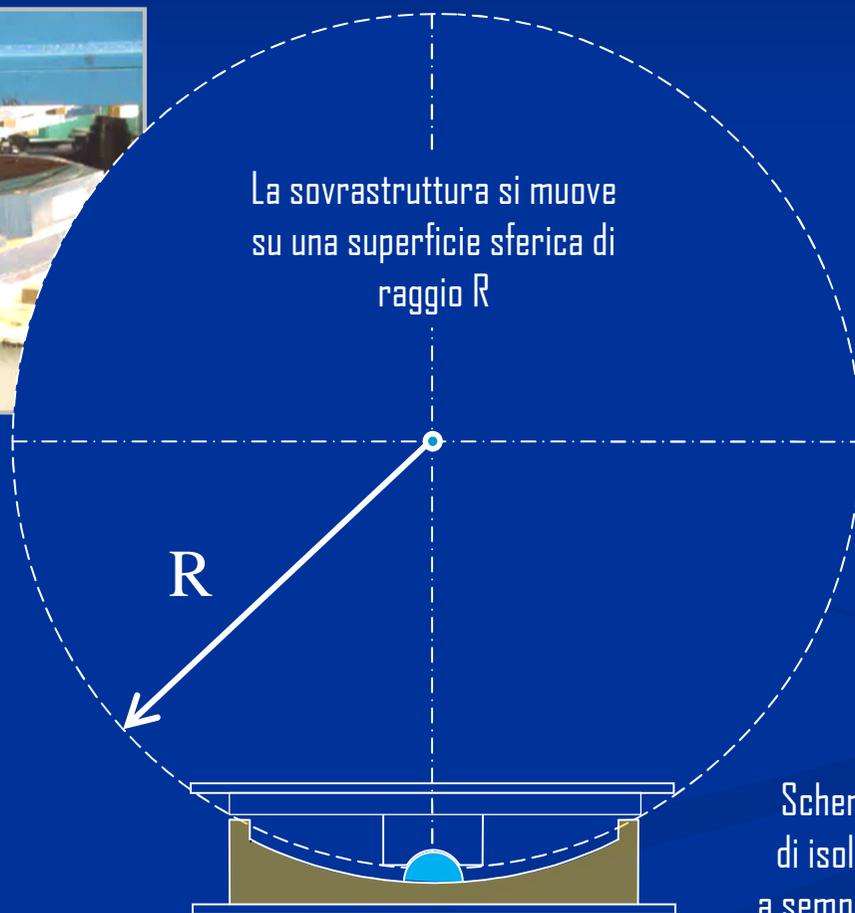
Foto di isolatori a scorrimento a superficie piana  
con dissipatori viscosi

# Isolatori a scorrimento a superficie curva semplice



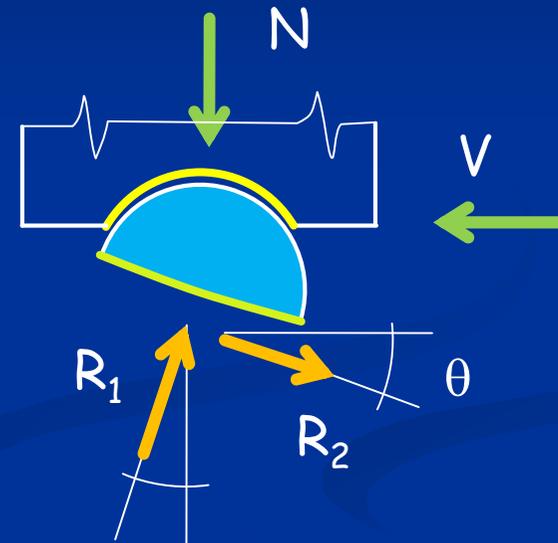
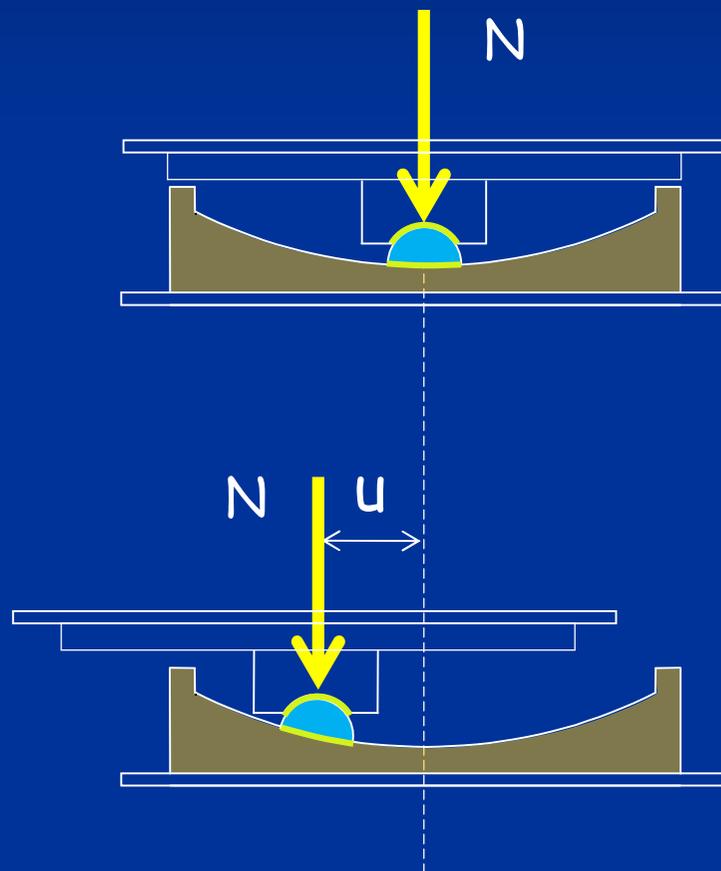
Foto di isolatori a scorrimento a superficie curva semplice

# Isolatori a scorrimento a superficie curva semplice



Schema di funzionamento  
di isolatore a scorrimento  
a semplice superficie sferica

# Isolatori a scorrimento a superficie curva semplice



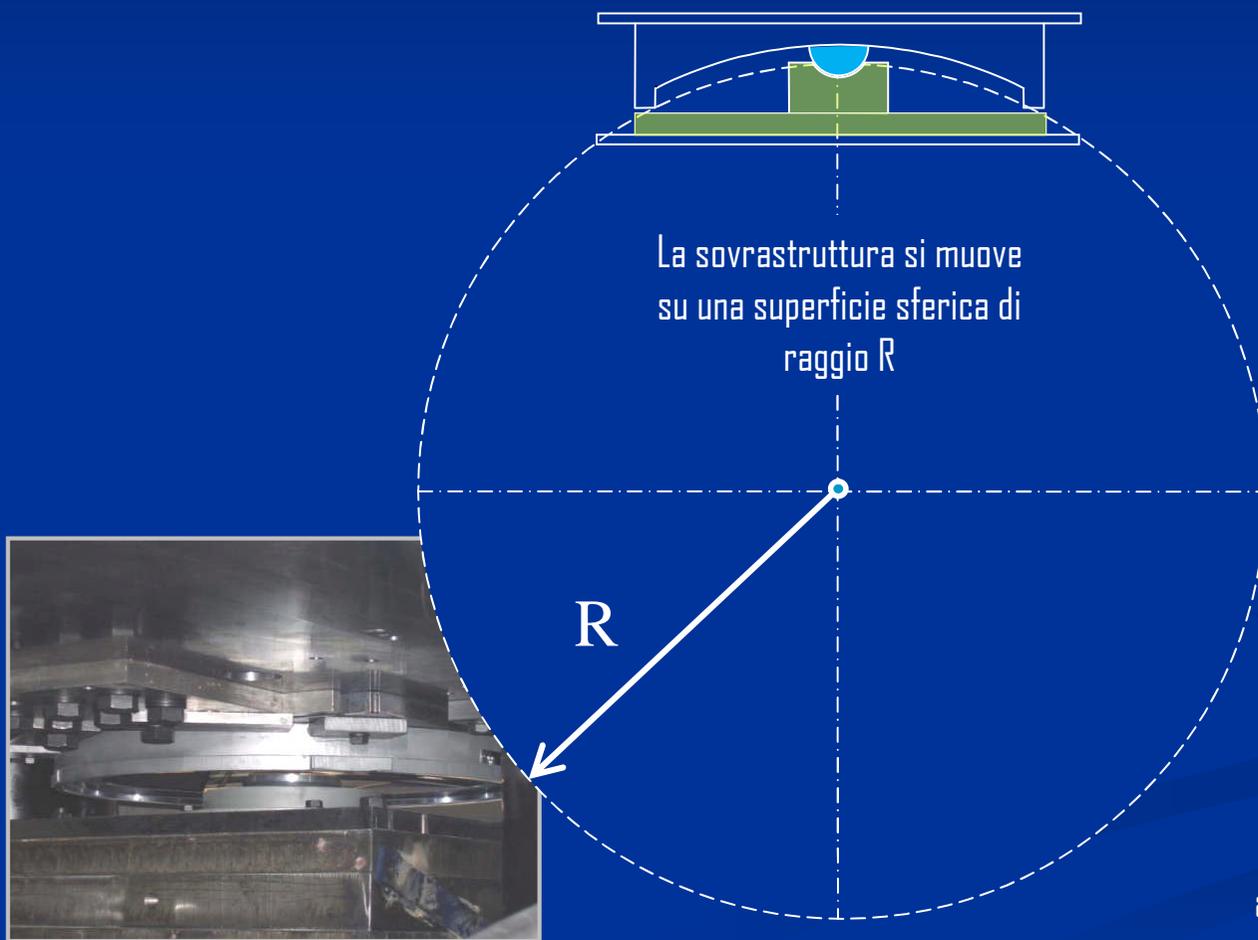
$$V = R_1 \operatorname{sen} \theta + R_2 \cos \theta$$

$$N = R_1 \cos \theta + R_2 \operatorname{sen} \theta$$



$$V = N \operatorname{tg} \theta + R_2 / \cos \theta$$

# Isolatori a scorrimento a superficie curva semplice



# Isolatori a scorrimento a superficie curva semplice

Gli isolatori a scorrimento a superficie curva semplice sono apparecchi di appoggio multidirezionali con superficie di scorrimento ad attrito.

## Comportamento

Rigido incurdente

Ricentrante

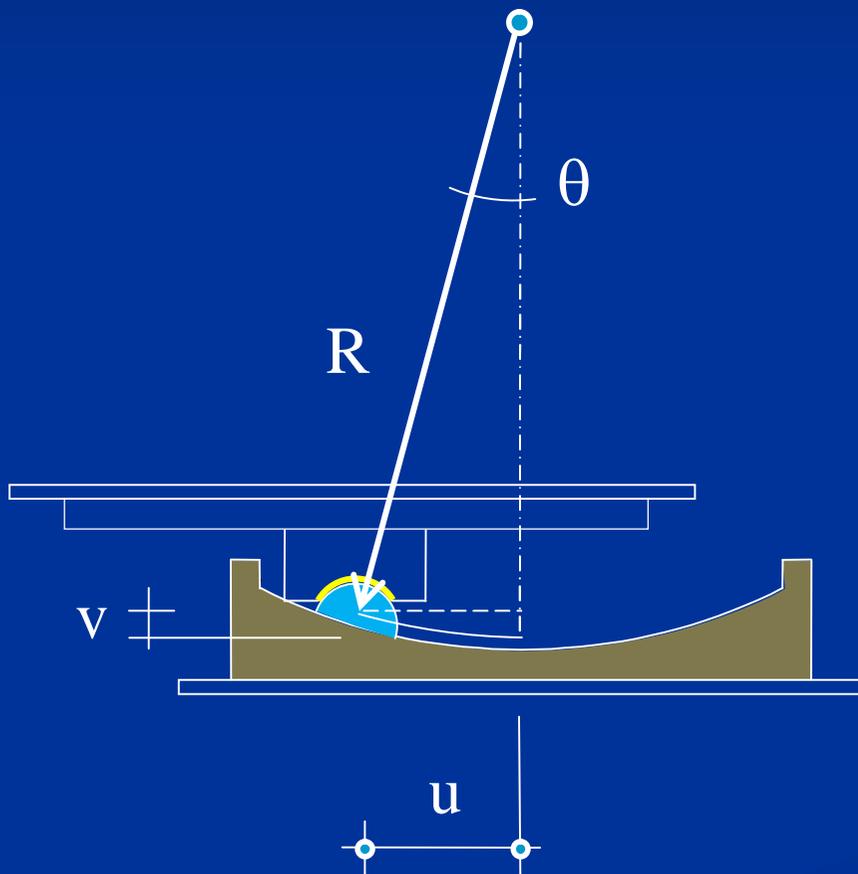
In particolare, la gravità determina la forza di ricentraggio

## Coefficiente di attrito

Variabile (2-10%)

Il contributo delle forze di attrito non puo' essere trascurato.

# Isolatori a scorrimento a superficie curva semplice



Per  $u < 0.2R$ ,  
si puo' confondere  
il seno dell'angolo  $\theta$  con l'angolo  $\theta$ ,  
ovvero:

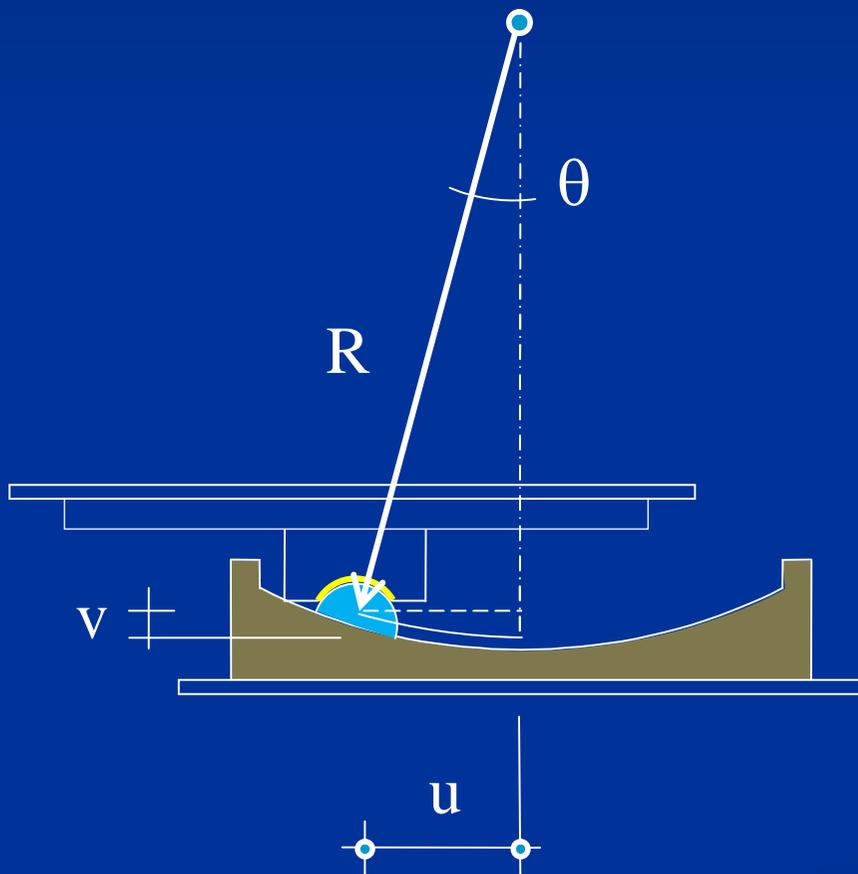
$$\text{sen } \theta = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \dots \cong \theta$$

Pertanto, si ha:

$$u \cong \theta R$$

(l'errore nella valutazione di  $u$   
e' inferiore al 2%)

# Isolatori a scorrimento a superficie curva semplice



Per poter valutare gli spostamenti verticali consideriamo la seguente approssimazione:

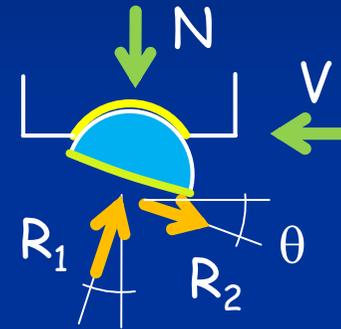
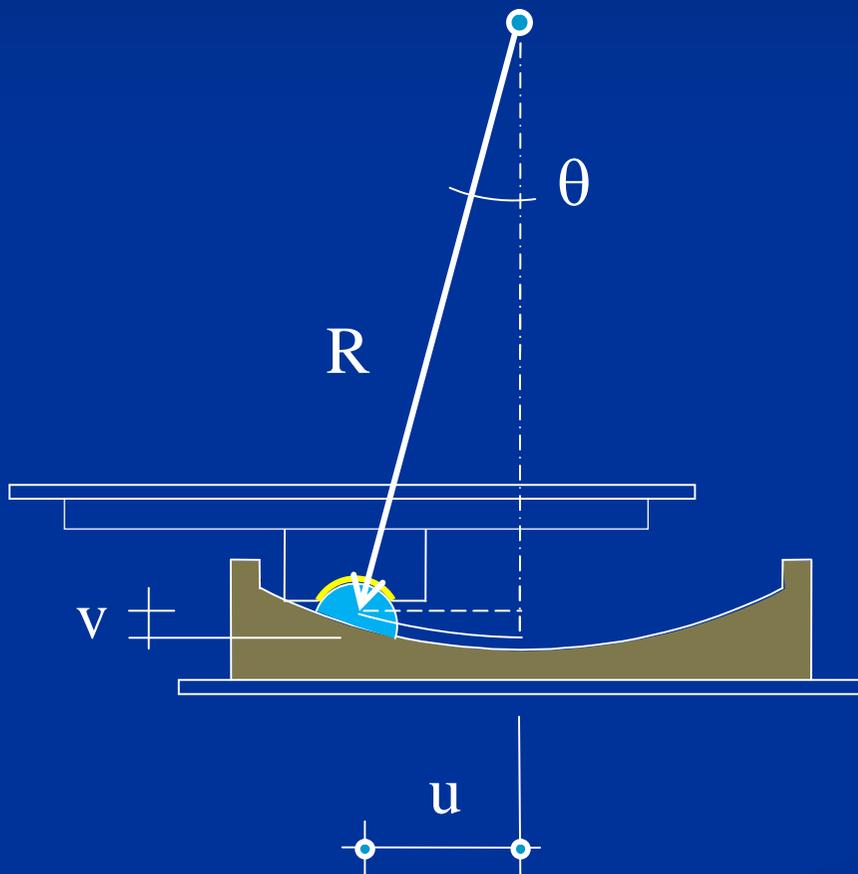
$$\cos \theta = 1 - \frac{\theta^2}{2!} + \dots \cong 1 - \frac{\theta^2}{2!}$$

Pertanto, si ha:

$$v \cong R \frac{\theta^2}{2} \cong \frac{u^2}{2R}$$

**Nota!** La frequenza verticale è il doppio di quella laterale.

# Isolatori a scorrimento a superficie curva semplice



Il taglio nell'isolatore

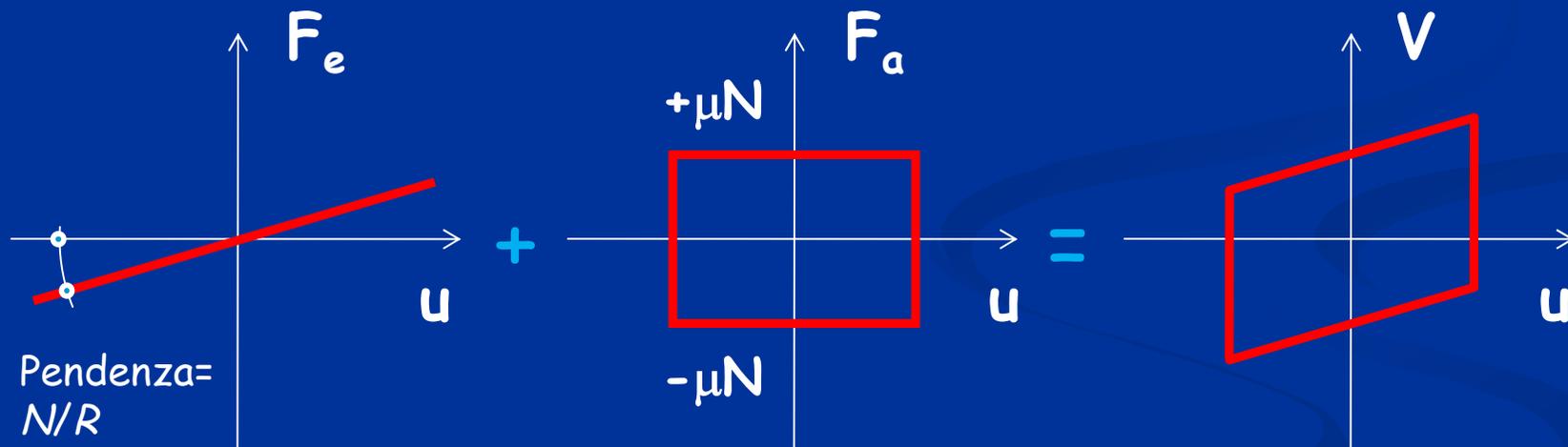
$$V = N \operatorname{tg} \theta + R_2 / \cos \theta$$

puo' essere valutato, pertanto,  
anche mediante la relazione:

$$V = \frac{N}{R} u + \mu N \operatorname{sgn}(\dot{u})$$

# Isolatori a scorrimento a superficie curva semplice

$$V = \frac{N}{R}u + \mu N \operatorname{sgn}(\dot{u}) = F_e + F_a$$



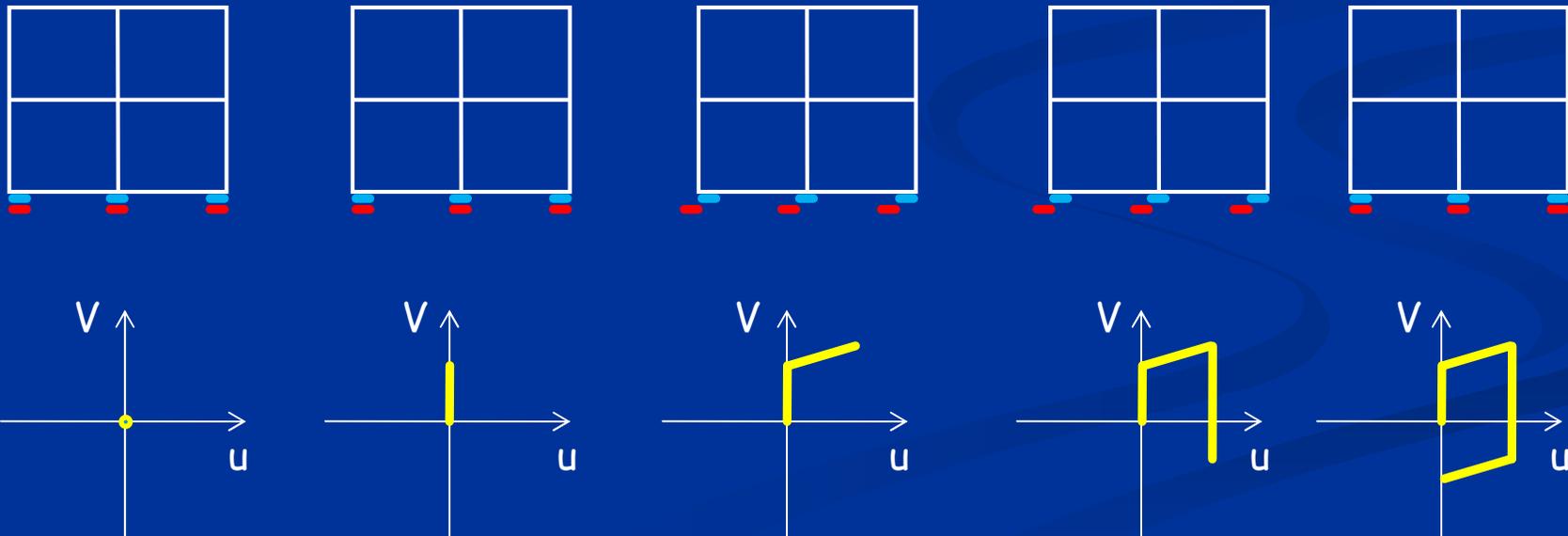
**Nota!** Il dispositivo non ricentra se  $F_e < F_a$  (ovvero  $u < \mu R$ )

Ciò può essere importante in caso di lunghi periodi  $T$  e dunque grandi raggi di curvatura  $R$

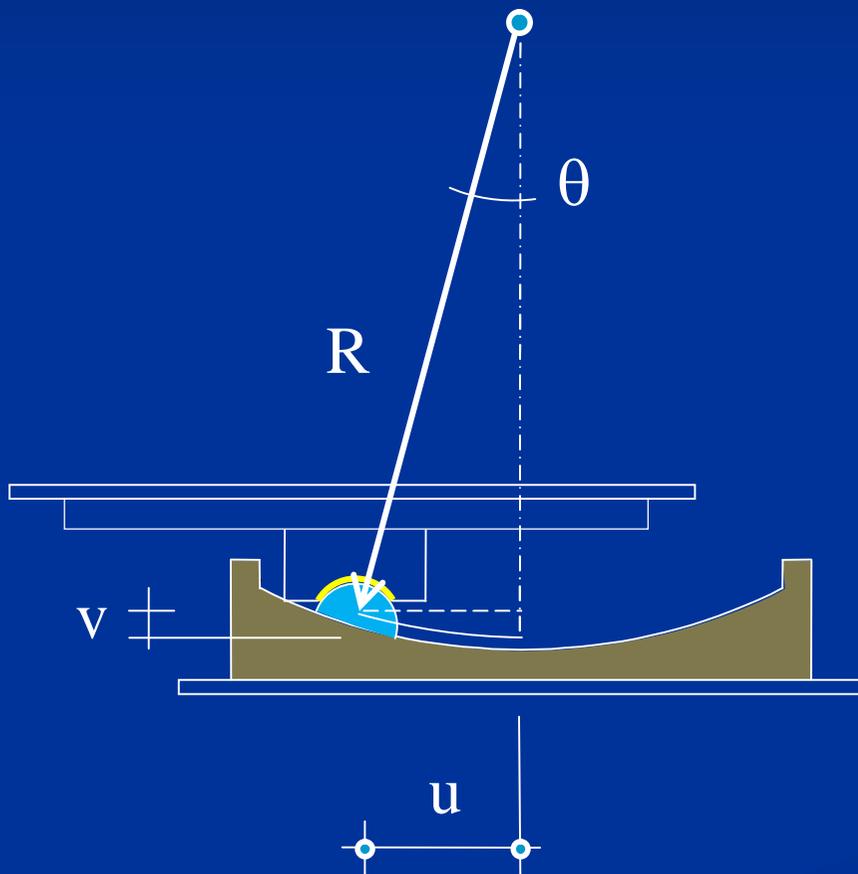
# Isolatori a scorrimento a superficie curva semplice

$$V = \frac{N}{R}u + \mu N \operatorname{sgn}(\dot{u}) = F_e + F_a$$

tempo



# Isolatori a scorrimento a superficie curva semplice



La rigidezza laterale  
in assenza di attrito vale

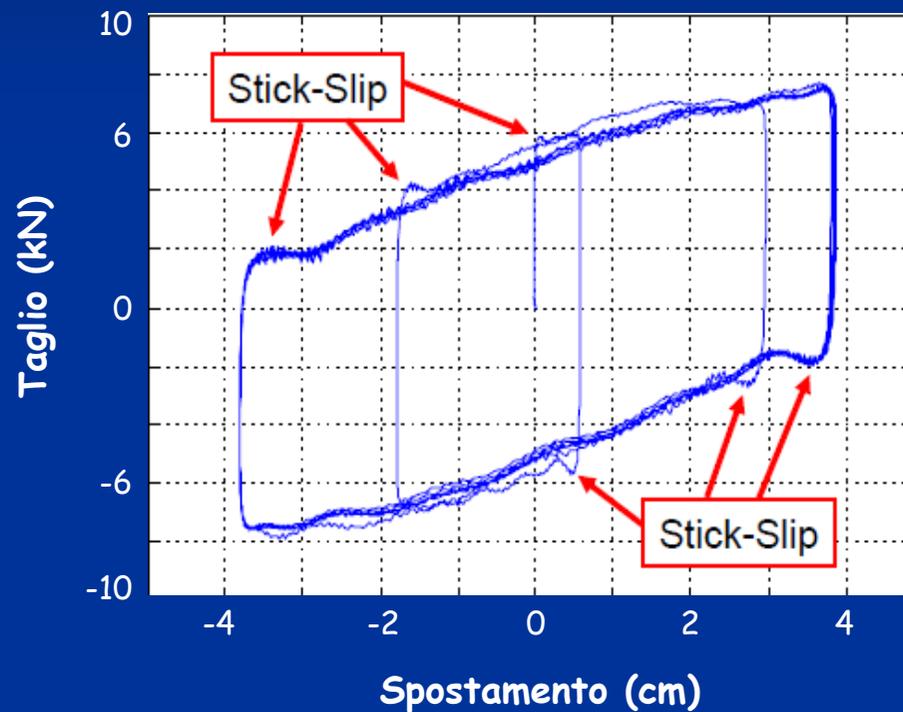
$$k = \frac{V}{u} = \frac{N}{R}$$

e il periodo

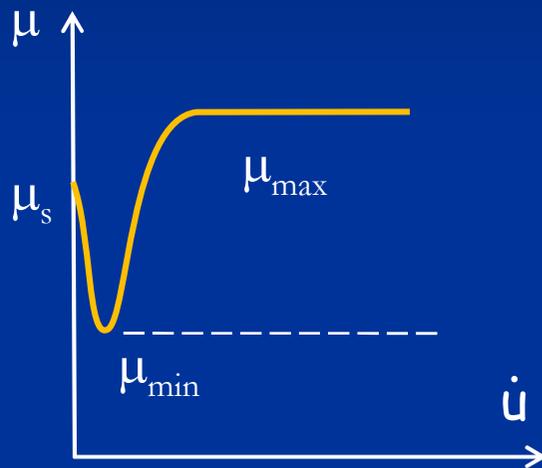
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{N_{TOT}}{gk_{TOT}}} = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}}$$

**Nota!** Il periodo e' indipendente dal peso della struttura e dipende unicamente dal raggio di curvatura del dispositivo di scorrimento

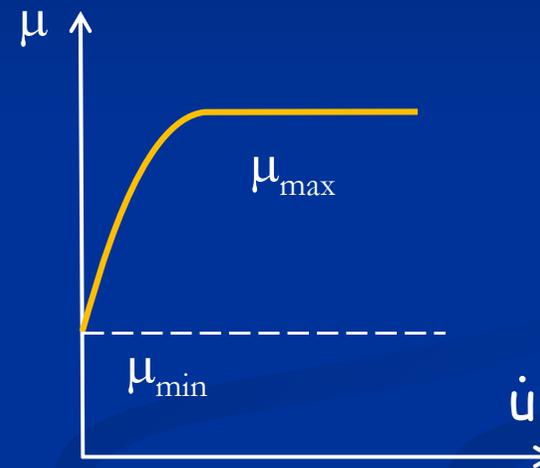
# Isolatori a scorrimento a superficie curva semplice



# Isolatori a scorrimento a superficie curva semplice



Dipendenza reale  
dalla velocità



Dipendenza approssimata  
dalla velocità

$$\mu = \mu_{\max} - (\mu_{\max} - \mu_{\min}) \exp(-a|\dot{u}|)$$

La resistenza dei dispositivi a scorrimento  
dipende dalla velocità di carico

# Isolatori a scorrimento a superficie curva semplice



Termografia  
di isolatore a scorrimento  
a semplice superficie sferica

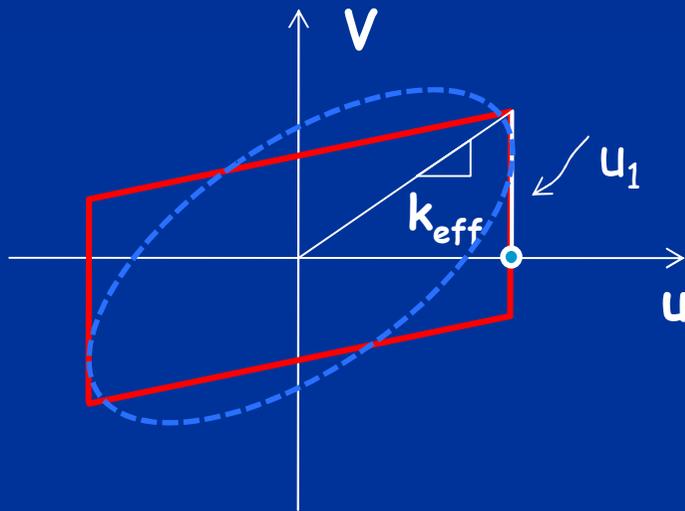
# Isolatori a scorrimento a superficie curva semplice

	$V_k$	$V_d$	A				B	$H_T$
			D	D	D	D		
			$\pm 100$	$\pm 200$	$\pm 300$	$\pm 400$		
	kN	kN	mm	mm	mm	mm	mm	
Legenda :	1000	1400	440	640	840	1040	240	130
$V_k$ = Carico verticale caratteristico	2000	2800	520	720	920	1120	320	140
$V_d$ = Carico verticale di progetto (USL)	3000	4200	580	780	980	1180	380	150
$D$ = Spostamento orizzontale longitudinale	4000	5600	630	830	1030	1230	430	160
A = Diametro piastra superiore	5000	7000	675	875	1075	1275	475	170
B = Diametro piastra inferiore	...	...	...	...	...	...	...	...
$H_T$ = Altezza totale	50000	70000	1590	1790	1990	2190	1390	379
	60000	84000	1715	1915	2115	2315	1515	401

Tratto dal catalogo ALGAPEND

# Isolatori a scorrimento a superficie curva semplice

## Modello linearizzato



Rigidezza secante efficace  
allo spostamento  $u_1$

$$k_{eff} = \frac{V}{u} = \frac{W}{R} + \frac{\mu W}{u}$$

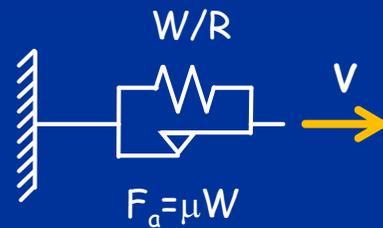
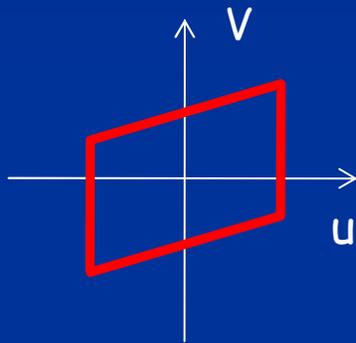
Smorzamento efficace  
allo spostamento  $u_1$

$$\xi_{eff} = \frac{E_d}{4\pi E_{so}} = \frac{4\mu Wu}{4\pi (0.5 k_{eff} u^2)} = \frac{2\mu R}{\pi(\mu R + u)}$$

Le proprietà efficaci sono dipendenti dallo spostamento considerato. Pertanto, un progetto che utilizzi le proprietà lineari efficaci è un progetto iterativo.

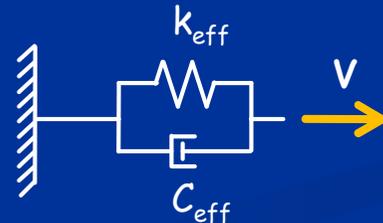
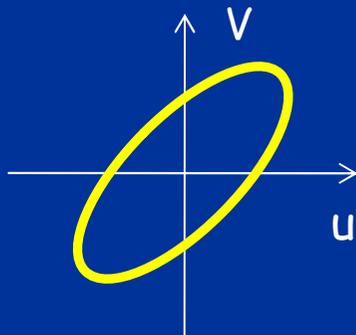
# Analisi lineare e nonlineare

- Analisi nonlineare



$$V(t) = \frac{N}{R}u(t) + \mu N \operatorname{sgn}[\dot{u}(t)]$$

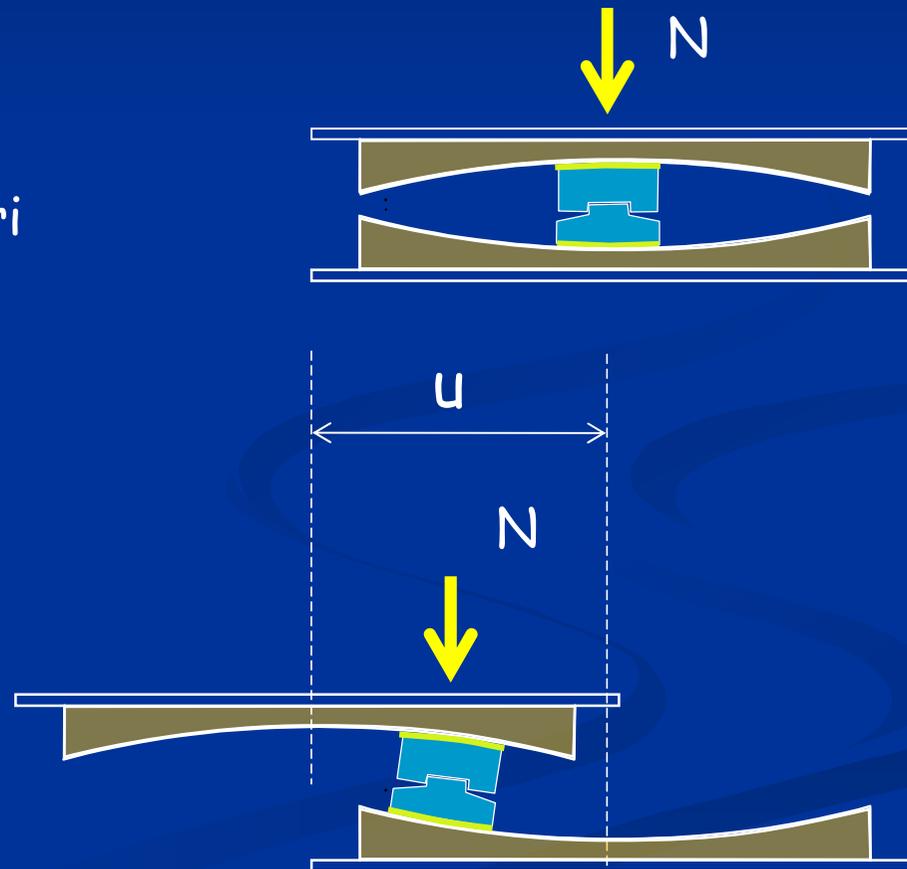
- Analisi lineare



$$V(t) = k_{eff}u(t) + c_{eff}\dot{u}(t)$$

# Isolatori a scorrimento a doppia superficie curva

Nel caso di spostamenti molto grandi è conveniente l'uso di isolatori a doppia superficie curva perché questi consentono di ridurre l'ingombro in pianta.



# Isolatori a scorrimento a superficie curva doppia



Foto di isolatori a scorrimento  
a doppia superficie sferica

# Isolatori a scorrimento a superficie curva doppia



Configurazione spostata di un isolatore a scorrimento  
a doppia superficie sferica

# Isolatori a scorrimento a superficie curva doppia

	$V_k$	$V_d$	A				B	$H_T$
			D	D	D	D		
			$\pm 300$	$\pm 400$	$\pm 500$	$\pm 600$		
	kN	kN	mm	mm	mm	mm	mm	
Legenda :	1000	1400	540	640	740	840	2340	200
$V_k$ = Carico verticale caratteristico	2000	2800	620	720	820	920	420	210
$V_d$ = Carico verticale di progetto (USL)	3000	4200	680	780	880	980	480	220
$D$ = Spostamento orizzontale longitudinale	4000	5600	730	830	930	1030	530	225
A = Diametro piastra superiore	5000	7000	775	875	975	1075	575	230
B = Diametro piastra inferiore	...	...	...	...	...	...	...	...
$H_T$ = Altezza totale	50000	70000	1690	1790	1890	1990	1490	565
	60000	84000	1815	1915	2015	2115	1615	610

Tratto dal catalogo ALGAPEND

# Dispositivi di isolamento

## Confronto

Tipo isolatore	Vantaggi	Svantaggi
Con gomma a basso smorzamento	<ul style="list-style-type: none"><li>• Basse accelerazioni</li><li>• Costo ridotto</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Spostamenti elevati</li><li>• Basso smorzamento</li><li>• Bassa resistenza a carico servizio</li><li>• Instabilità</li></ul>
Con gomma ad alto smorzamento	<ul style="list-style-type: none"><li>• Moderate accelerazioni di piano</li><li>• Resistenza al carico di servizio</li><li>• Smorzamento moderato-alto</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Rigidezza e smorzamento dipendente dalle deformazioni</li><li>• Analisi complessa</li><li>• Limitata scelta di rigidezza e smorzamento</li><li>• Instabilità</li></ul>
Con gomma e elemento in piombo	<ul style="list-style-type: none"><li>• Moderate accelerazioni di piano</li><li>• Ampia scelta per rigidezza e smorzamento</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Instabilità</li></ul>

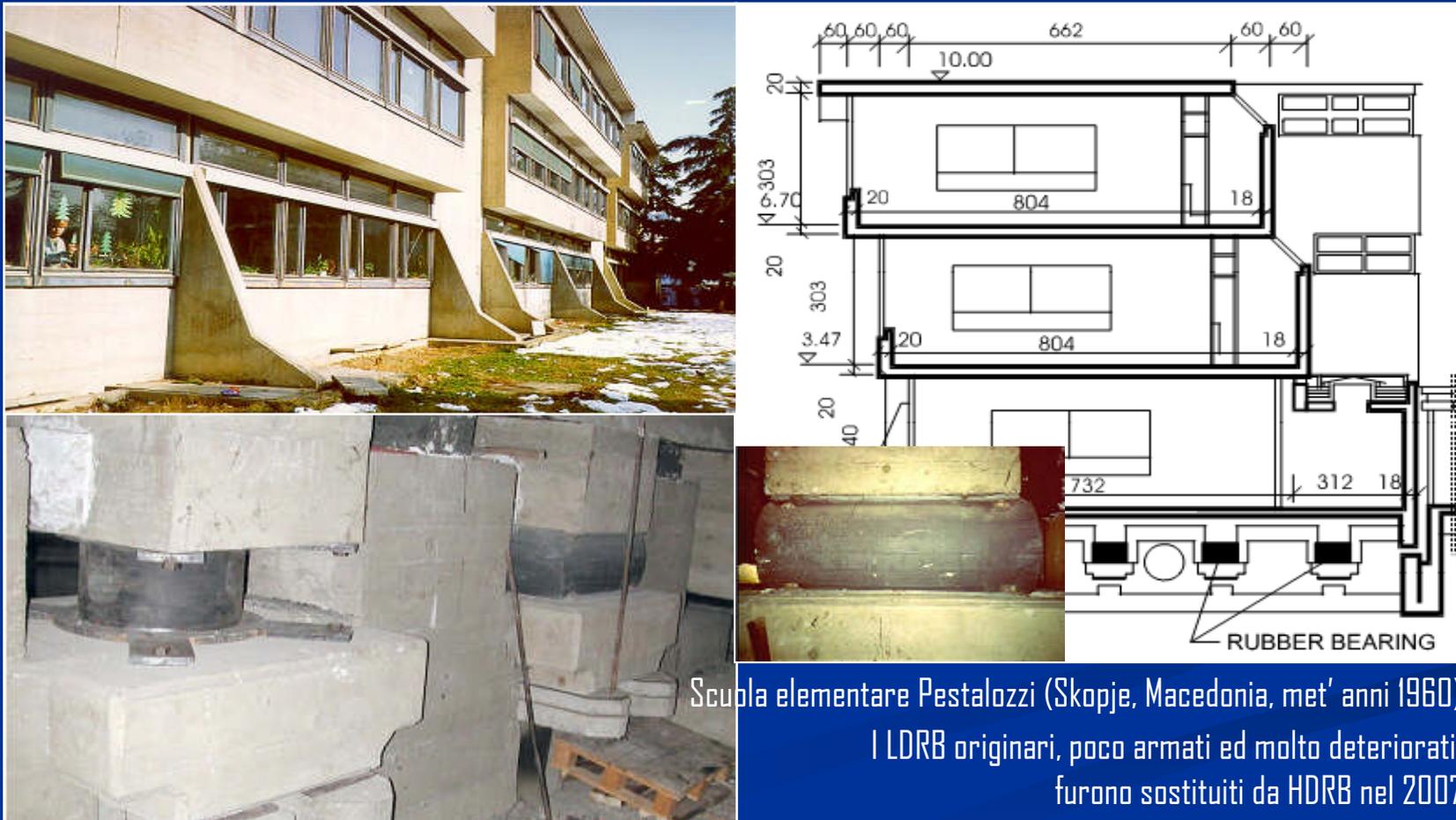
# Dispositivi di isolamento

## Confronto

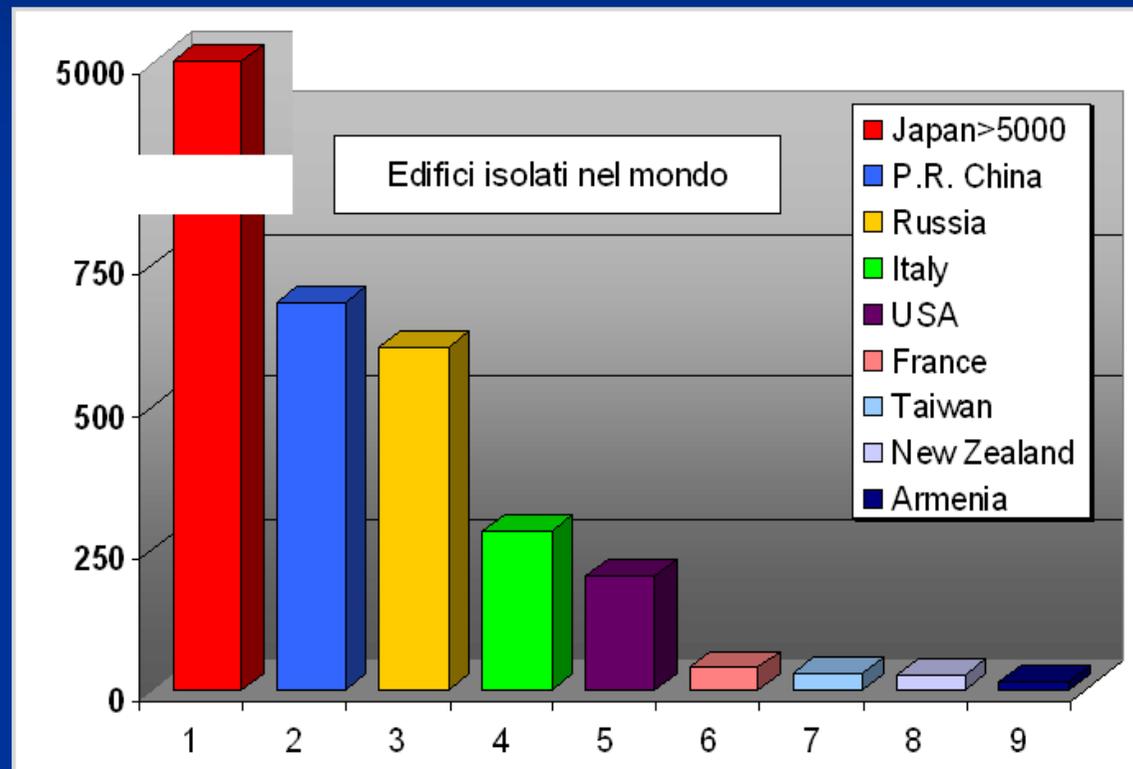
Tipo isolatore	Vantaggi	Svantaggi
A scorrimento a superficie piana	<ul style="list-style-type: none"><li>• Resistenza al carico di servizio</li><li>• Elevato smorzamento</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Elevate accelerazioni di piano</li><li>• Proprietà funzione della pressione e velocità</li><li>• Assenza di forze di ricentraggio</li></ul>
A scorrimento a superficie curva	<ul style="list-style-type: none"><li>• Resistenza a carico di servizio</li><li>• Smorzamento moderato-alto</li><li>• Riduzione della risposta torsionale</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Elevate accelerazioni di piano</li><li>• Proprietà funzione della pressione e velocità</li></ul>

# Applicazione moderna dell'isolamento

## Prime applicazioni

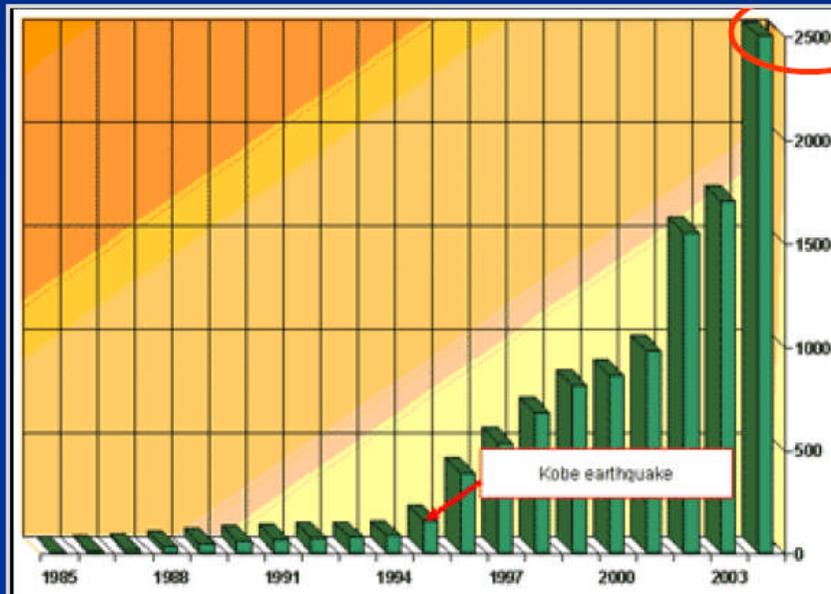


# Applicazione moderna dell'isolamento



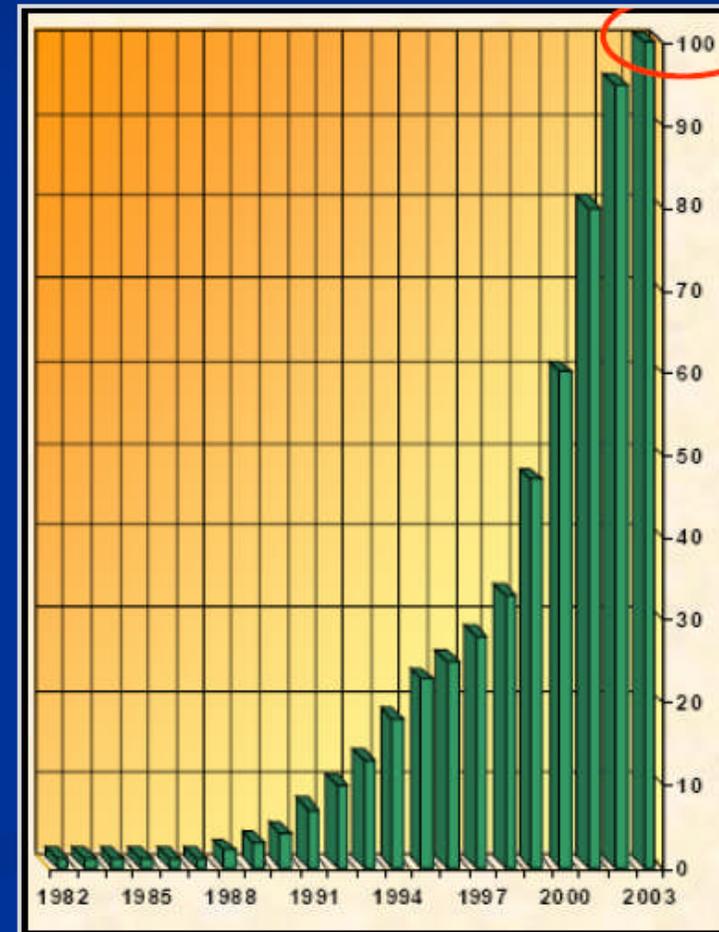
Edifici isolati nel mondo

# Applicazione moderna dell'isolamento

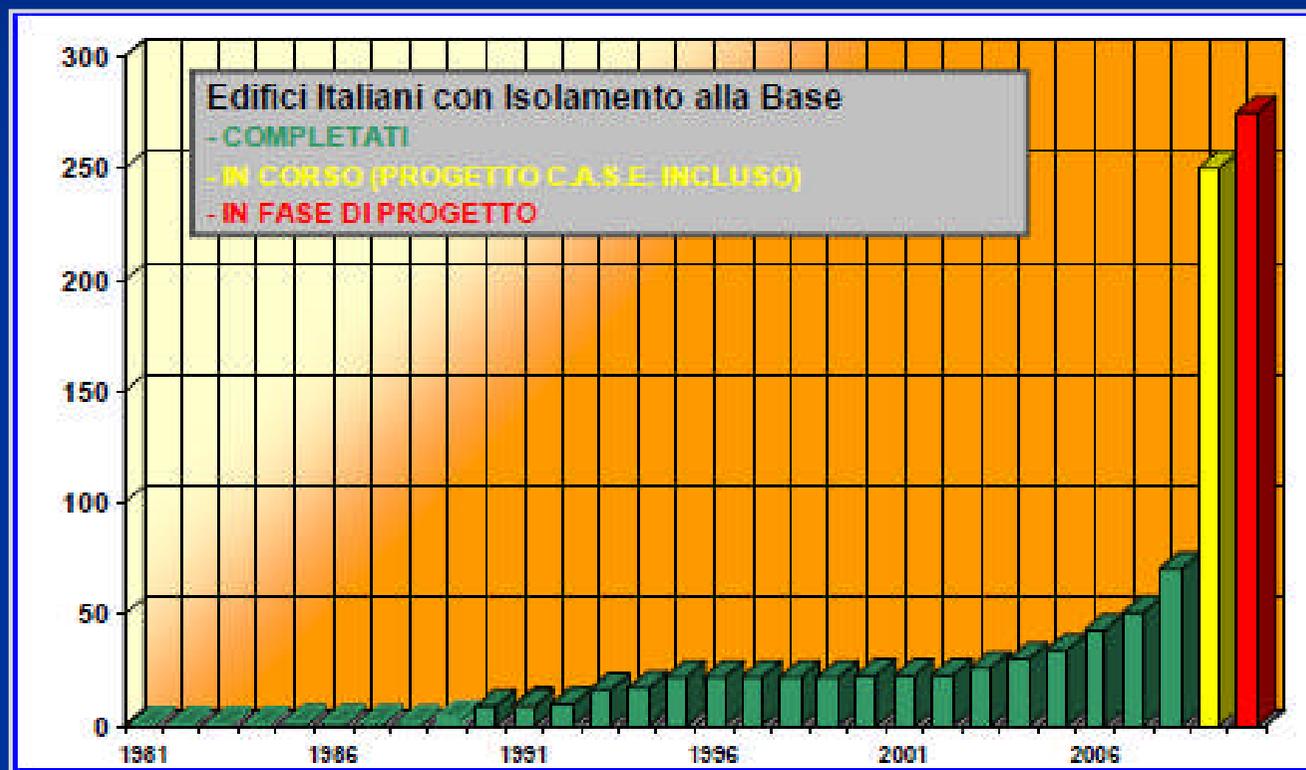


Edifici isolati in Giappone

Edifici isolati negli USA



# Applicazione moderna dell'isolamento



Edifici isolati in Italia

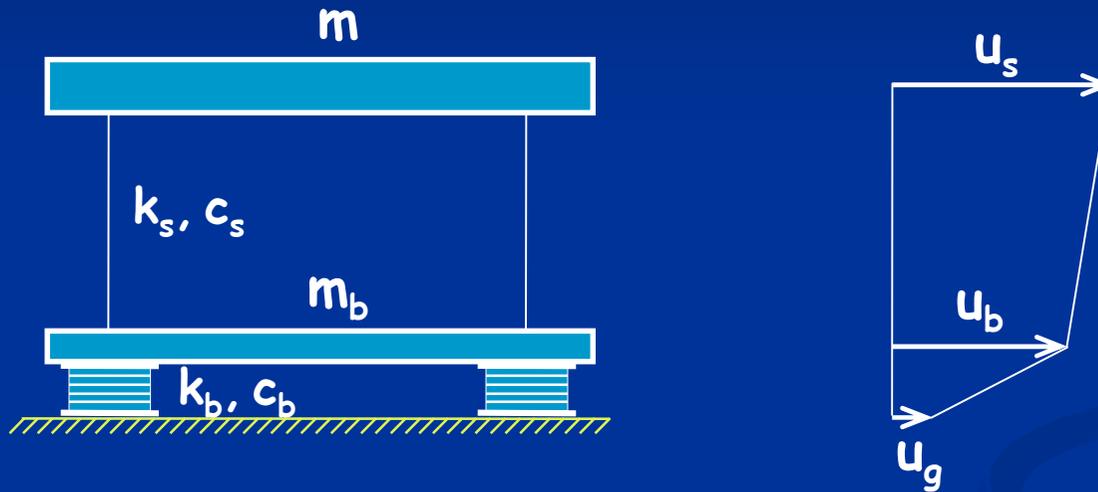
# Applicazione moderna dell'isolamento

## A quali strutture applicare l'isolamento alla base ?

- Strutture ad alto rischio (centrali nucleari, impianti chimici ecc)
- Infrastrutture (ponti e viadotti)
- Edifici pubblici (ospedali, centri di emergenza, scuole, ecc.)
- Strutture adibite alla difesa
- Strutture che contengono componenti di elevato valore
- Monumenti artistici e storici

Quali sono i fondamenti teorici  
dell'isolamento alla base ?

# Teoria lineare dell'isolamento alla base

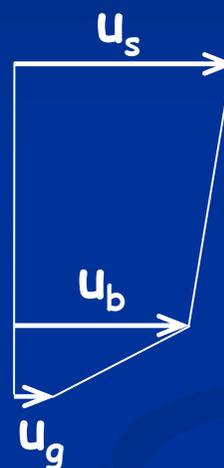
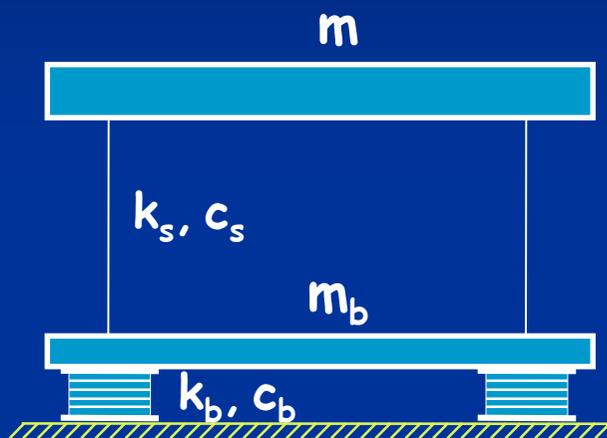


Equazioni assolute del moto

$$m\ddot{u}_s = -c_s(\dot{u}_s - \dot{u}_b) - k_s(u_s - u_b)$$

$$m\ddot{u}_s + m_b\ddot{u}_b = -c_c(\dot{u}_b - \dot{u}_g) - k_s(u_b - u_g)$$

# Teoria lineare dell'isolamento alla base



Spostamenti  
relativi

$$v_s = u_s - u_b$$

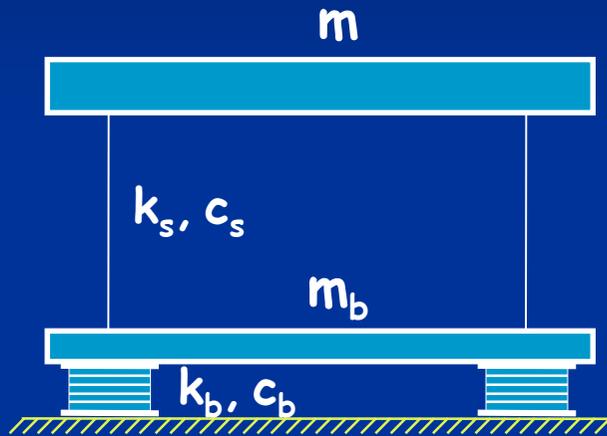
$$v_b = u_b - u_g$$

Equazioni relative del moto

$$m\ddot{v}_b + m\ddot{v}_s + c_s\dot{v}_s + k_s v_s = -m\ddot{u}_g$$

$$(m + m_b)\ddot{v}_b + m\ddot{v}_s + c_b\dot{v}_b + k_b v_b = -(m + m_b)\ddot{u}_g$$

# Teoria lineare dell'isolamento alla base



Posto:

$$\gamma = \frac{m}{m + m_b} = \frac{m}{M}$$

$$\omega_b^2 = \frac{k_b}{m + m_b} \quad \omega_s^2 = \frac{k_s}{m}$$

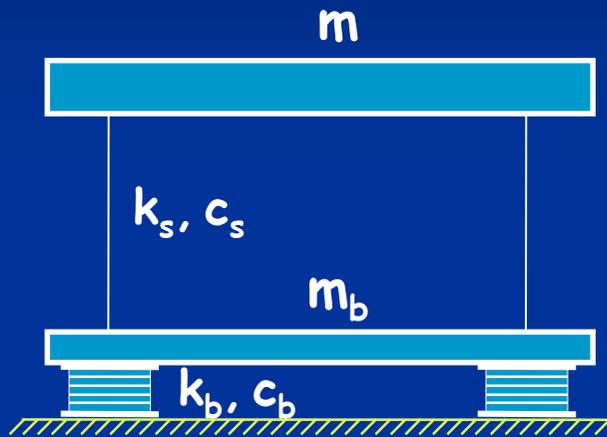
$$2\xi_b \omega_b = \frac{c_b}{m + m_b} \quad 2\xi_s \omega_s = \frac{c_s}{m}$$

Equazioni relative del moto

$$\gamma \ddot{v}_s + \ddot{v}_b + 2\xi_b \omega_b \dot{v}_b + \omega_b^2 v_b = -\ddot{u}_g$$

$$\ddot{v}_s + \ddot{v}_b + 2\xi_s \omega_s \dot{v}_s + \omega_s^2 v_s = -\ddot{u}_g$$

# Teoria lineare dell'isolamento alla base



Equazione del moto in forma matriciale  
(coordinate nodali)

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{v}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{K} \mathbf{v} = -\mathbf{M} \mathbf{I} \ddot{u}_g$$

dove:  $\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$   $\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_b \\ v_s \end{bmatrix}$

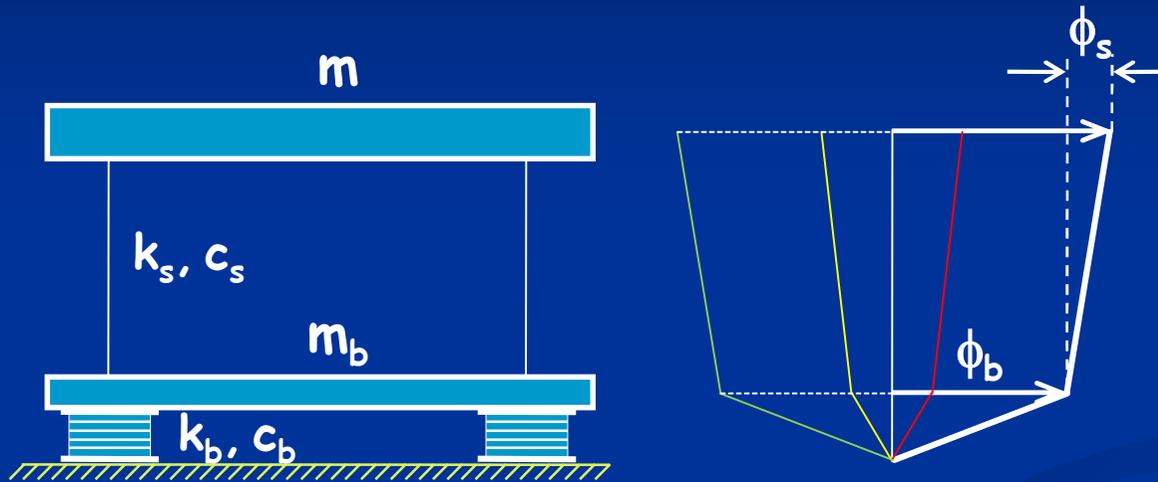
$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M & m \\ m & m \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix}$$

# Isolamento alla base

## Modi di vibrazione



Posto

$$\mathbf{v} = \boldsymbol{\phi} \text{sen} \omega t$$

derivando e sostituendo nell'eq. del moto  $\mathbf{M} \ddot{\mathbf{v}} + \mathbf{K} \mathbf{v} = \mathbf{0}$

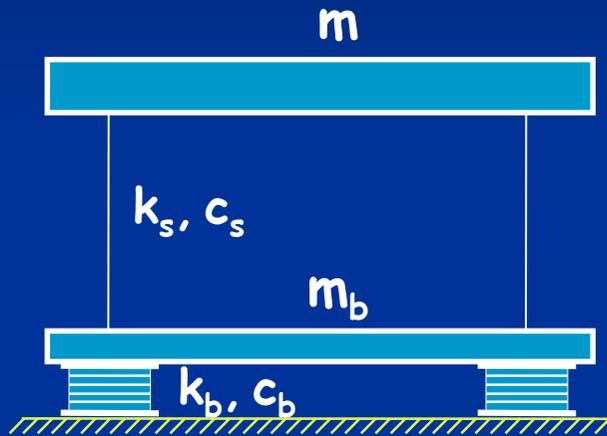
si ha:  $(-\omega^2 \mathbf{M} + \mathbf{K}) \boldsymbol{\phi} = \mathbf{0}$

Imponendo che il determinante della matrice in parentesi sia nullo si ottiene l'equazione caratteristica delle pulsazioni

$$(1 - \gamma) \omega^4 + (\omega_s^2 + \omega_b^2) \omega^2 + \omega_s^2 \omega_b^2 = 0$$

# Isolamento alla base

## Modi di vibrazione



Se si ricercano le radici dell'equazione caratteristica:

$$(1-\gamma)\omega^4 + (\omega_s^2 + \omega_b^2)\omega^2 + \omega_s^2\omega_b^2 = 0$$

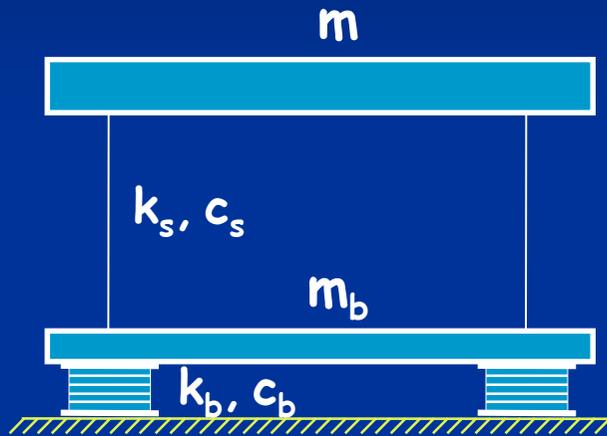
si ottengono

le pulsazioni naturali di vibrazione del sistema isolato

$$\omega_{1,2}^2 = \frac{1}{2(1-\gamma)} \left\{ \omega_b^2 + \omega_s^2 \pm \left[ (\omega_b^2 - \omega_s^2)^2 + 4\gamma\omega_b^2\omega_s^2 \right]^{1/2} \right\}$$

# Isolamento alla base

## Modi di vibrazione



Se si ricercano le radici dell'equazione caratteristica:

$$(1-\gamma)\omega^4 + (\omega_s^2 + \omega_b^2)\omega^2 + \omega_s^2\omega_b^2 = 0$$

e si effettuano alcune approssimazioni si ottengono le pulsazioni naturali di vibrazione approssimate

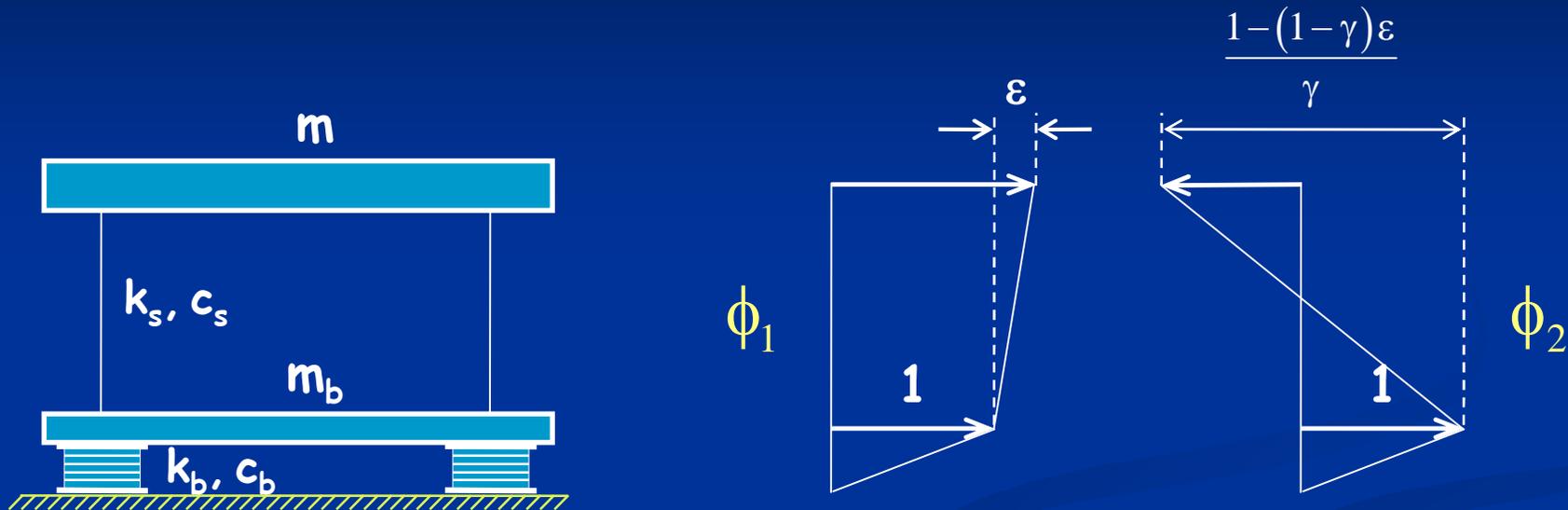
$$\omega_1^2 = \omega_b^2 (1 - \gamma\varepsilon)$$

$$\omega_2^2 = \frac{\omega_s^2}{1-\gamma} (1 + \gamma\varepsilon)$$

dove:  $\varepsilon = \frac{\omega_b^2}{\omega_s^2} \ll 1$

# Isolamento alla base

## Modi di vibrazione

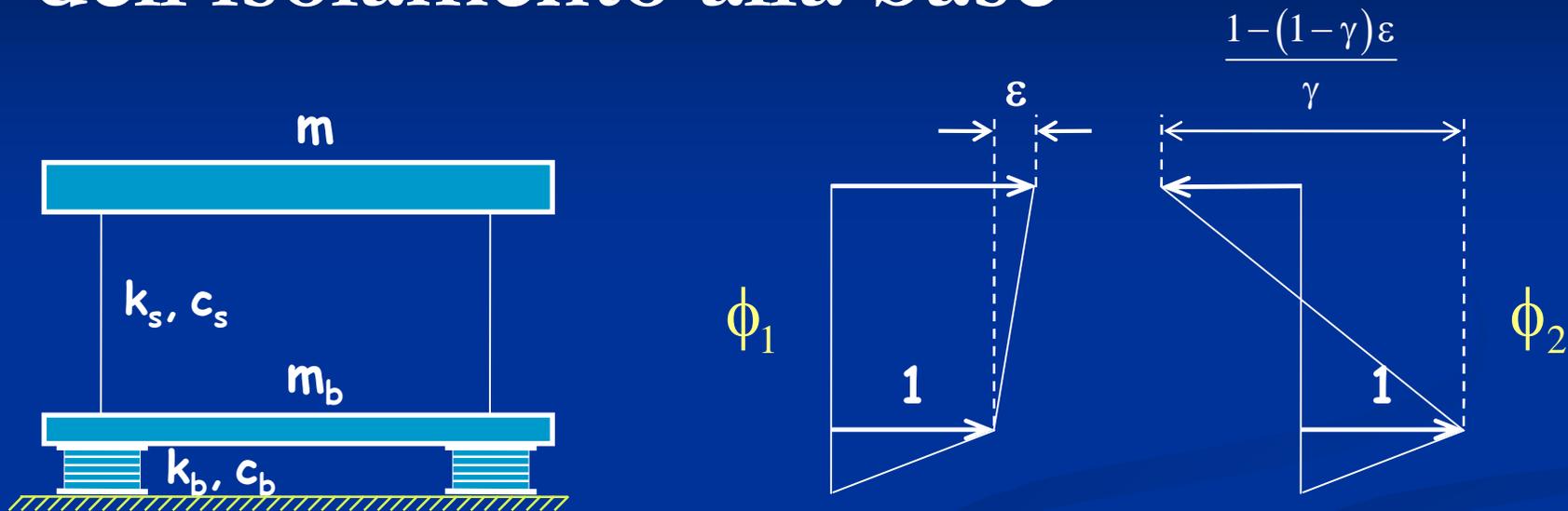


Con riferimento ad ogni pulsazione naturale di vibrazione si ottengono dall'equazione  $(-\omega^2 \mathbf{M} + \mathbf{K})\phi = \mathbf{0}$  le forme naturali di vibrazione

$$\phi_1^T = (1, \varepsilon) \quad \text{dove:} \quad \varepsilon = \frac{\omega_b^2}{\omega_s^2} \ll 1$$

$$\phi_2^T = \left\{ 1, -\frac{1}{\gamma} [1 - (1-\gamma)\varepsilon] \right\}$$

# Teoria lineare dell'isolamento alla base



Operiamo un cambiamento di base, ovvero esprimiamo gli spostamenti dei due livelli non in termini di variabili nodali ma modali, ovvero come

$$\mathbf{v} = q_1 \phi_1 + q_2 \phi_2 = \mathbf{q} \Phi$$

dove:  $\mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix}$   $\Phi = \begin{bmatrix} \phi_{1,b} & \phi_{2,b} \\ \phi_{1,s} & \phi_{2,s} \end{bmatrix}$

# Teoria lineare dell'isolamento alla base

Sostituendo la relazione  $\mathbf{v} = \mathbf{q} \Phi$ ,  
e le sue derivate,  
nell'equazione del moto

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{v}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{K} \mathbf{v} = -\mathbf{M} \mathbf{I} \ddot{u}_g$$

e premoltiplicando per  $\Phi^T$   
si ottiene

$$\Phi^T \mathbf{M} \Phi \ddot{\mathbf{q}} + \Phi^T \mathbf{C} \Phi \dot{\mathbf{q}} + \Phi^T \mathbf{K} \Phi \mathbf{q} = -\Phi^T \mathbf{M} \mathbf{I} \ddot{u}_g$$

ovvero

$$\ddot{\mathbf{q}} + \frac{\Phi^T \mathbf{C} \Phi}{\Phi^T \mathbf{M} \Phi} \dot{\mathbf{q}} + \frac{\Phi^T \mathbf{K} \Phi}{\Phi^T \mathbf{M} \Phi} \mathbf{q} = -\frac{\Phi^T \mathbf{M} \mathbf{I}}{\Phi^T \mathbf{M} \Phi} \ddot{u}_g$$

# Teoria lineare dell'isolamento alla base

La singola equazione del sistema

$$\ddot{\mathbf{q}} + \frac{\Phi^T \mathbf{C} \Phi}{\Phi^T \mathbf{M} \Phi} \dot{\mathbf{q}} + \frac{\Phi^T \mathbf{K} \Phi}{\Phi^T \mathbf{M} \Phi} \mathbf{q} = - \frac{\Phi^T \mathbf{M} \mathbf{I}}{\Phi^T \mathbf{M} \Phi} \ddot{u}_g$$

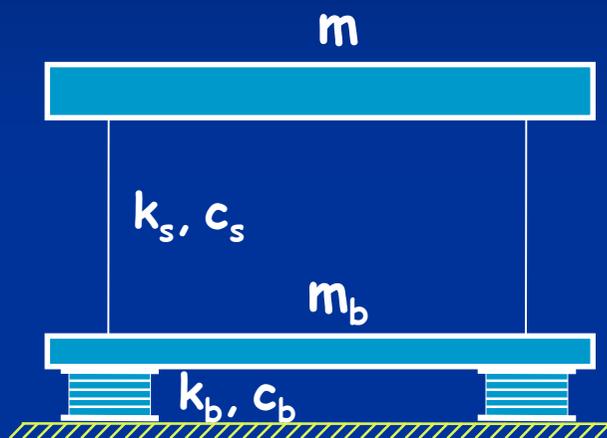
presenta la seguente forma

$$\ddot{q}_j + 2\xi_j \omega_j \dot{q}_j + \omega_j^2 q_j = -\Gamma_j \ddot{u}_g$$

dove:

$$2\xi_j \omega_j = \frac{\phi_j^T \mathbf{C} \phi_j}{\phi_j^T \mathbf{M} \phi_j}, \quad \omega_j^2 = \frac{\phi_j^T \mathbf{K} \phi_j}{\phi_j^T \mathbf{M} \phi_j}, \quad \Gamma_j = \frac{\phi_j^T \mathbf{M} \mathbf{I}}{\phi_j^T \mathbf{M} \phi_j}$$

# Teoria lineare dell'isolamento alla base



Equazioni del moto  
(coordinate modali)

$$\ddot{q}_1 + 2\xi_1\omega_1\dot{q}_1 + \omega_1^2 q_1 = -\Gamma_1 \ddot{u}_g$$

$$\ddot{q}_2 + 2\xi_2\omega_2\dot{q}_2 + \omega_2^2 q_2 = -\Gamma_2 \ddot{u}_g$$

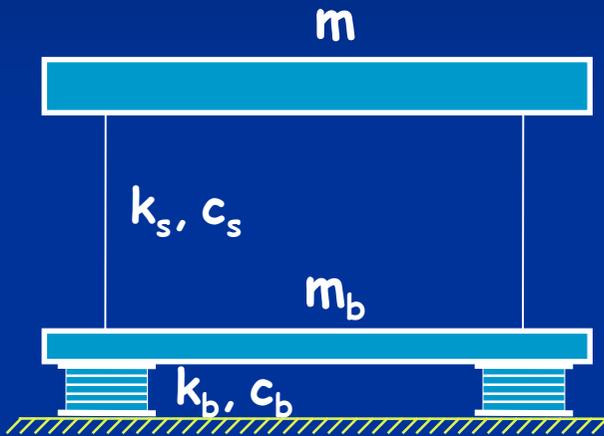
Coeff. di partecipazione modale

$$\Gamma_j = \frac{\phi_j^T \mathbf{M} \mathbf{I}}{\phi_j^T \mathbf{M} \phi_j}$$

$$\Gamma_1 = 1 - \gamma\varepsilon$$

$$\Gamma_2 = \gamma\varepsilon$$

# Teoria lineare dell'isolamento alla base



Equazioni del moto  
(coordinate modali)

$$\ddot{q}_1 + 2\xi_1\omega_1\dot{q}_1 + \omega_1^2 q_1 = -\Gamma_1 \ddot{u}_g$$

$$\ddot{q}_2 + 2\xi_2\omega_2\dot{q}_2 + \omega_2^2 q_2 = -\Gamma_2 \ddot{u}_g$$

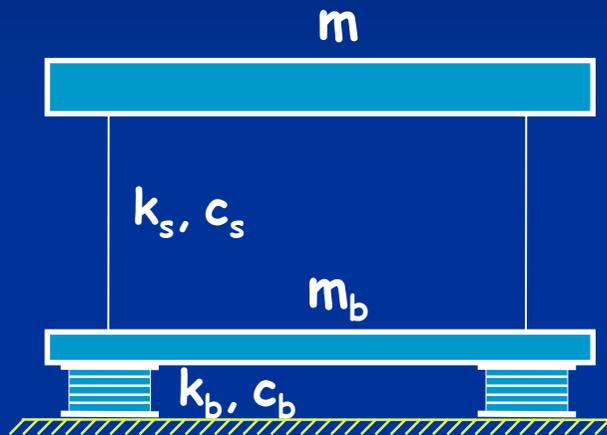
Massa modale

$$M_j^{\text{eff}} = \frac{(\phi_j^T \mathbf{M} \mathbf{I})^2}{\phi_j^T \mathbf{M} \phi_j}$$

$$M_1^{\text{eff}} = M [1 - \gamma(1 - \gamma)\varepsilon^2]$$

$$M_2^{\text{eff}} = M [\gamma(1 - \gamma)\varepsilon^2]$$

# Teoria lineare dell'isolamento alla base



Equazioni del moto  
(coordinate modali)

$$\ddot{q}_1 + 2\xi_1\omega_1 \dot{q}_1 + \omega_1^2 q_1 = -\Gamma_1 \ddot{u}_g$$

$$\ddot{q}_2 + 2\xi_2\omega_2 \dot{q}_2 + \omega_2^2 q_2 = -\Gamma_2 \ddot{u}_g$$

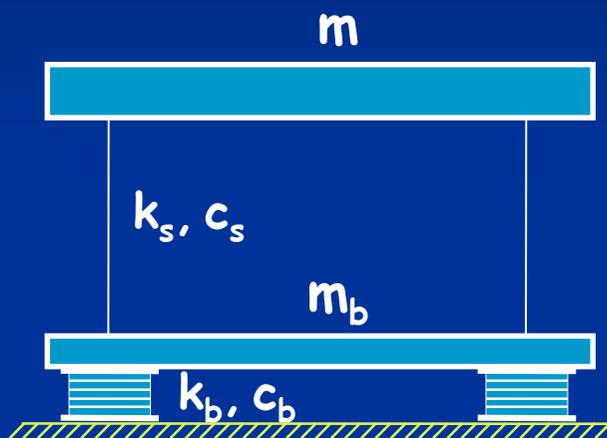
Termine

$$2\xi_j\omega_j = \frac{\phi_j^T C \phi_j}{\phi_j^T M \phi_j}$$

$$2\xi_1\omega_1 = 2\xi_b\omega_b (1 - 2\gamma\varepsilon)$$

$$2\xi_2\omega_2 = \frac{1}{1 - \gamma} (2\omega_s\xi_s + 2\gamma\omega_b\xi_b)$$

# Teoria lineare dell'isolamento alla base



Equazioni del moto  
(coordinate modali)

$$\ddot{q}_1 + 2\xi_1\omega_1\dot{q}_1 + \omega_1^2 q_1 = -\Gamma_1 \ddot{u}_g$$

$$\ddot{q}_2 + 2\xi_2\omega_2\dot{q}_2 + \omega_2^2 q_2 = -\Gamma_2 \ddot{u}_g$$

Rapporto di  
smorzamento viscoso  
equivalente

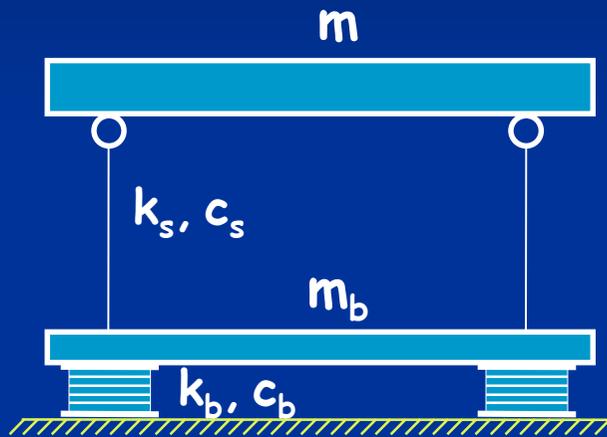
$$\xi_j = \frac{1}{2\omega_j} \frac{\phi_j^T C \phi_j}{\phi_j^T M \phi_j}$$

$$\xi_1 = \xi_b (1 - 1.5\gamma\varepsilon)$$

$$\xi_2 = \frac{\xi_s}{(1-\gamma)^{1/2}} + \frac{\gamma\xi_b\varepsilon^{1/2}}{(1-\gamma)^{1/2}}$$

# Portale isolato alla base

## Esempio



$$m = 16.29 \quad \text{kN s}^2/\text{m}$$

$$m_b = 3.25 \quad \text{kN s}^2/\text{m}$$

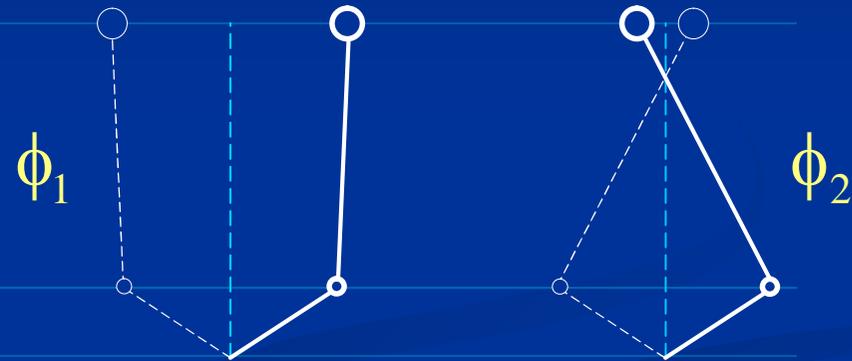
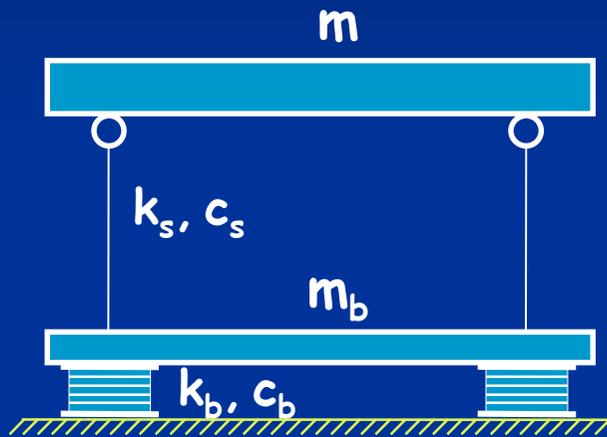
$$k_s = 2 \times 1286.478 \quad \text{kN m}$$

$$T_{bf} = 0.50 \quad \text{s}$$

	$T_{1\text{-iso}}$ (s)	$T_{2\text{-iso}}$ (s)	$\omega_b$ (rad/s)	$k_b$ (kNm <sup>-1</sup> )
Soluzione 1. Blocco rigido isolato	1.56905	0.19514	4.19	343.06
Soluzione 2. Approssimata	1.49331	0.19416	4.42	382.56
Soluzione 3. Rigorosa	1.50000	0.19426	4.40	378.80

# Portale isolato alla base

## Esempio



$$T_{1\text{-iso}} = 1.50 \text{ s}$$

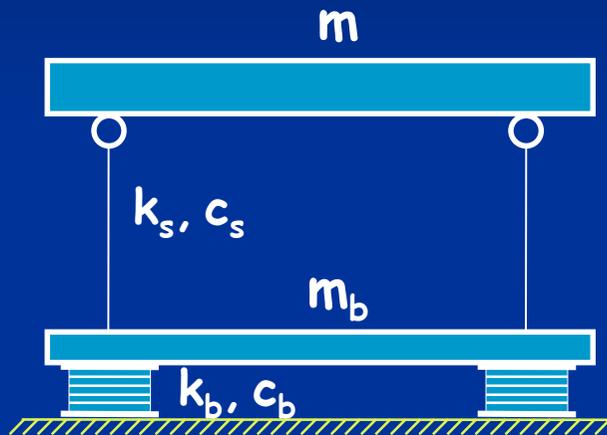
$$T_{2\text{-iso}} = 0.19 \text{ s}$$

(componenti in termini assoluti)	Modo 1	Modo 2
$\phi$	0.20464	-0.51478
$\dot{\phi}$	0.23022	0.09152

	Modo 1	Modo 2
Fattore di partecipazione modale	-4.41785	0.186391
Rapporto di massa partecipante modale	0.99822	0.00178

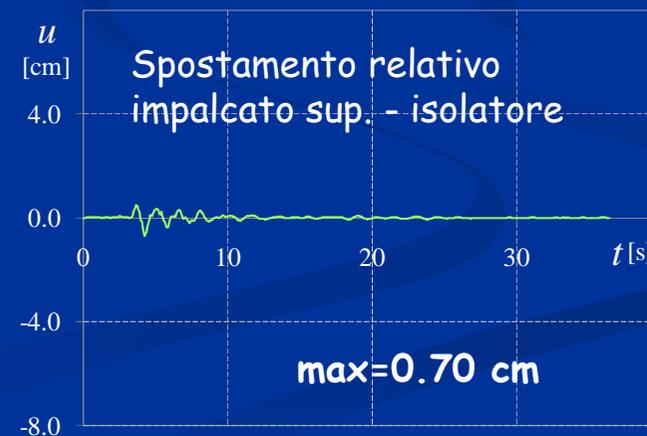
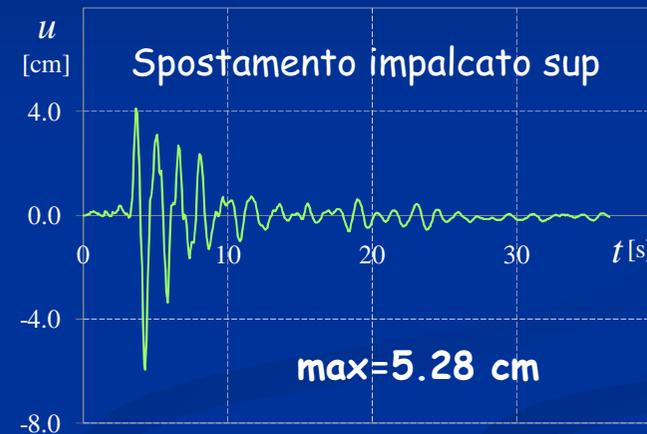
# Portale isolato alla base

Esempio



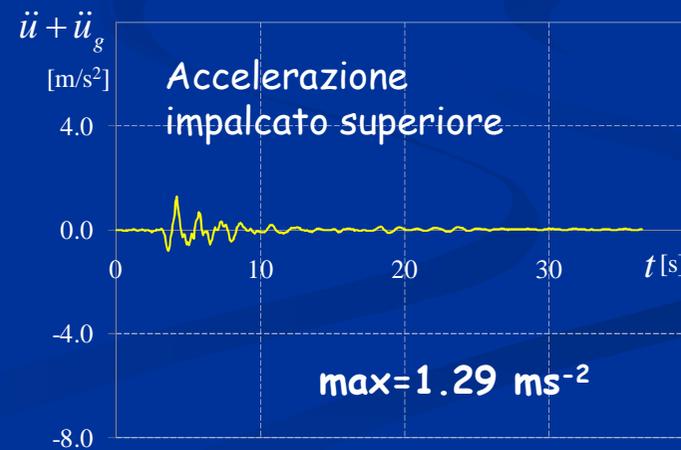
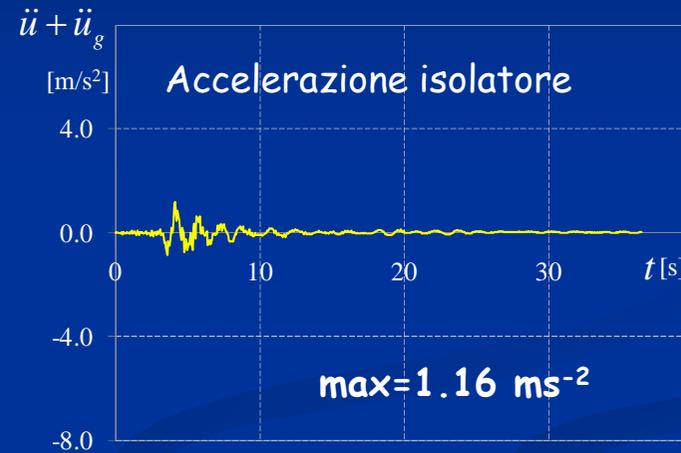
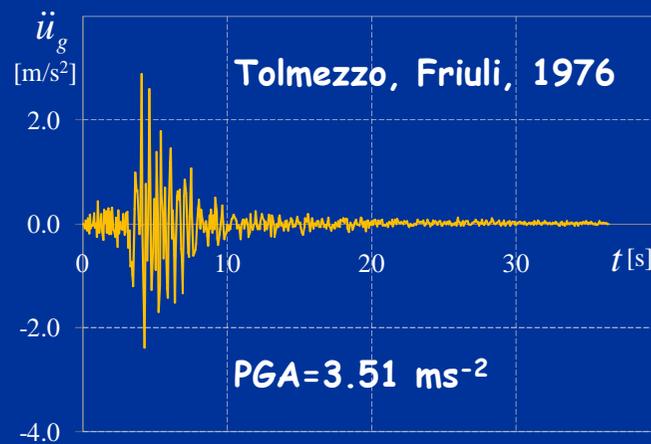
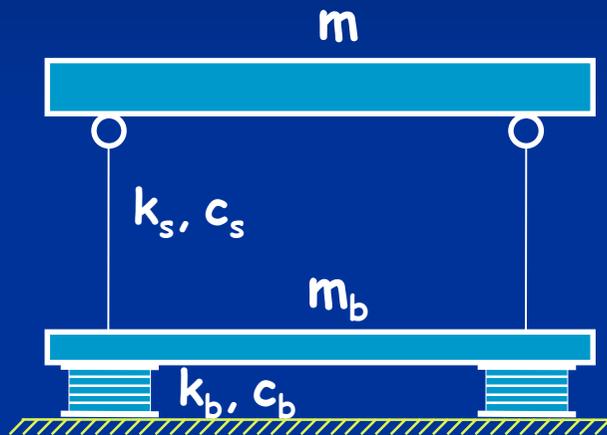
$$\xi_{1\text{-iso}} = 0.15$$

$$\xi_{2\text{-iso}} = 0.05$$



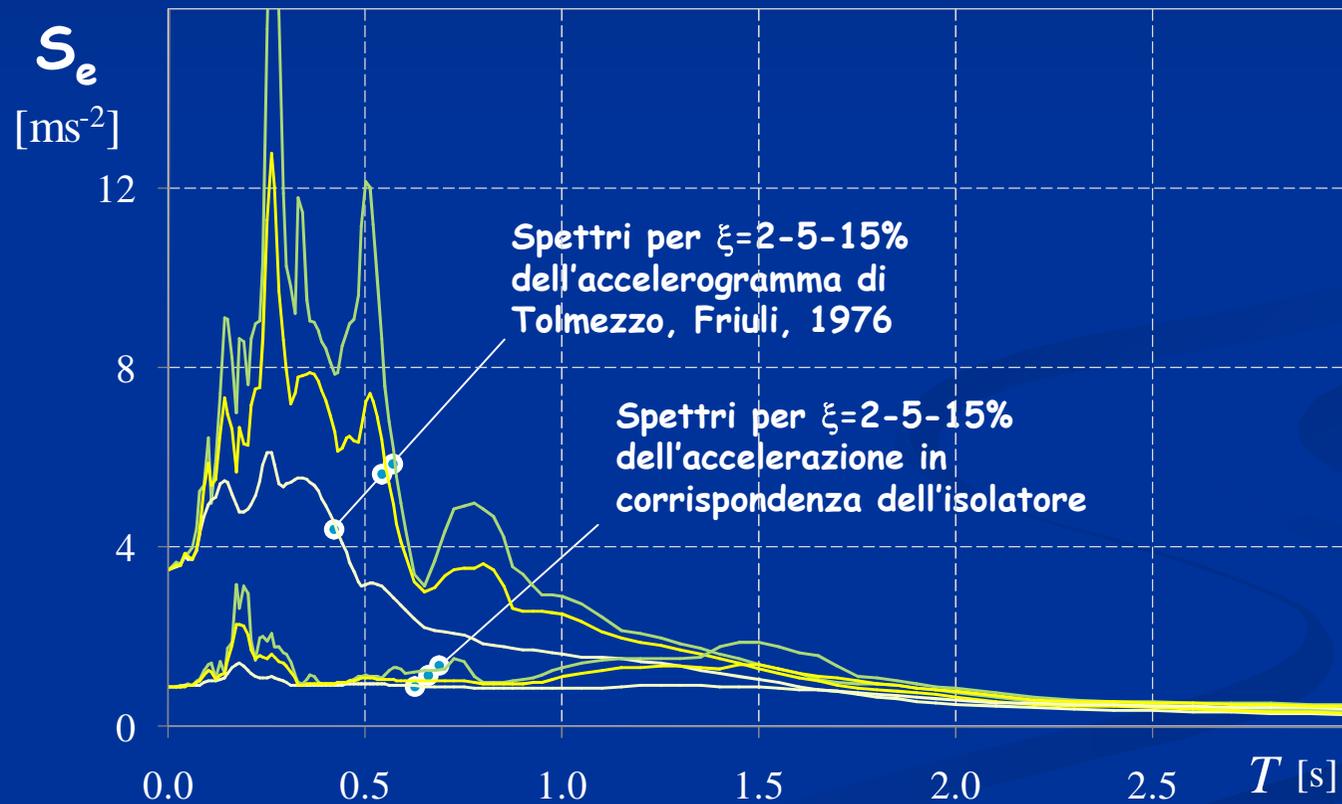
# Portale isolato alla base

## Esempio



# Portale isolato alla base

Esempio



# Isolamento alla base

## Applicazione

L'isolamento sismico prevede l'introduzione di una superficie di discontinuità fisica (interfaccia di isolamento) all'interno della struttura.

**Ma dove posizionare gli isolatori ?**

# Definizioni generali

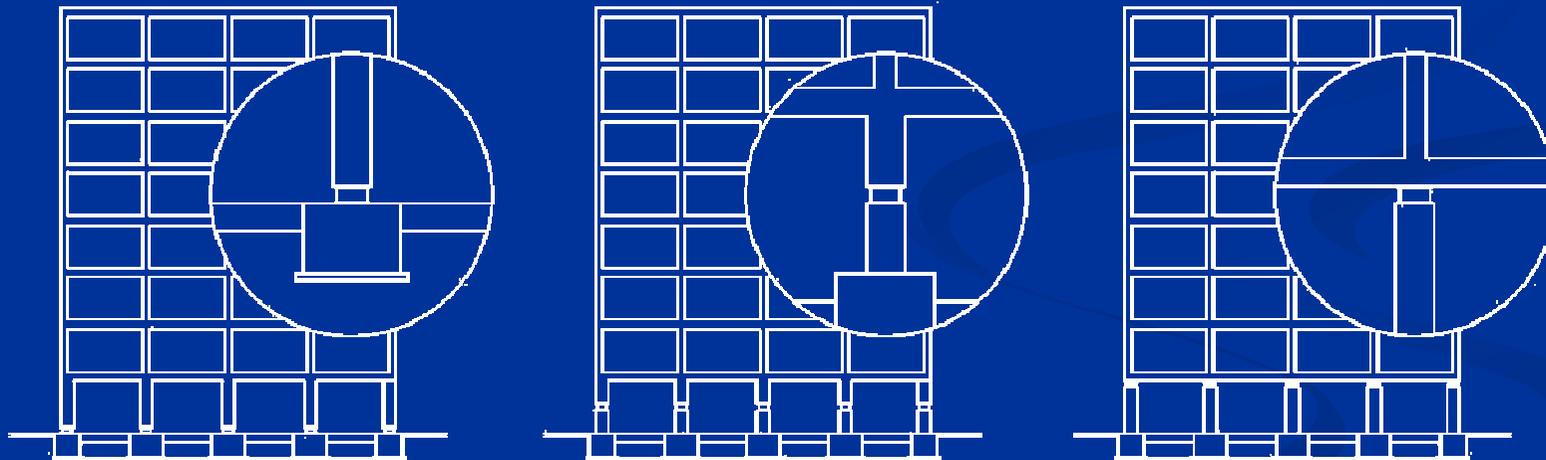
Detta "**interfaccia d'isolamento**" la superficie di separazione sulla quale è attivo il sistema d'isolamento, si definiscono:

- "**sottostruttura**", la parte della struttura posta al di sotto dell'interfaccia del sistema d'isolamento e che include le fondazioni, avente in genere deformabilità orizzontale trascurabile e soggetta direttamente agli spostamenti imposti dal movimento sismico del terreno;
- "**sovrastuttura**", la parte della struttura posta al di sopra dell'interfaccia d'isolamento e, perciò, isolata.

# Isolamento alla base

## Posizionamento

*Gli isolatori possono essere posti alla base dei pilastri del primo ordine, in sommità o a metà altezza di detti pilastri*

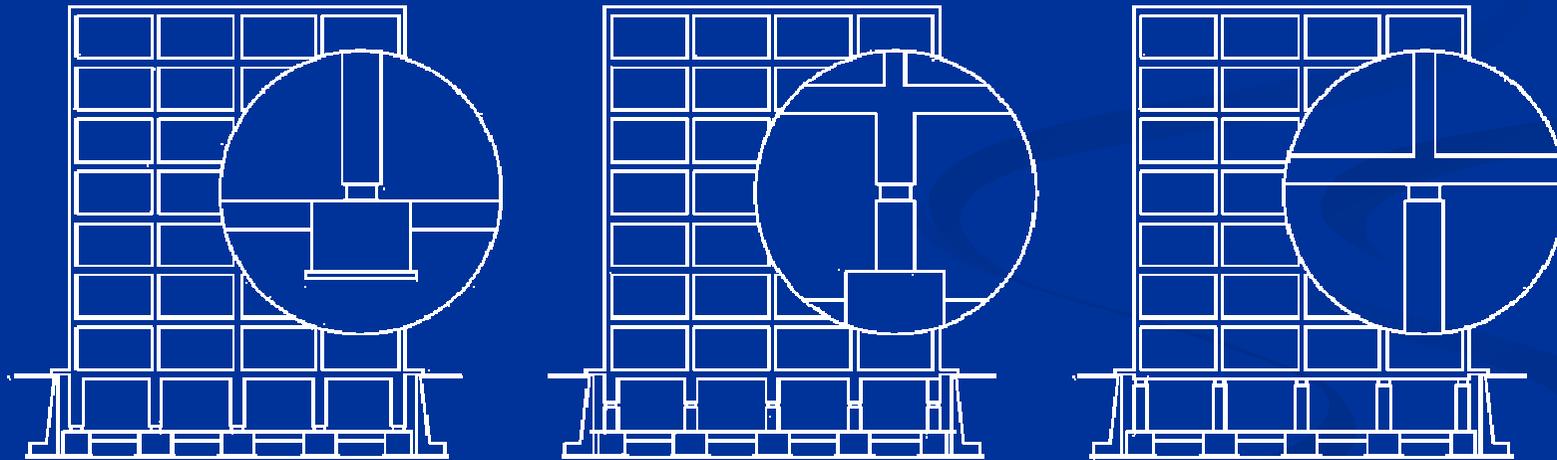


Posizioni alternative dell'interfaccia di isolamento all'interno di un edificio

# Isolamento alla base

## Posizionamento

*Gli isolatori possono essere posti direttamente sui plinti di fondazione, in sommità ai pilastri del piano interrato o a metà altezza di detti pilastri*



Posizioni alternative dell'interfaccia di isolamento all'interno di un edificio

# Isolamento alla base

## Posizionamento

Posizionamento	Vantaggi	Svantaggi
<b>Piastra di fondazione</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Non sono richiesti particolari dettagli per vani scale e ascensori.</li><li>• Non sono richiesti particolari dettagli per i pompagni.</li><li>• Base delle colonne collegate all'impalcato rigido di base.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Costi aggiuntivo a meno dell'utilizzo dei cunicoli in fondazione.</li><li>• Richiede una parete di contenimento aggiuntiva.</li></ul>
<b>Sommità colonne di base</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Non sono richieste piastre-contropiastre.</li><li>• Ridotto costo aggiunto per dettagli.</li><li>• Base delle colonne collegate all'impalcato rigido di base.</li><li>• Colonne servono anche come elementi di riserva per resistere a carichi verticali.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Può richiedere sistema di sollevamento al primo livello.</li><li>• Particolare cura per i vani scale al di sotto del primo livello.</li></ul>

# Isolamento alla base

## Posizionamento

Posizionamento	Vantaggi	Svantaggi
Base colonne primo livello	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ridotto costo aggiunto per dettagli.</li><li>• Gap al piano dell'isolamento può ottenersi facilmente.</li><li>• Base delle colonne sono collegate al diaframma rigido di piano.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Può richiedere dei sistemi di sollevamento e/o controventamento aggiuntivi.</li></ul>
Sommità colonne primo livello	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ridotto costo aggiunto per dettagli.</li><li>• Soluzione conveniente se primo livello destinato a parcheggio.</li><li>• Colonne servono anche come elementi di riserva per resistere a carichi verticali.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Cura per scale e ascensori.</li><li>• Particolari tipi di tompagni al primo livello se non aperto.</li><li>• Cura particolare per vani scale e ascensori.</li></ul>

Quali sono le funzione che devono  
essere espletate  
da un sistema di isolamento?

# Dispositivi di isolamento

## Funzioni

I dispositivi di isolamento devono essere in grado di espletare le funzioni:

- resistenza ai carichi verticali, con elevata rigidità verticale;
- resistenza alle forze di inerzia orizzontali, con bassa rigidità orizzontale;
- dissipazione di energia;
- ricentraggio del sistema;
- vincolo laterale, sotto carichi orizzontali di servizio non sismici;

OBBLIGATORI

OPZIONALI

# Dispositivi ausiliari

## Funzioni

I dispositivi ausiliari espletano una o più delle seguenti funzioni:

- dissipazione di energia;
- ricentraggio del sistema;
- vincolo laterale,  
sotto carichi orizzontali di servizio non sismici;

Pertanto, essi espletano le funzioni che non sono necessariamente svolte dai dispositivi di isolamento.

# Sistemi di isolamento

## Tipologie

Un sistema di isolamento può essere costituito:

- (i) Unicamente da isolatori elastomerici, eventualmente realizzati con elastomeri ad alta dissipazione o comprendenti inserti di materiali dissipativi (ad es. piombo);
- (ii) Unicamente da isolatori a scorrimento o rotolamento, che inglobano funzioni dissipative o ricentranti per la presenza di elementi capaci di svolgere tali funzioni;
- (iii) Da un'opportuna combinazione di isolatori e dispositivi ausiliari.

# Dispositivi ausiliari

## Classificazione

### Dispositivi dipendenti dallo spostamento

in cui la forza trasmessa dipende dallo spostamento relativo delle sue estremità (dissipatori isteretici , in lega a memoria di forma, viscoelastici elastomerici)

### Dispositivi dipendenti dalla velocità

in cui la forza trasmessa dipende dalla velocità relativa delle sue estremità (dissipatori viscosi e viscosi ricentranti)

### Dispositivi di vincolo rigido

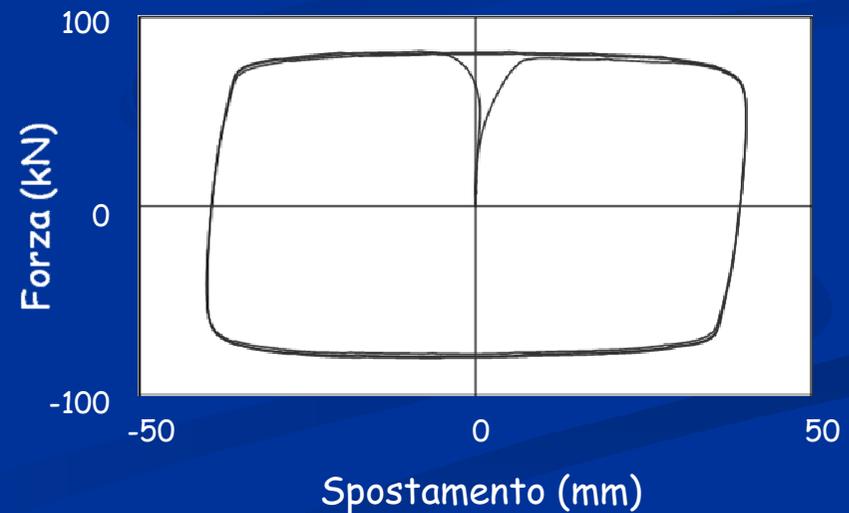
# Dispositivi ausiliari

## Classificazione

### DISPOSITIVI DIPENDENTI DALLA VELOCITA'

#### VISCOSI

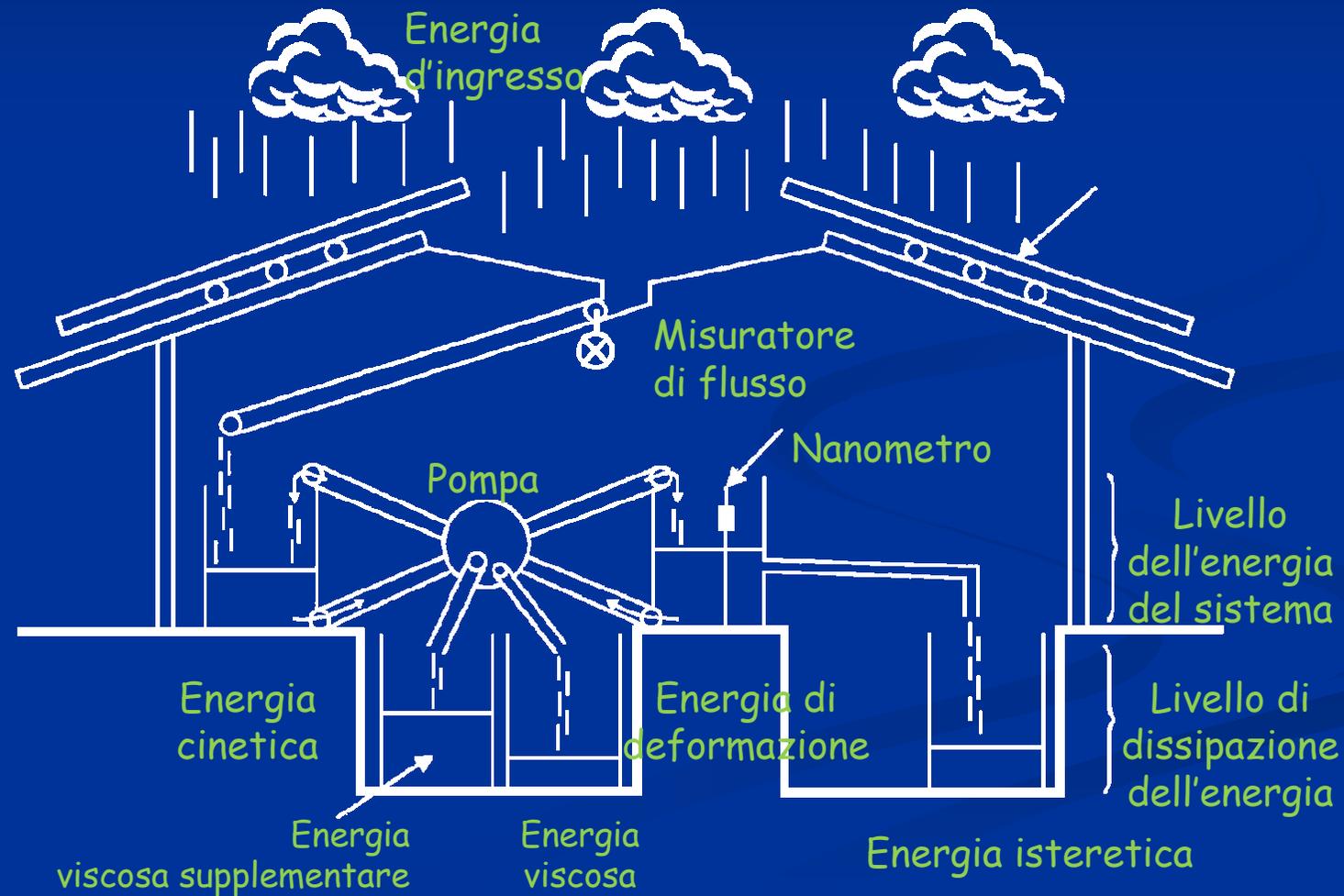
I dispositivi viscosi sono dispositivi cilindro/pistone in cui la laminazione di un fluido siliconico attraverso un idoneo circuito idraulico permette la dissipazione di energia.



# Equazione di bilancio energetico

Rappresentazione pratica

Durante l'evento sismico



# Dispositivi di dissipazione viscosa nonlineare

Nei dispositivi di dissipazione viscosa nonlineare la forza sviluppata dal dispositivo è legata alla velocità relativa tra gli estremi del dispositivo dalla seguente relazione:

$$F(t) = C_{NL} \operatorname{sgn}[\dot{x}(t)] |\dot{x}(t)|^{\alpha_{vd}}$$

La costante  $C_{NL}$  è detta costante di smorzamento viscoso nonlineare.

## Nota !

Il coefficiente  $\alpha_{vd}$  può essere uguale ad uno, inferiore ad uno o superiore ad uno.

# Dispositivi di dissipazione viscosa nonlineare

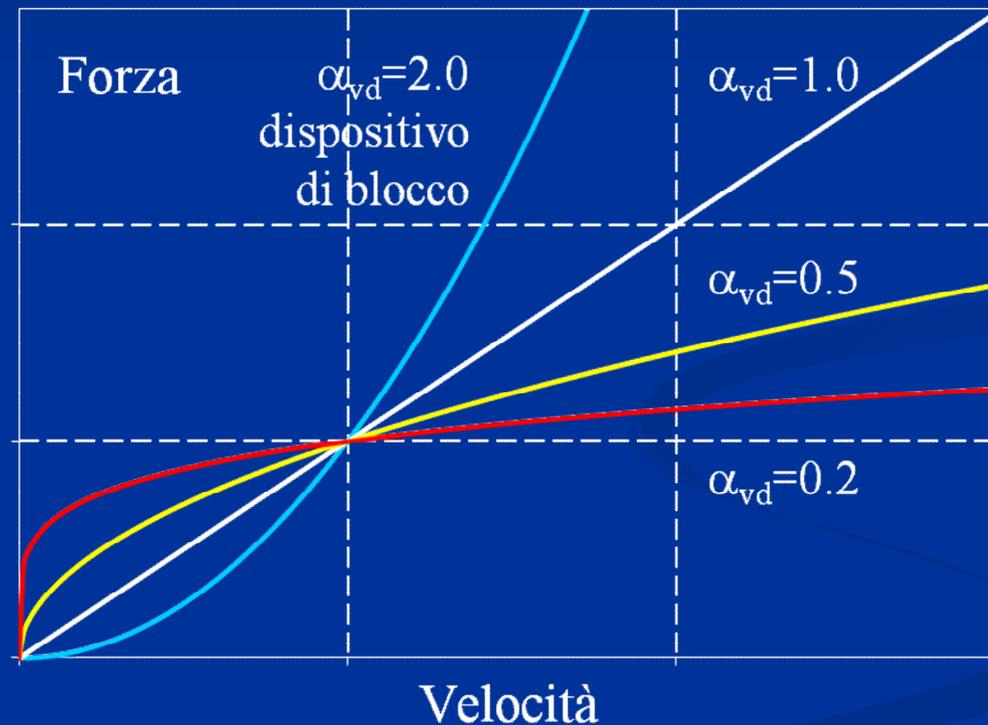


Diagramma Forza/velocità di dissipatori viscosi lineari e non lineari

# Dispositivi di dissipazione viscosa nonlineare

Se si imprime un moto relativo di tipo sinusoidale  
agli estremi del dispositivo:

$$x(t) = X_0 \text{sen } \omega t$$

la forza sviluppata dal dispositivo è:

$$F(t) = C_{NL} \text{sgn}(\cos \omega t) |\omega X_0 \cos \omega t|^{\alpha_{vd}}$$

ovvero,

ricordando che  $\cos \omega t = \pm \sqrt{1 - \text{sen}^2 \omega t}$

$$\frac{F(t)}{C_{NL} (X_0 \omega)^{\alpha_d}} = \pm \left\{ 1 - \left[ \frac{x(t)}{X_0} \right]^2 \right\}^{\frac{\alpha_{vd}}{2}}$$

# Dispositivi di dissipazione viscosa nonlineare

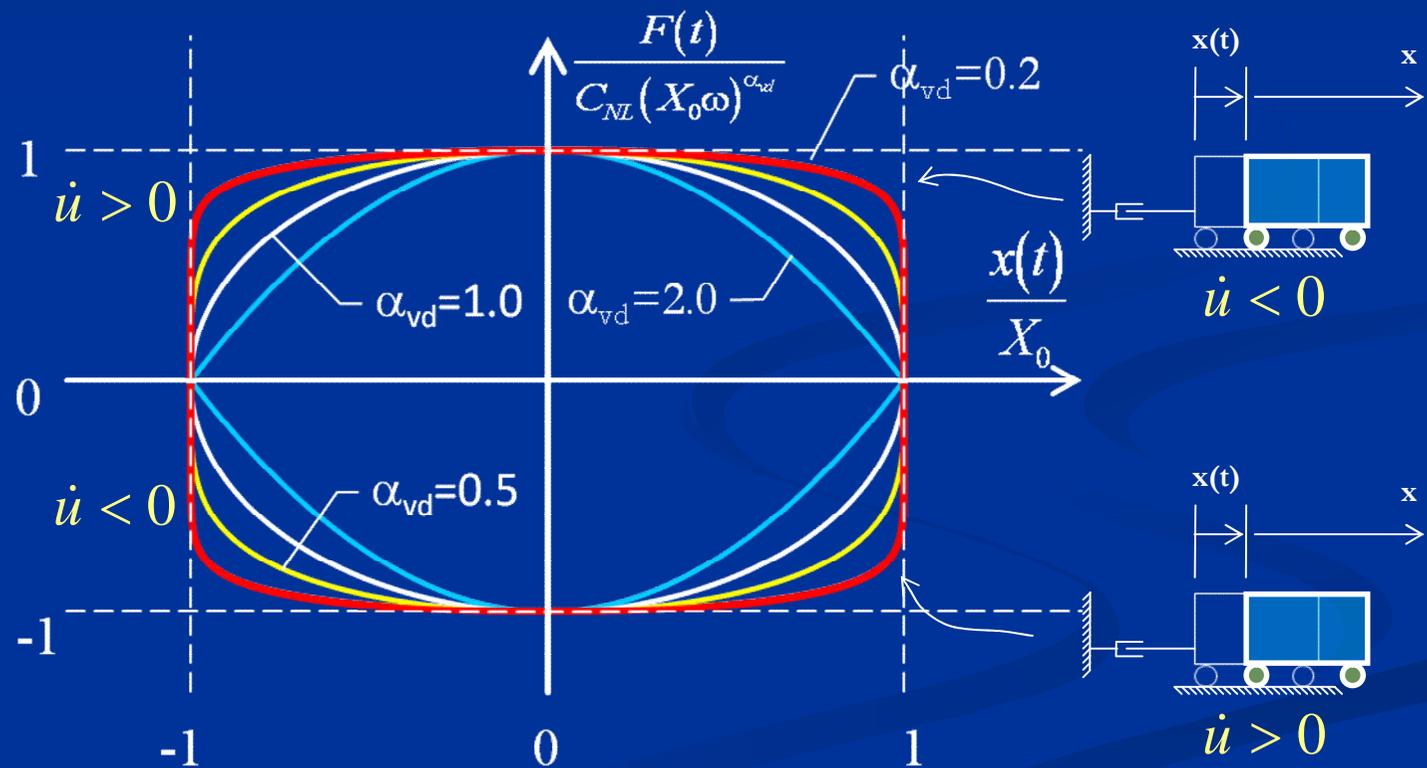
L'energia dissipata dal dissipatore viscoso lineare in un ciclo di spostamento è pari a :

$$E_{vd} = \int_0^{2\pi/\omega} F(t) \dot{x}(t) dt = 4C_{NL} (X_0 \omega)^{\alpha_{vd}+1} \int_0^{\pi/2\omega} \cos^{\alpha_{vd}+1} \omega t dt$$

ovvero :

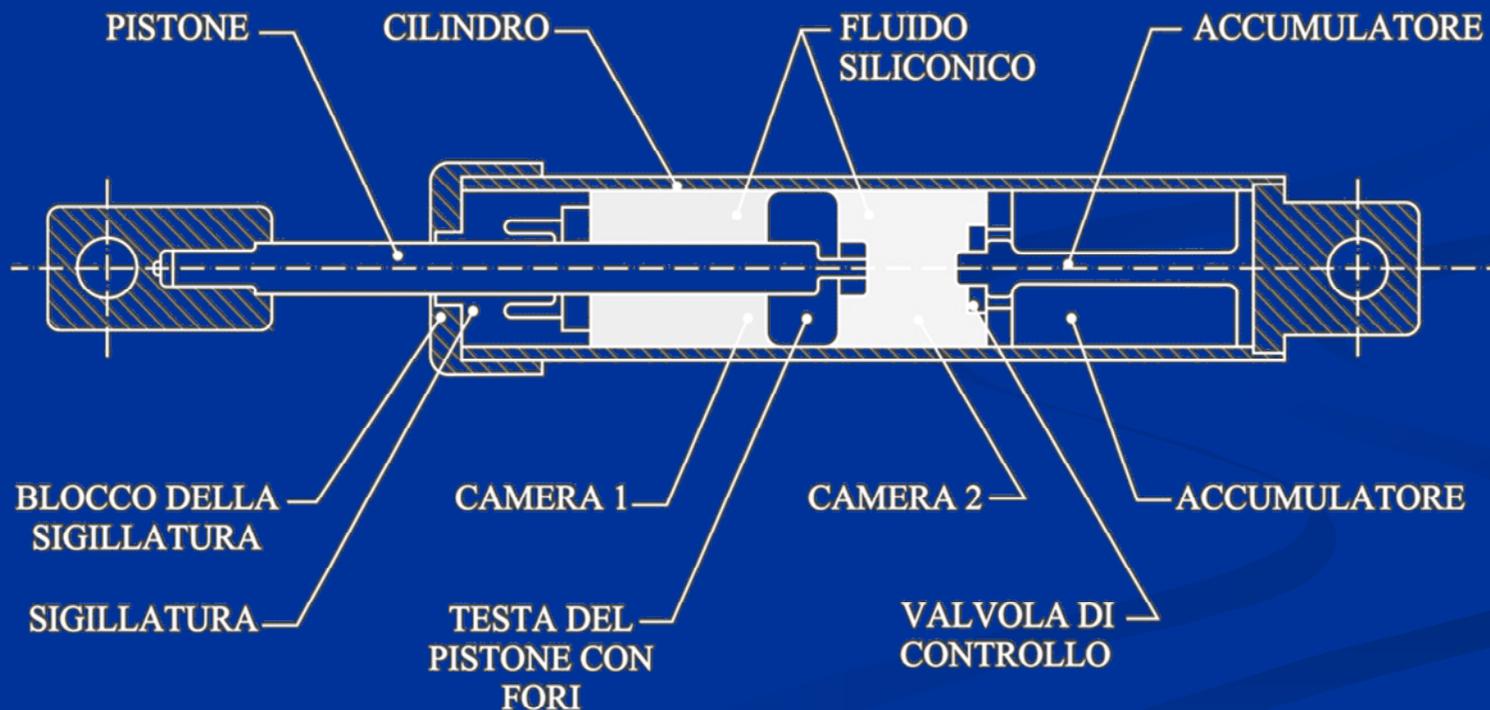
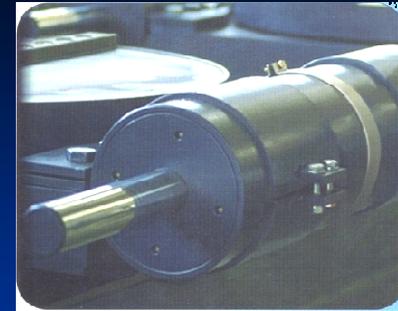
$$E_{vd} = 2\sqrt{\pi} C_{NL} (X_0)^{\alpha_{vd}+1} \omega^{\alpha_{vd}} \frac{\Gamma(1 + \alpha_{vd}/2)}{\Gamma(1.5 + \alpha_{vd}/2)}$$

# Dispositivi di dissipazione viscosa lineare e nonlineare



# Dispositivi di dissipazione fluidodinamica

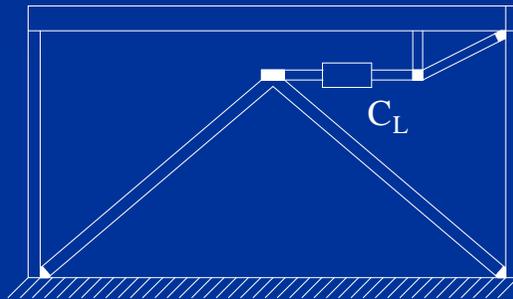
Schema generale



# Dispositivi di dissipazione viscosa

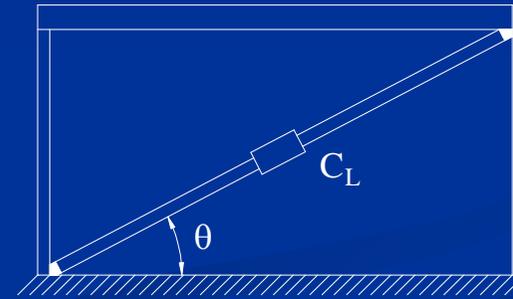
## Posizionamento

$$f = 1$$



Posizione  
orizzontale

$$f = \cos \theta$$



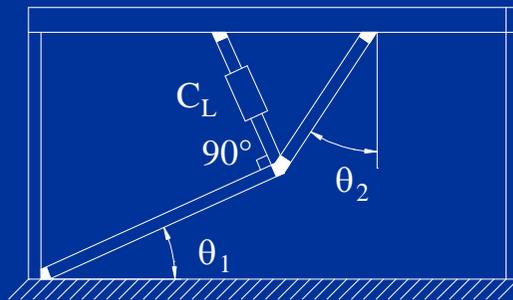
Posizione  
diagonale

$$\xi = \frac{C_L f^2 g T}{4\pi W}$$

# Dispositivi di dissipazione viscosa

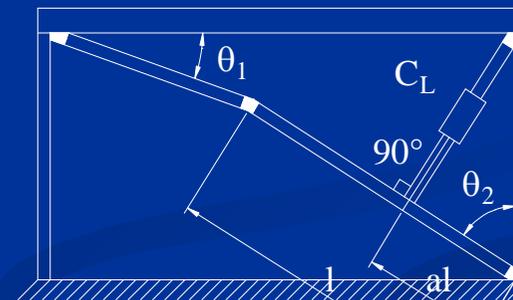
## Posizionamento

$$f = \frac{\text{sen } \theta_2}{\cos(\theta_1 + \theta_2)} + \text{sen } \theta_1$$

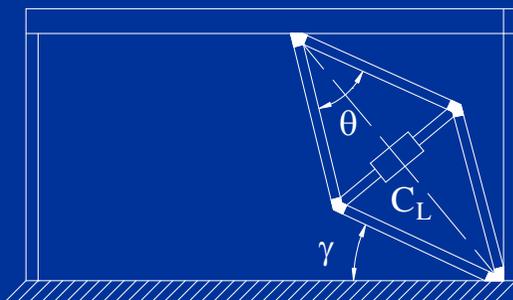


Ginocchio superiore

$$f = \frac{a \cos \theta_1}{\cos(\theta_1 + \theta_2)} - \cos \theta_2$$



Ginocchio inverso

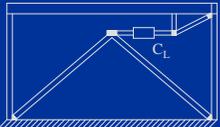
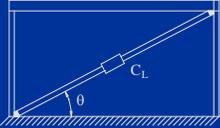
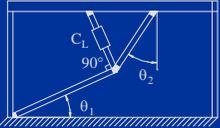
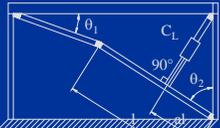


$$f = \frac{\cos \gamma}{\text{tg } \theta}$$

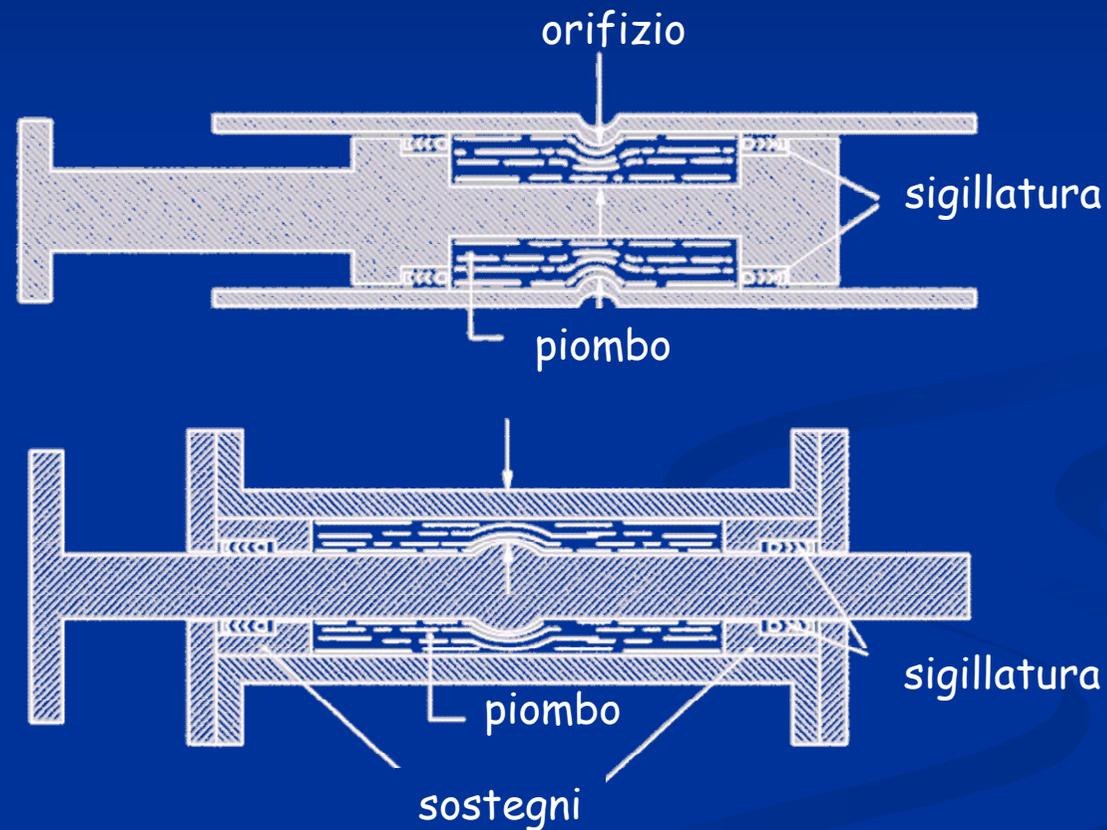
Scissor-jack

# Dispositivi di dissipazione viscosa

## Posizionamento

	Configurazione	Parametri geometrici	f	$\xi$
	Orizzontale	-	1.00	0.05
	Diagonale	$\theta=37^\circ$	0.80	0.03
	Ginocchio superiore	$\theta_1=31.9, \theta_2=43.2^\circ$	3.19	0.51
	Ginocchio inverso	$\theta_1=30^\circ, \theta_2=49^\circ, a=0.7$	2.52	0.32
	Scissor-jack	$\theta=9^\circ, \gamma=70^\circ$	2.16	0.23

# Dispositivi di dissipazione ad estrusione di piombo



Dissipatore ad estrusione di piombo

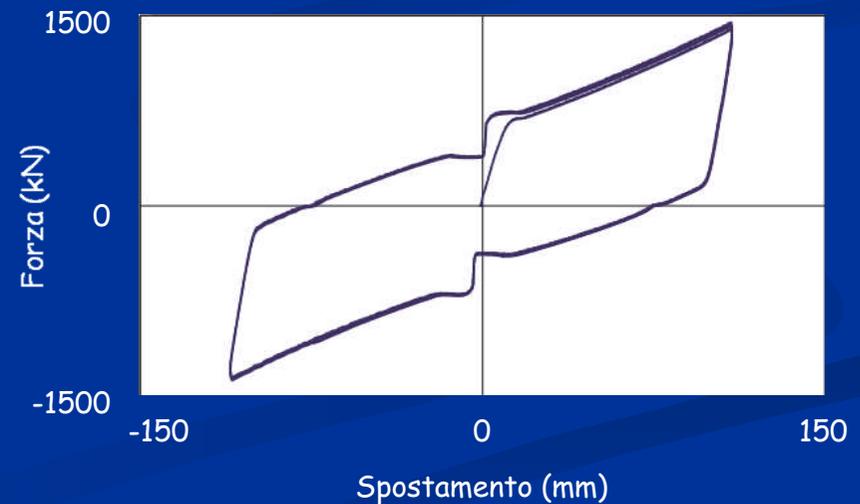
# Dispositivi ausiliari

## Classificazione

### DISPOSITIVI DIPENDENTI DALLA VELOCITA'

#### VISCOSI RICENTRANTI

I dispositivi viscosi ricentranti sono dispositivi cilindro/pistone caratterizzati da un legame costitutivo in cui la forza di reazione dipende sia dalla velocità che dallo spostamento



# Dispositivi ausiliari

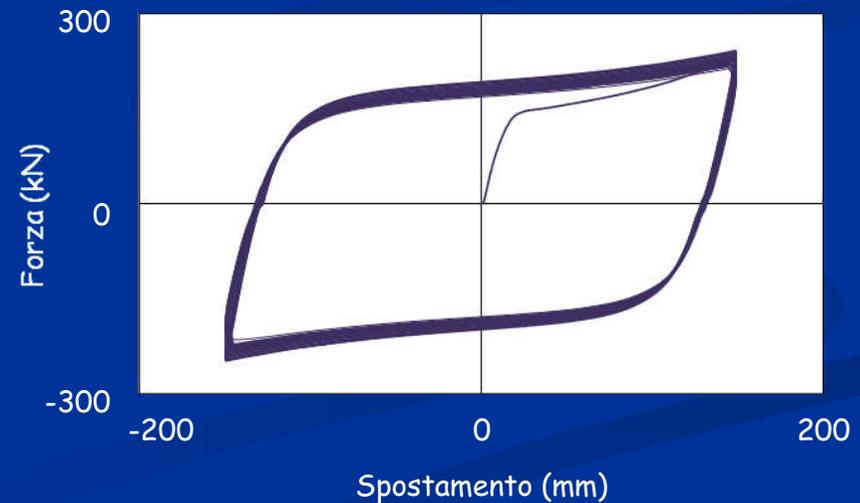
## Classificazione

### DISPOSITIVI DIPENDENTI DALLO SPOSTAMENTO

#### NON-LINEARI

#### ISTERETICI

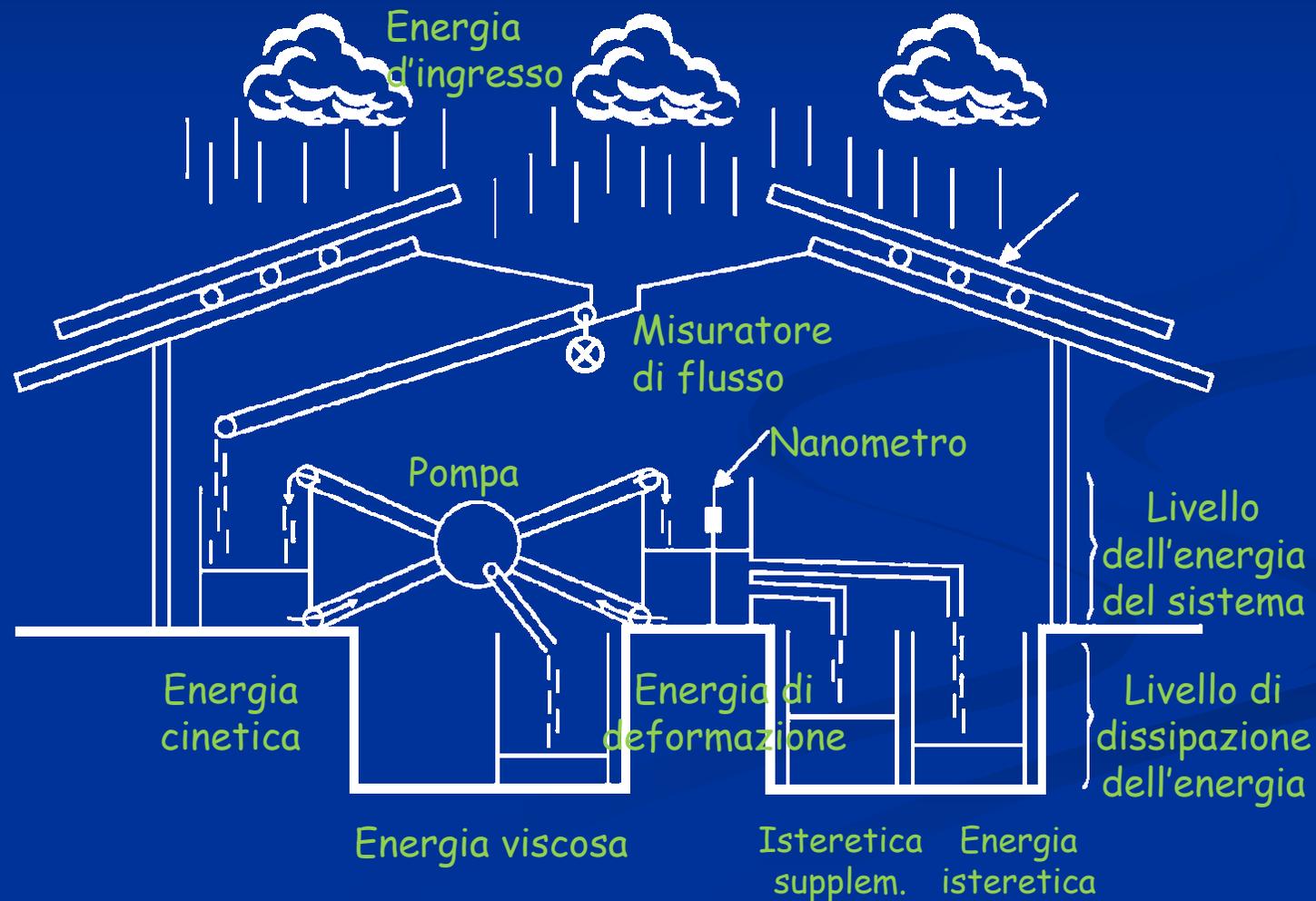
I dissipatori isteretici in acciaio sfruttano la plasticizzazione di elementi in acciaio di forma opportuna, progettata per garantire un comportamento ciclico stabile.



# Equazione di bilancio energetico

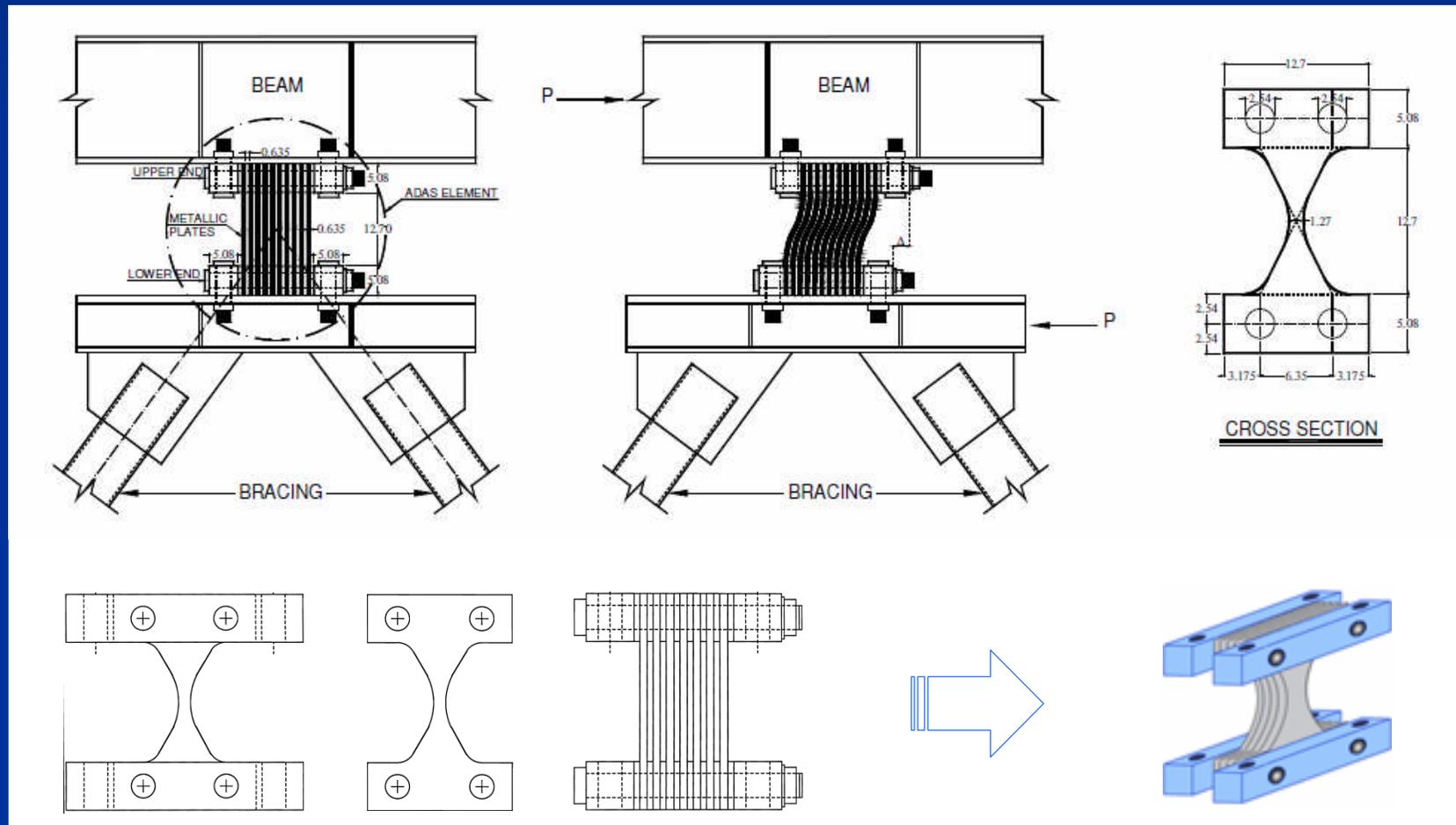
Rappresentazione pratica

Durante l'evento sismico



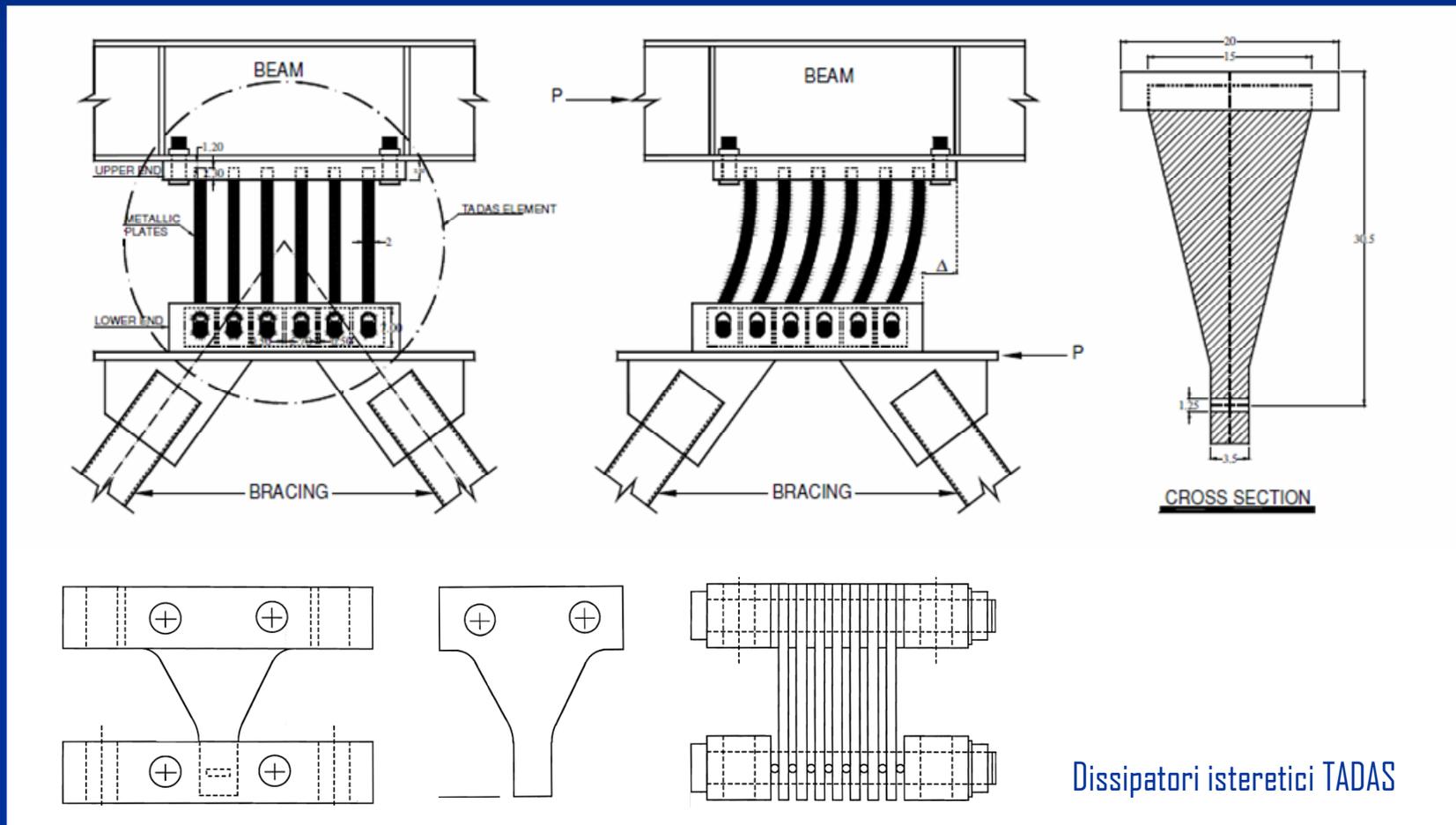
# Dispositivi di dissipazione isteretica

## Dissipatori ADAS



# Dispositivi di dissipazione isteretica

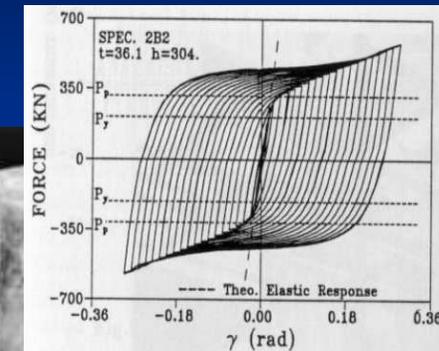
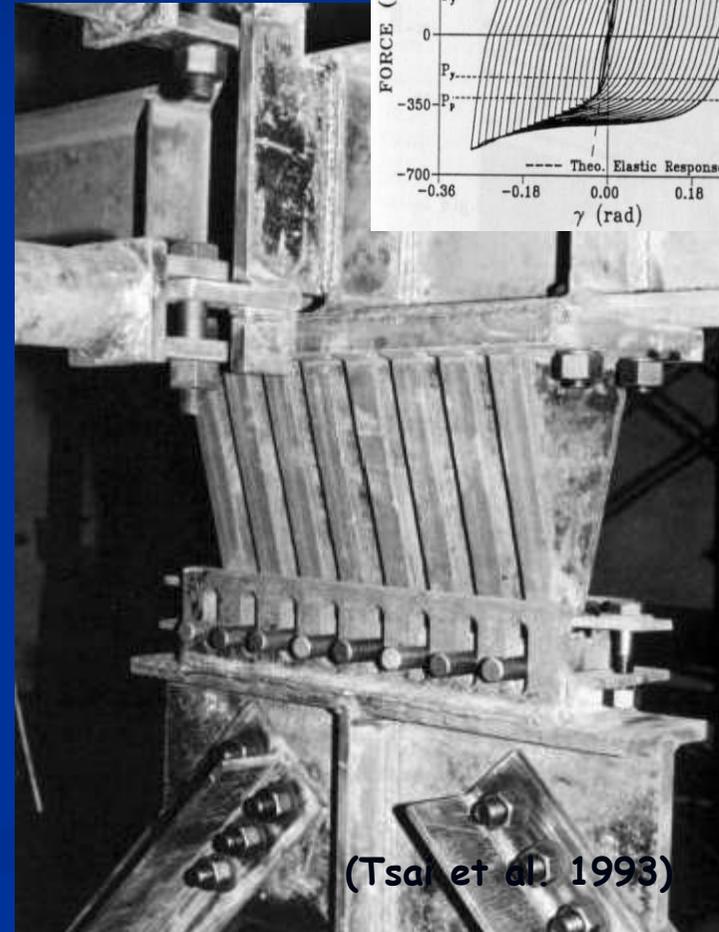
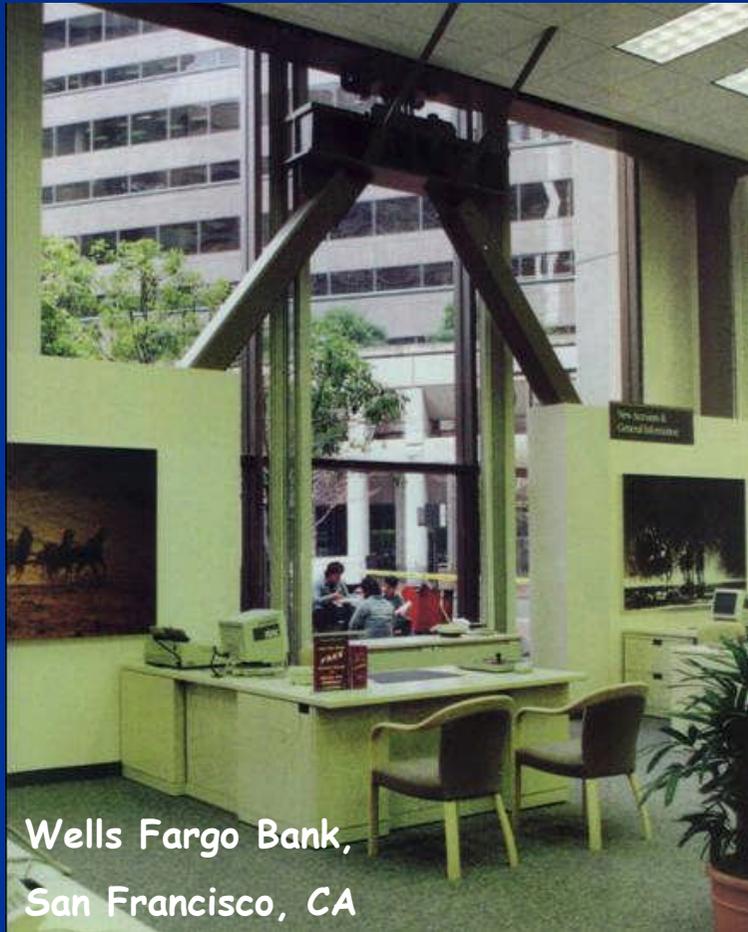
## Dissipatori TADAS



Dissipatori isteretici TADAS

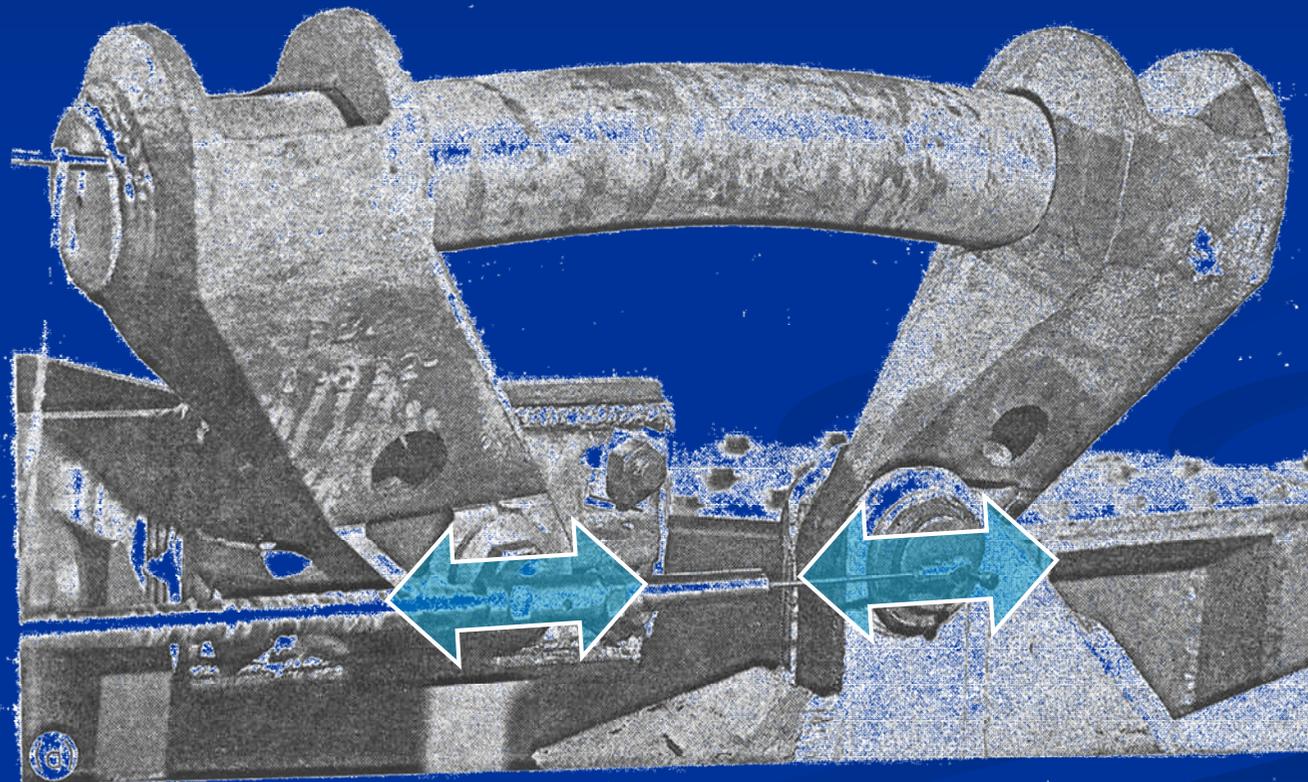
# Dispositivi di dissipazione isteretica

## Dissipatori ADAS-TADAS



# Dispositivi di dissipazione isteretica

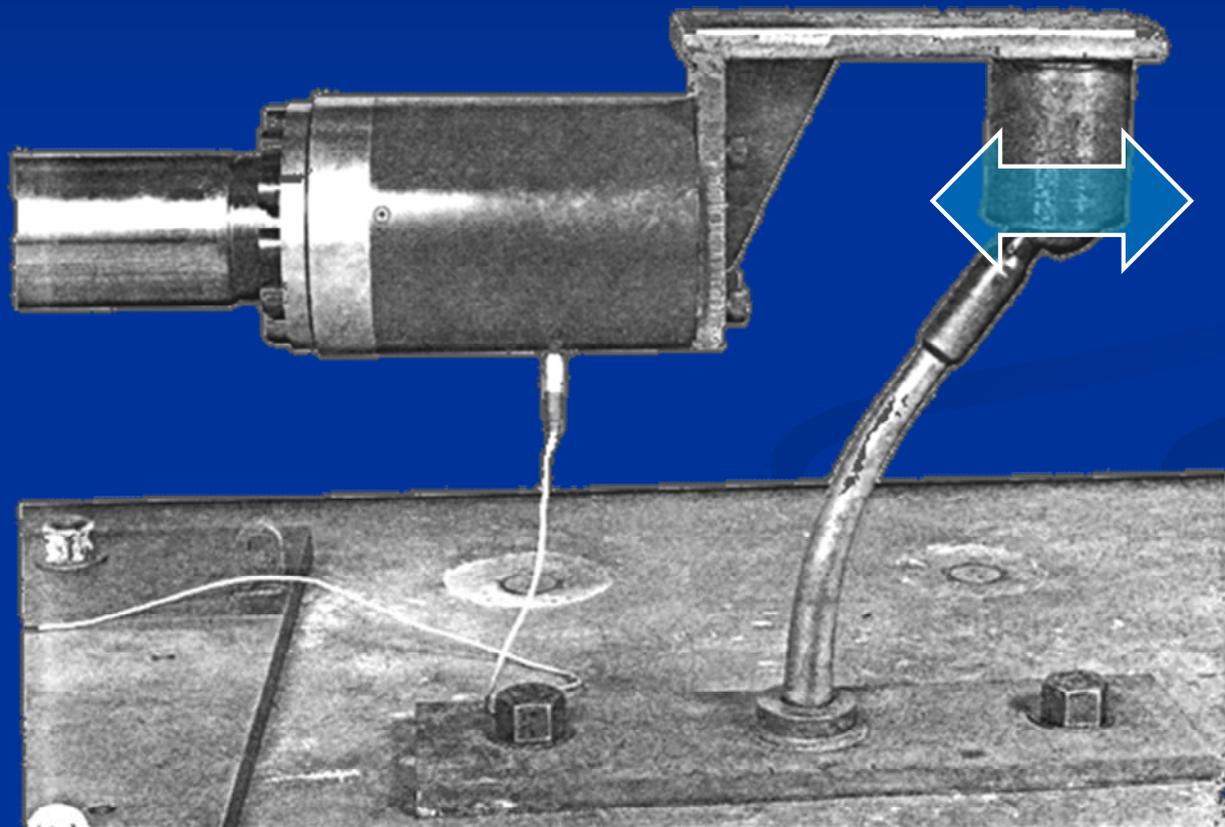
Dissipatore a momento flettente uniforme (Tipo U)



Dissipatore isteretico a momento flettente uniforme

# Dispositivi di dissipazione isteretica

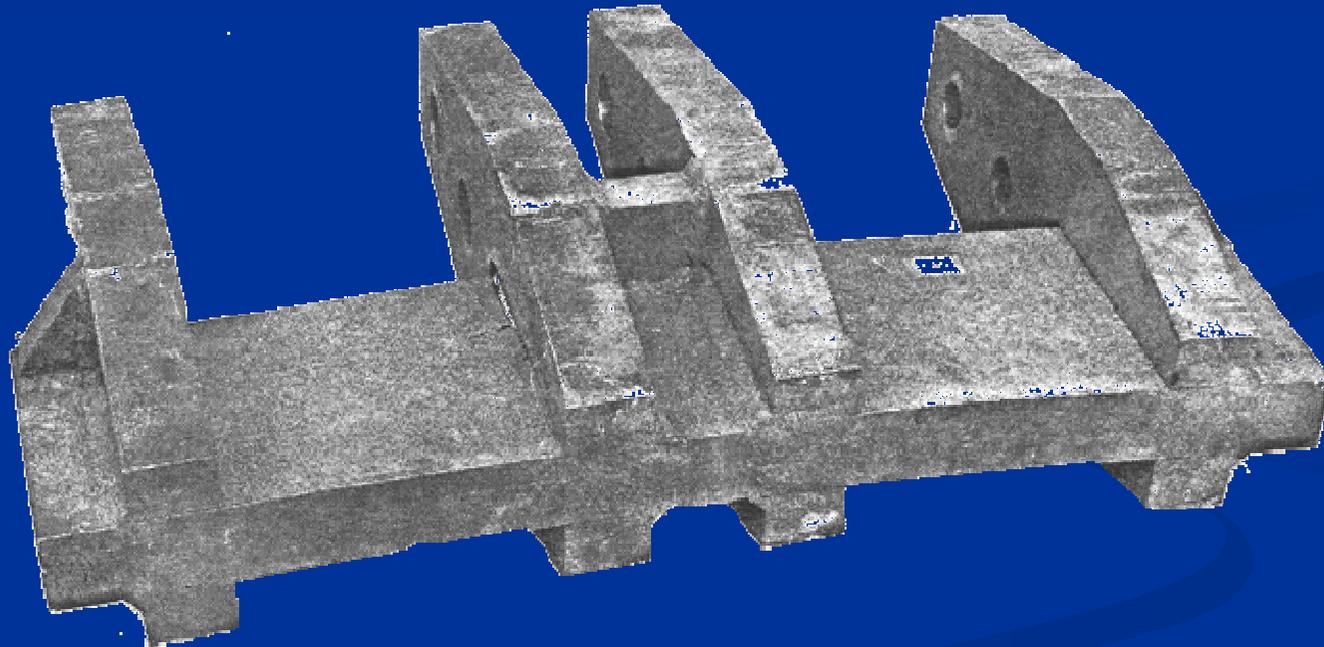
Dissipatore a momento flettente variabile (Tipo T)



Dissipatore isteretico a momento flettente variabile

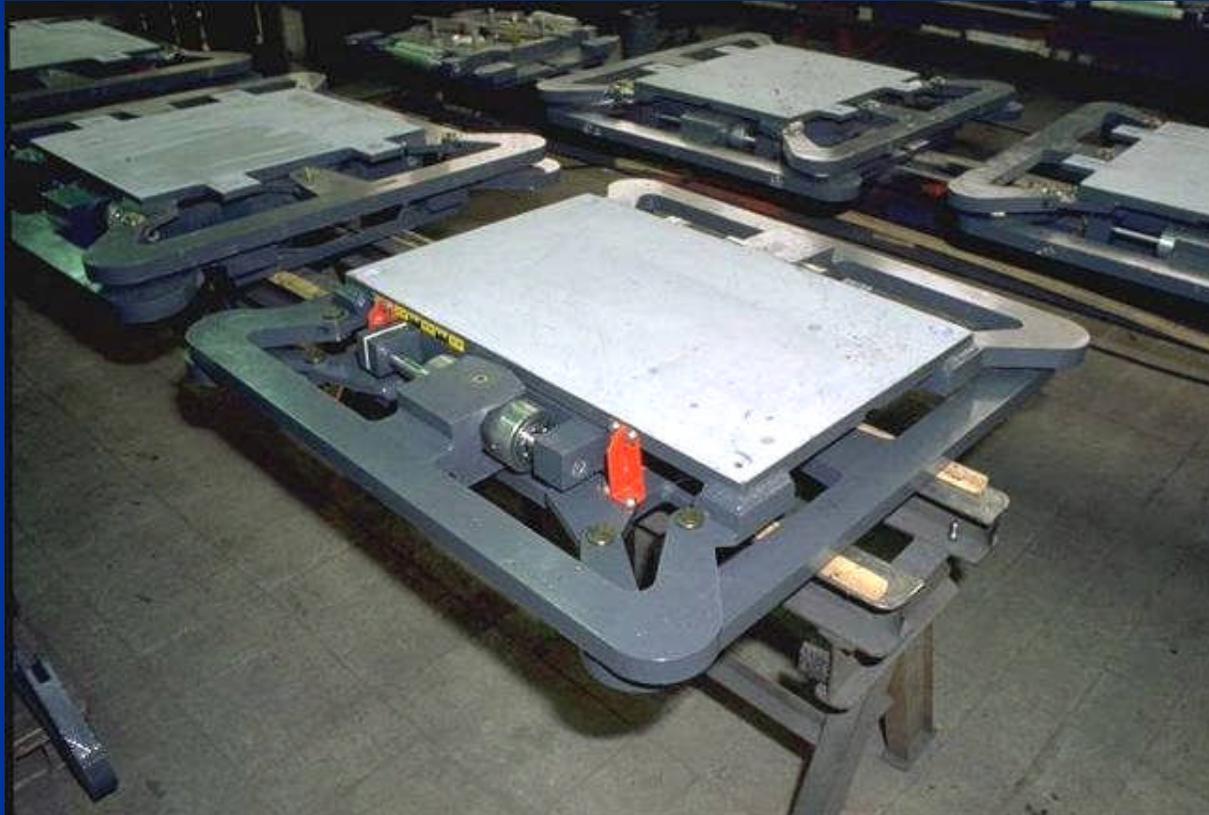
# Dispositivi di dissipazione isteretica

Dissipatore a torsione (Tipo E)



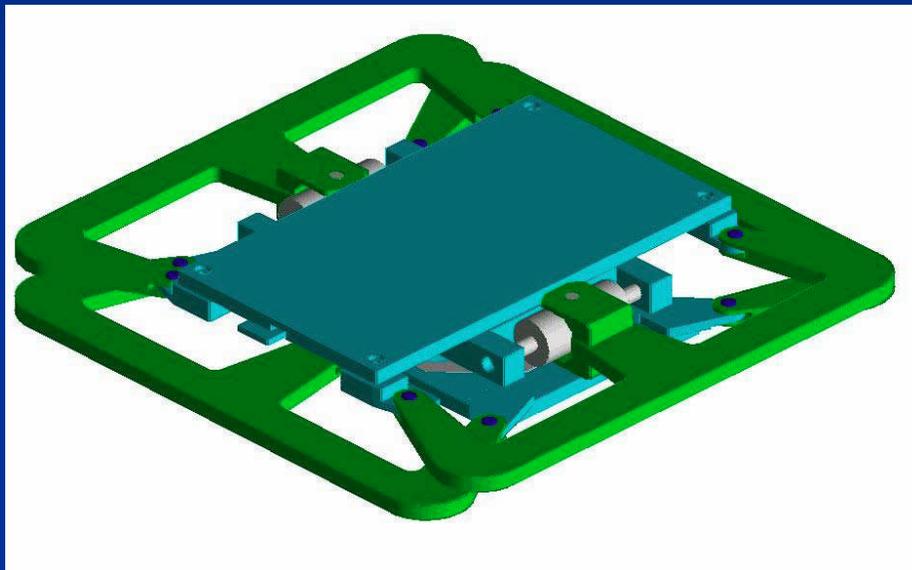
Dissipatore isteretico a torsione

# Dispositivi di dissipazione isteretica

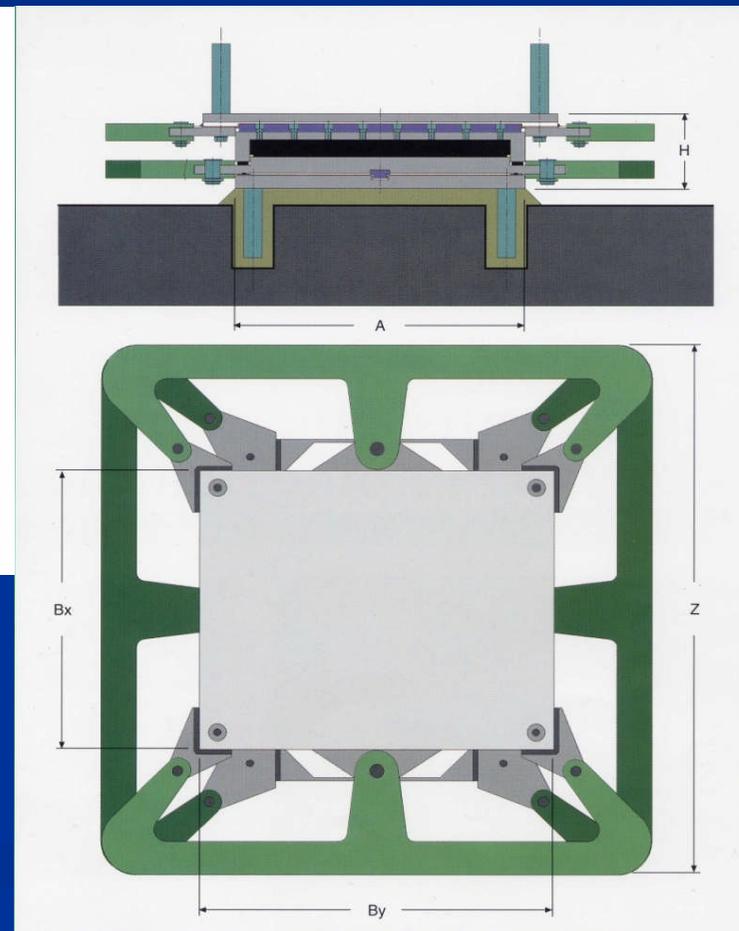


Dissipatore isteretico (tipo E)

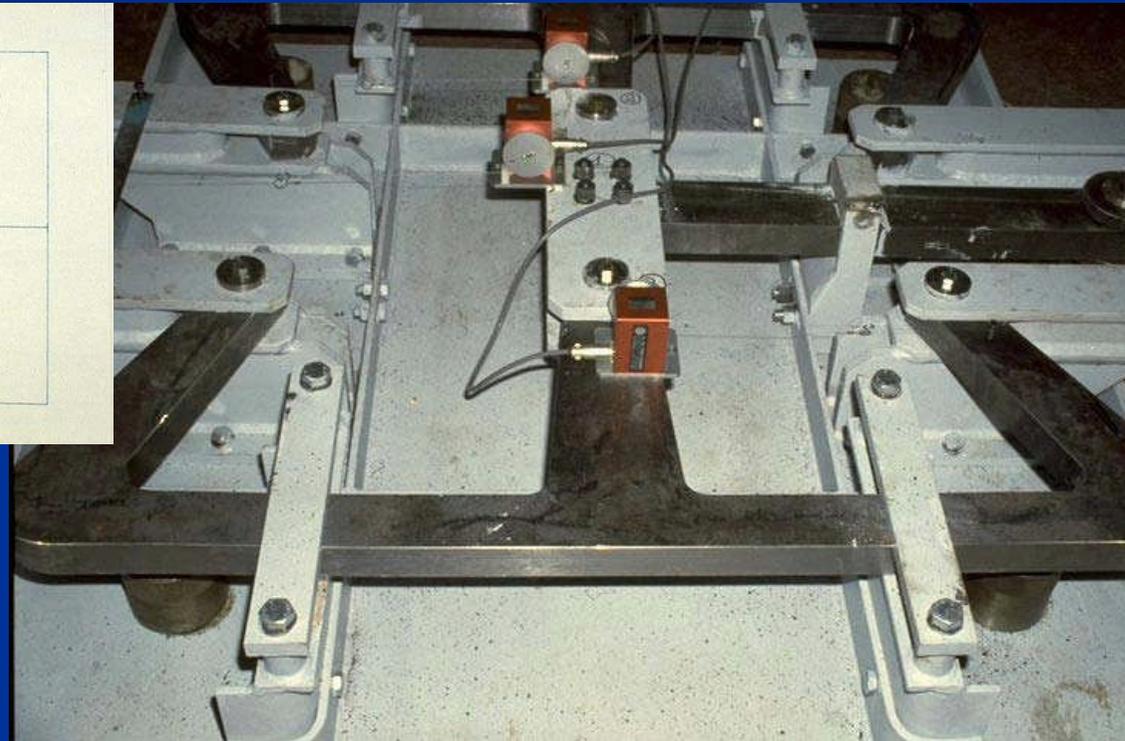
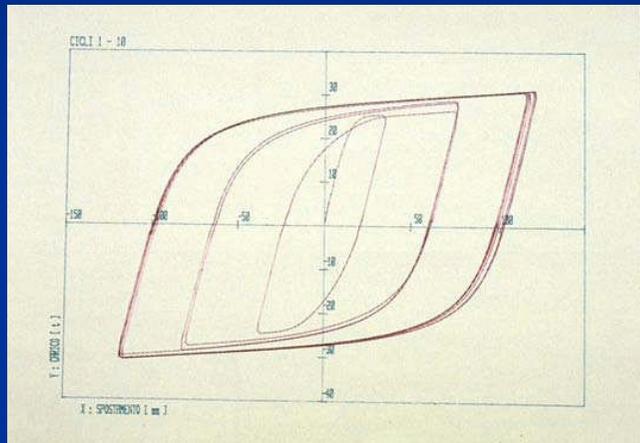
# Dispositivi di dissipazione isteretica



Dissipatore isteretico (tipo E)



# Dispositivi di dissipazione isteretica



Dissipatore isteretico (tipo E)

# Dispositivi di dissipazione isteretica



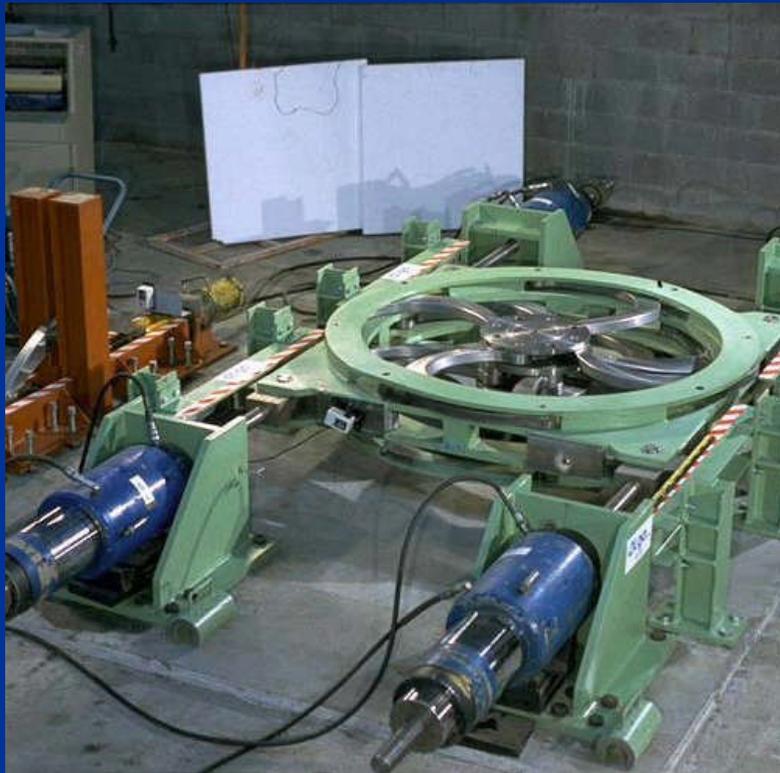
Dissipatore isteretico (tipo E)

# Dispositivi di dissipazione isteretica



Dissipatore isteretico (tipo C)

# Dispositivi di dissipazione isteretica



Dissipatore isteretico (tipo C)

# Dispositivi ausiliari

## Classificazione

### DISPOSITIVI DIPENDENTI DALLO SPOSTAMENTO

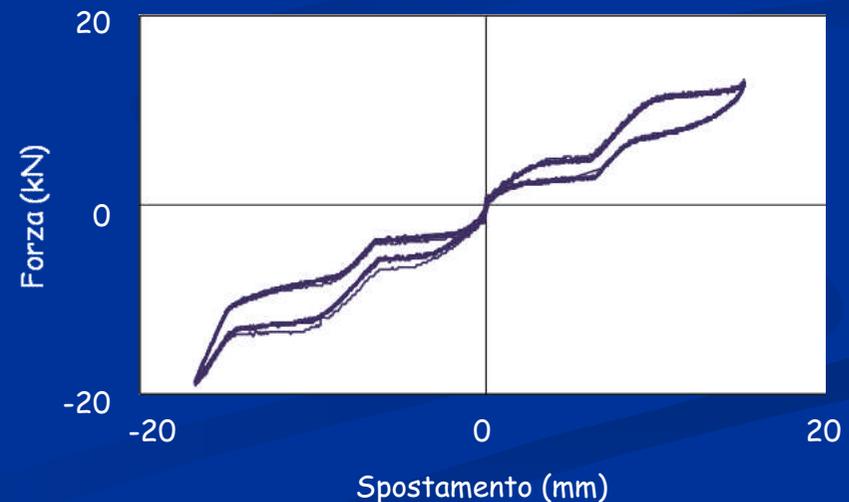
#### NON-LINEARI

#### MEMORIA DI FORMA

I dispositivi in lega a memoria di forma sono dispositivi che sfruttano le proprietà superelastiche delle leghe a memoria di forma.

La curva forza-spostamento, caratterizzata da plateaux, consente di limitare la forza trasmessa alla struttura .

Tali dispositivi possiedono anche un'elevata capacità ricentrante.



# Dispositivi ausiliari

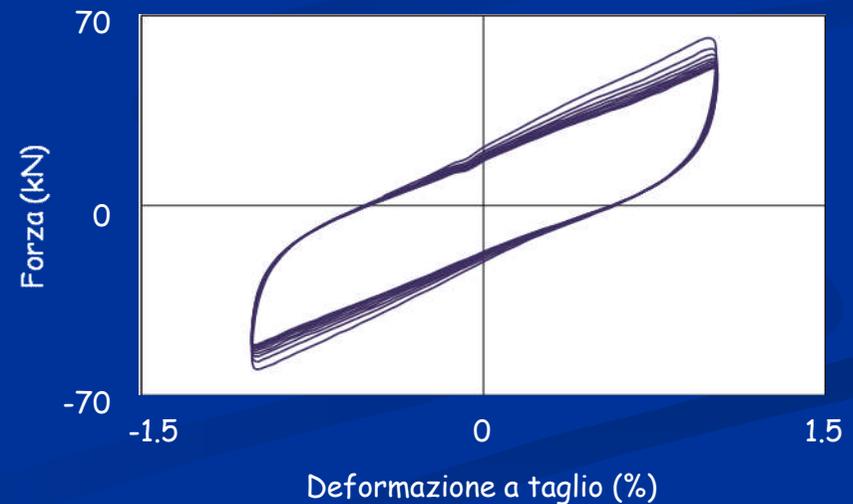
## Classificazione

### DISPOSITIVI DIPENDENTI DALLO SPOSTAMENTO

#### LINEARI

#### VISCOELASTICI

I dispositivi viscoelastici elastomerici sono costituiti da uno o più strati in mescola elastomerica ad alto smorzamento. Solitamente sono utilizzati come componenti di controventi dissipativi in edifici intelaiati. Possono essere disposti sia sul piano verticale che orizzontale.



# Dispositivi viscoelastici

## Comportamento

Equilibrio

$$\tau_E(t) + \tau_c(t) = \tau_s(t)$$

Compatibilità

$$\gamma_E(t) + \gamma_c(t) = \gamma_s(t)$$

$$\dot{\gamma}_E(t) + \dot{\gamma}_c(t) = \dot{\gamma}_s(t)$$

$$\frac{\dot{\tau}_E(t)}{G_E} + \frac{\tau_c(t)}{G_C} = \dot{\gamma}_s(t)$$

ovvero

$$\tau_E(t) = G_E \gamma_s(t)$$

$$\tau_c(t) = G_C \dot{\gamma}_s(t)$$



$$\tau_s(t) = G_E \gamma_s(t) + G_C \dot{\gamma}_s(t)$$

$$F(t) = \bar{k} x(t) + \bar{c} \dot{x}(t)$$

# Dispositivi di dissipazione viscosa lineare

Se si imprime un moto relativo di tipo sinusoidale  
agli estremi del dispositivo:

$$x(t) = X_0 \text{ sen } \omega t$$

la forza sviluppata dal dispositivo è:

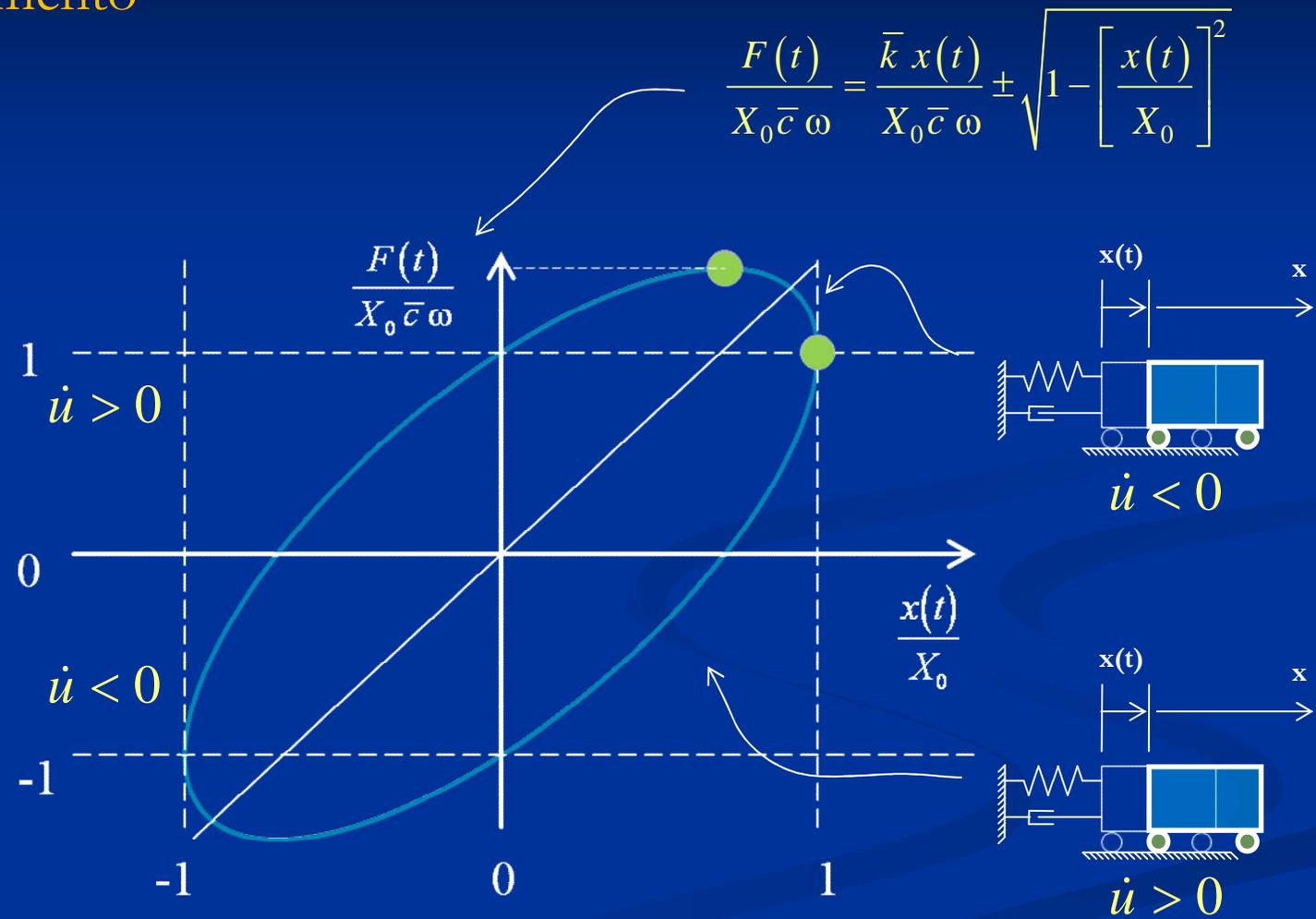
$$F(t) = \bar{k} X_0 \text{ sen } \omega t + \bar{c} X_0 \omega \text{ cos } \omega t$$

ovvero,  
ricordando che  $\text{cos } \omega t = \pm \sqrt{1 - \text{sen}^2 \omega t}$

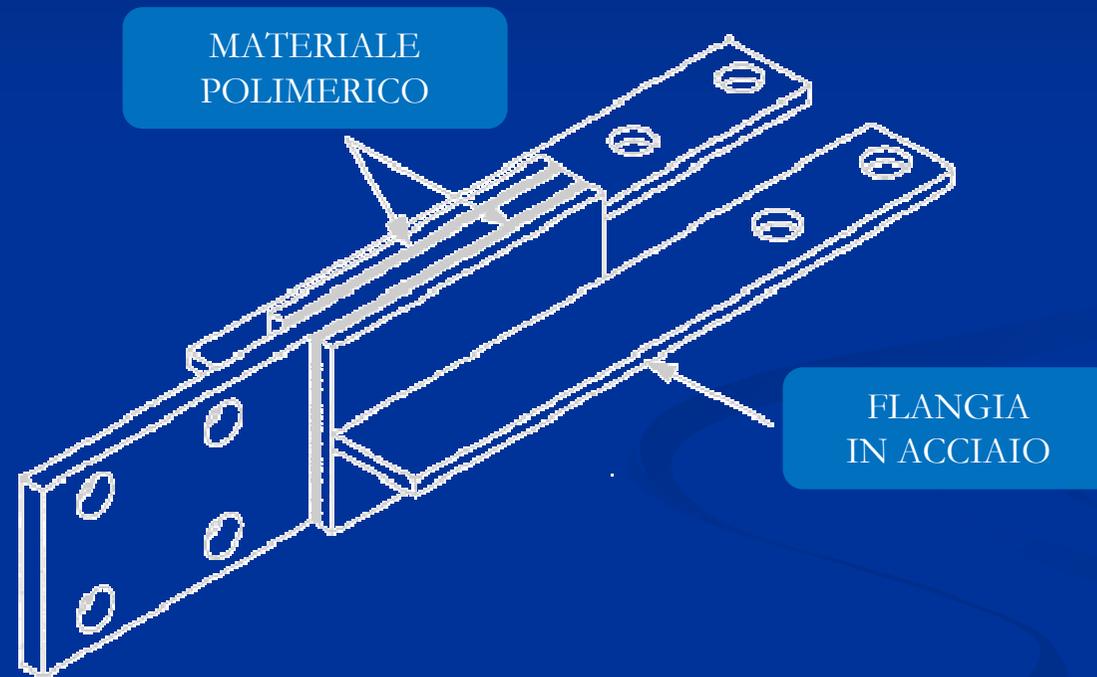
$$F(t) = \bar{k} x(t) \pm \bar{c} \omega \sqrt{X_0^2 - x^2(t)}$$

# Dispositivi viscoelastici

## Comportamento



# Dispositivi viscoelastici



Dissipatore viscoelastico

# Dispositivi di dissipazione viscoelastici

Il rapporto di smorzamento viscoso equivalente dei dispositivi viscoelastici

$$\xi = \frac{\bar{c}}{2\bar{\omega}m}$$

può essere scritto nella forma:

$$\xi = \frac{\bar{c}\bar{\omega}^2}{2\bar{\omega}\bar{k}} = \frac{\bar{c}\bar{\omega}}{2\bar{k}} = \frac{G_c\bar{\omega}}{2G_E} = \frac{\eta}{2}$$

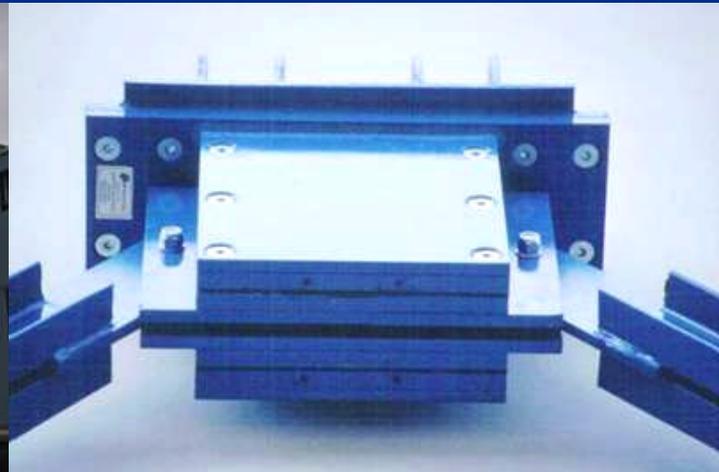
essendo

$G_E$  il modulo di carico del taglio

$G_c$  il modulo di perdita del taglio

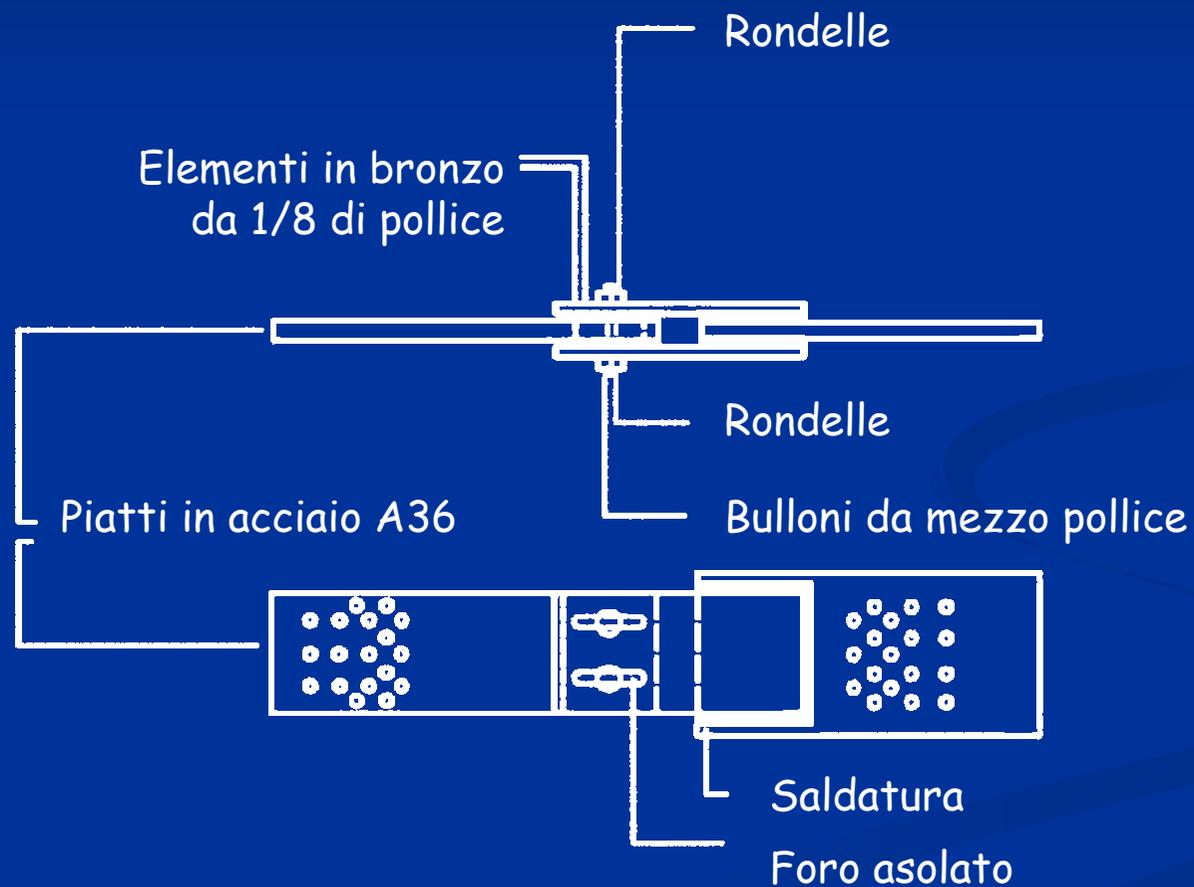
$\eta$  il modulo di perdita totale

# Dispositivi viscoelastici

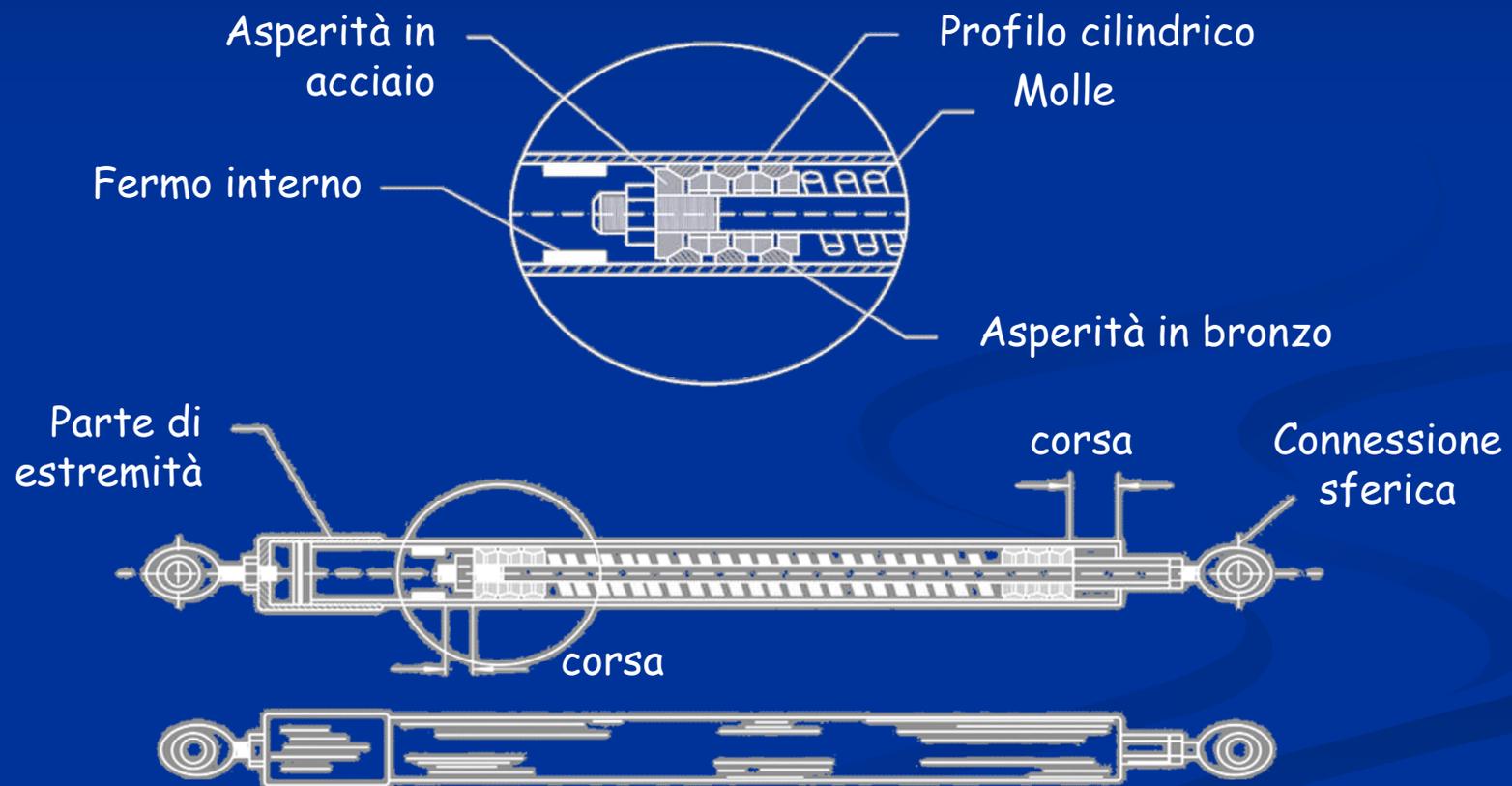


scuola Gentile Fermi, Fabriano (AN)

# Dispositivi di dissipazione ad attrito



# Dispositivi di dissipazione ad attrito



# Dispositivi ausiliari

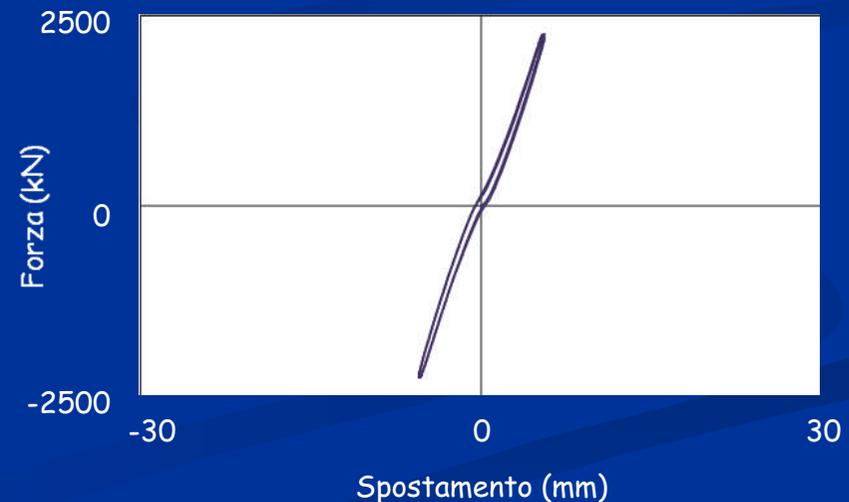
## Classificazione

### DISPOSITIVI DI VINCOLO RIGIDO

#### TEMPORANEO

#### VINCOLO DINAMICO

I dispositivi di vincolo dinamico, noti anche con il nome di shock transmitters, costituiscono un vincolo molto rigido a fronte di un'azione dinamica, mentre consentono i movimenti lenti delle strutture (ad esempio quelli prodotti dalle variazioni termiche)



# Dispositivi ausiliari

## Classificazione

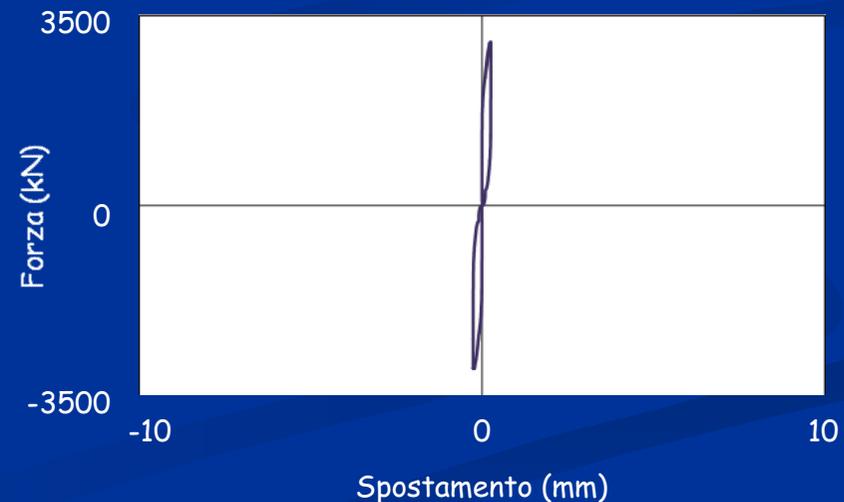
### DISPOSITIVI DI VINCOLO RIGIDO

#### PERMANENTE

##### Guide e ritegni

Le guide sono dispositivi meccanici che consentono lo scorrimento in una direzione del piano orizzontale, trasmettendo la forza nella direzione ortogonale.

I ritegni sono dispositivi meccanici fissi, che bloccano gli spostamenti del piano trasmettendo la forza in ogni direzione. Entrambi non trasferiscono carichi verticali.



# Dispositivi ausiliari

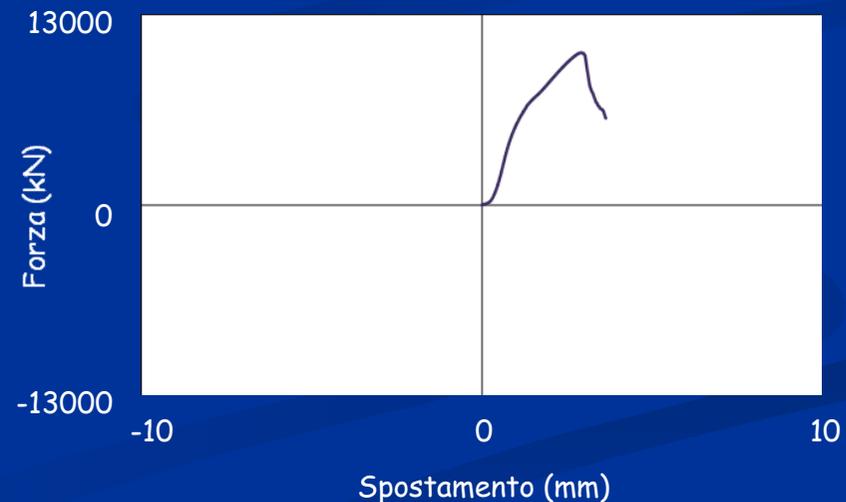
## Classificazione

### DISPOSITIVI DI VINCOLO RIGIDO

#### A fusibile meccanico

Impediscono i movimenti relativi fra le parti collegate sino al raggiungimento di una soglia di forza. Al superamento di tale forza, grazie alla rottura di un elemento sacrificale, consentono i movimenti prima bloccati.

Sono utilizzati per escludere il sistema di protezione sismica nelle condizioni di servizio.



# Sistemi isolati alla base

*Verifiche di normativa*

**Stato limite di danneggiamento (SLD)**

**Stato limite di salvaguardia della vita (SLV)**

**Stato limite di prevenzione del collasso (SLC)**

# Verifiche allo SLD

## Sottostruttura

Il livello di protezione richiesto per la sottostruttura e le fondazioni nei confronti dello SLD è da ritenere conseguito se sono soddisfatte le relative verifiche nei confronti dello SLV.

## Dispositivi d'isolamento

I dispositivi del sistema d'isolamento non devono subire danni che possano comprometterne il funzionamento nelle condizioni di servizio. Tale requisito si ritiene normalmente soddisfatto se sono soddisfatte le verifiche allo SLV dei dispositivi.

**Nota !** In caso di sistemi a comportamento non lineare, eventuali spostamenti residui al termine dell'azione sismica allo SLD devono essere compatibili con la funzionalità della costruzione.

# Verifiche allo SLD

## Sovrastruttura

La verifica allo SLD della sovrastruttura deve essere effettuata controllando che gli spostamenti interpiano ottenuti dall'analisi siano inferiori ai  $2/3$  dei limiti indicati per lo SLD degli edifici.

**Nota !** (si vuole garantire un livello di protezione maggiore anche agli elementi non strutturali degli edifici con isolamento sismico)

## Connessioni strutturali e non strutturali

Le eventuali connessioni, strutturali e non, particolarmente quelle degli impianti, fra la struttura isolata e il terreno o le parti di strutture non isolate, devono assorbire gli spostamenti relativi corrispondenti allo SLD senza subire alcun danno o limitazione d'uso.

# Verifiche allo SLV

## Sottostruttura

Se il modello include anche la sottostruttura,  
gli elementi della sottostruttura devono essere verificati  
rispetto alle sollecitazioni ottenute direttamente dall'analisi.

# Verifiche allo SLV

## Sottostruttura

Se il modello non include la sottostruttura,

gli elementi della sottostruttura devono essere verificati rispetto alle sollecitazioni prodotte dalle forze trasmesse dal sistema d'isolamento combinate con le sollecitazioni prodotte dalle accelerazioni del terreno direttamente applicate alla sottostruttura.

Nel caso in cui la sottostruttura possa essere assunta infinitamente rigida (periodo proprio inferiore a 0,05s),

le forze d'inerzia direttamente applicate ad essa possono essere assunte pari al prodotto delle masse della sottostruttura per l'accelerazione del terreno  $a_g$ .

La combinazione delle sollecitazioni può essere effettuata mediante la regola della radice quadrata della somma dei quadrati.

# Verifiche allo SLV

## Parti non dissipative dei dispositivi d'isolamento sismico (ovvero bulloni e piastre di ancoraggio)

Le parti dei dispositivi non impegnate nella funzione dissipativa devono rimanere in campo elastico e comunque con un coefficiente di sicurezza almeno pari a 1.5.

## Conessioni strutturali e non strutturali

Nelle costruzioni di classe d'uso IV, le eventuali connessioni, strutturali e non, particolarmente quelle degli impianti, fra la struttura isolata e il terreno o le parti di strutture non isolate devono assorbire gli spostamenti relativi previsti dal calcolo, senza danni.

# Verifiche allo SLV

## Sovrastruttura

Le condizioni di resistenza degli elementi strutturali della sovrastruttura possono essere soddisfatte considerando gli effetti dell'azione sismica divisi del fattore  $q=1.50$  e combinati con le altre azioni.

# Verifiche allo SLC

## Dispositivi di isolamento

I dispositivi del sistema d'isolamento devono essere in grado di sostenere, senza rotture, gli spostamenti valutati per un terremoto avente probabilità di superamento pari a quella prevista per lo *SLC*.

*Nel caso di sistemi a comportamento non lineare, allo spostamento ottenuto con l'azione sismica detta, occorre aggiungere il maggiore tra*

- *lo spostamento residuo allo *SLD* e*
- *il 50% dello spostamento corrispondente all'annullamento della forza, seguendo il ramo di scarico a partire dal punto di massimo spostamento raggiunto allo *SLD*.*

# Verifiche allo SLC

## Impianti pericolosi

Le connessioni del gas e di altri impianti pericolosi che attraversano i giunti di separazione debbono essere progettate per consentire gli spostamenti relativi della sovrastruttura isolata, con lo stesso livello di sicurezza adottato per il progetto del sistema d'isolamento.

**... ma come vanno scelti gli isolatori ?**

# Dispositivi elastomerici

## Specifiche di progetto

Per la scelta dei dispositivi elastomerici occorre generalmente considerare e specificare :

1. Carico verticale massimo;
2. Rigidezza orizzontale;
3. Deformazione laterale massima;
4. Smorzamento viscoso equivalente.

Alternativamente, lo smorzamento equivalente può essere sostituito dalla proprietà della miscela della gomma (per esempio morbida, normale e dura).

Nel caso di dispositivi con elemento in piombo occorre specificare anche le caratteristiche fisiche dell'elemento centrale.

# Dispositivi elastomerici

Specifiche di progetto

Carico verticale massimo

Si ricava normalmente dalla situazione di progetto non sismica



**Combinazione fondamentale**

generalmente impiegata per gli stati limite ultimi

$$\gamma_{G1}G_1 + \gamma_{G2}G_2 + \gamma_P P + \gamma_{Q1}Q_{k1} + \gamma_{Q2}\Psi_{02}Q_{k2} + \gamma_{Q3}\Psi_{03}Q_{k3} + \dots$$

# Dispositivi elastomerici

## Specifiche di progetto

### Rigidezza orizzontale

Si ricava in funzione del periodo desiderato per la struttura isolata alla base

$$T_{is} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_{eff}}} = T^*$$

ovvero

$$K_{eff} = \left(\frac{2\pi}{T^*}\right)^2 M$$

Nel considerare questa relazione per il periodo fondamentale della struttura isolata si trascura:

- la deformabilità della sovrastruttura
- l'effetto dell'asimmetria sul piano di isolamento

Ovviamente, se desidero che il periodo della struttura isolata sia almeno  $T^*$ , la rigidezza a taglio dei dispositivi deve essere al massimo quella risultante dalla relazione precedente.

# Dispositivi elastomerici

## Specifiche di progetto

La rigidezza globale  $K_{eff}$  può essere :

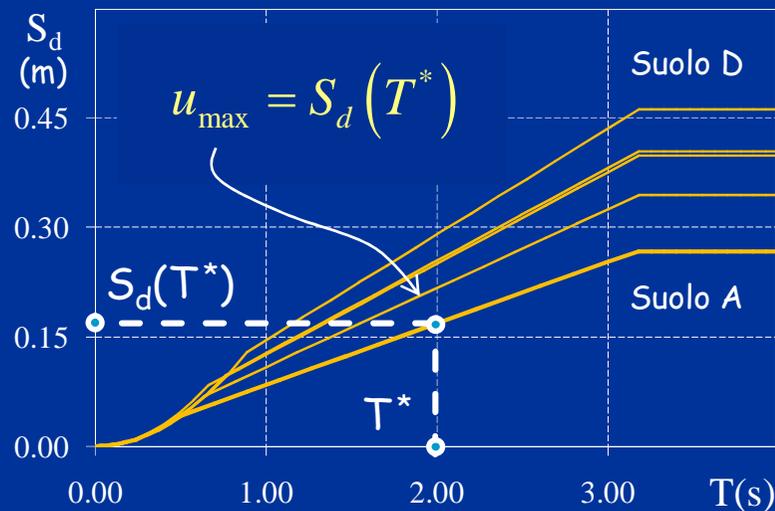
- divisa per il numero totale di pilastri  
(supponendo che al sotto di ogni pilastro ci sia un isolatore elastomerico e che il tipo di isolatore sia unico)
- ripartita non uniformemente tra gli isolatori al di sotto dei pilastri  
(supponendo che al sotto di ogni pilastro ci sia un isolatore elastomerico)
- divisa per un numero inferiore al numero totale di pilastri  
(supponendo che al di sotto dei pilastri ci siano isolatori elastomeri oppure isolatori a scorrimento a superficie piana)

# Dispositivi elastomerici

## Specifiche di progetto

### Spostamento laterale massimo e smorzamento viscoso equivalente

Lo spostamento laterale max richiesto all'isolatore si ricava dallo spettro in termini di spostamento in corrispondenza del periodo desiderato per la struttura isolata



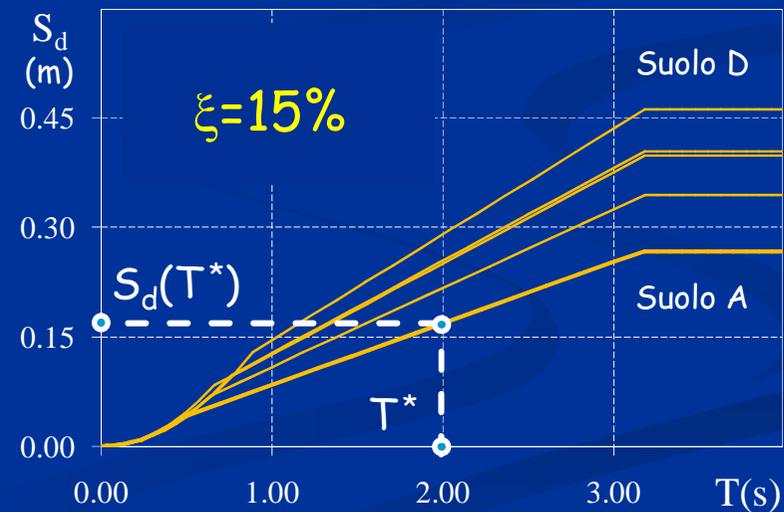
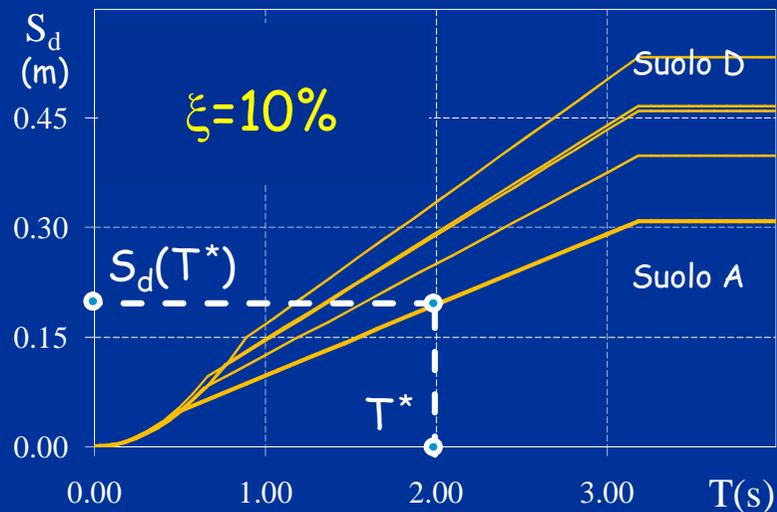
Lo spettro da utilizzare è

- riferito allo SLC della struttura
- definito per lo smorzamento viscoso equivalente corrispondente al primo modo di vibrazione della struttura (sostanzialmente quello dei dispositivi di isolamento e di eventuali dispositivi ausiliari)

# Dispositivi elastomerici

## Specifiche di progetto

La scelta di un determinato periodo della struttura isolata e del livello di smorzamento viscoso equivalente governano, su un predeterminato suolo di fondazione, l'entità dello spostamento max richiesto al dispositivo di isolamento.



# Dispositivi elastomerici

## Specifiche di progetto

Ricorda che nel caso di un isolatore elastomerico classico la rigidezza laterale dell'isolatore e lo spostamento laterale sono legati alle caratteristiche meccaniche e fisiche dalle relazioni :

$$k_{eff} = GA/t_r$$

$$u_{max} = \gamma t_r$$

dove :

$G$  è il modulo a taglio dell'elastomero

$A$  è l'area trasversale totale dell'elastomero

$t_r$  è lo spessore totale dell'elastomero

$\gamma$  è la deformazione a taglio dell'elastomero

# Dispositivi a scorrimento

## Specifiche di progetto

Per la scelta dei dispositivi a scorrimento occorre generalmente considerare e specificare:

1. Carico verticale massimo;
2. Deformazione laterale massima;
3. Raggio di curvatura (semplice o doppia);
4. Smorzamento viscoso equivalente.

# Dispositivi a scorrimento

Specifiche di progetto

## Raggio di curvatura

Si ricava in funzione del periodo desiderato per la struttura isolata alla base

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}}$$

ovvero

$$R = \left( \frac{T^*}{2\pi} \right)^2 g$$

Ovviamente, se desidero che il periodo della struttura isolata sia almeno  $T^*$ , il raggio di curvatura deve essere almeno quello risultante dalla relazione precedente.

... particolari di progetto  
dell'interfaccia d'isolamento

# Isolamento alla base

*Messa in opera dei dispositivi*



Messa in opera di isolatori elastomerici

# Isolamento alla base

Messa in opera dei dispositivi



Messa in opera di isolatori elastomerici

# Isolamento alla base

Messa in opera dei dispositivi



Messa in opera di isolatori elastomerici  
(scuola di Mazabotto - Bologna)

# Isolamento alla base

## Ispezione e sostituzione dei dispositivi di isolamento

L'alloggiamento dei dispositivi d'isolamento ed il loro collegamento alla struttura devono essere concepiti in modo da assicurarne l'accesso e rendere i dispositivi stessi ispezionabili e sostituibili.

**Attenzione quindi a concepire l'operazione  
di sostituzione dei dispositivi nella fase di progetto  
e  
a lasciare gli spazi necessari  
al posizionamento dei martinetti !**

# Isolamento alla base

Ispezione e sostituzione dei dispositivi di isolamento



Diversi posizionamenti di dispositivi elastomerici

# Isolamento alla base

Ispezione e sostituzione dei dispositivi di isolamento



Isolatori elastomerici tra travi di fondazione e travi di elevazione

# Isolamento alla base

Progetto dei sistemi di contrasto per il ricentraggio dei dispositivi

È necessario anche prevedere adeguati sistemi di contrasto, idonei a consentire l'eventuale ricentraggio dei dispositivi qualora, a seguito di un sisma, si possano avere spostamenti residui incompatibili con la funzionalità della costruzione e/o con il corretto comportamento del sistema d'isolamento.

**Ma quali sono gli spostamenti residui prevedibili per la struttura isolata e quali le forze necessarie a ripristinare la configurazione iniziale ?**

# Isolamento alla base

## Protezione dei dispositivi di isolamento

Ove necessario, gli isolatori devono essere protetti da possibili effetti derivanti da attacchi del fuoco, chimici o biologici

**ovvero anche ratti,  
polvere per isolatori a scorrimento ..**

In alternativa, occorre prevedere dispositivi che, in caso di distruzione degli isolatori, siano idonei a trasferire il carico verticale alla sottostruttura.

# Isolamento alla base

Protezione dal fuoco



Protezione dal fuoco (Universita' della Basilicata - Potenza)

# Isolamento alla base

Percorso alternativo per il trasferimento dei carichi verticali



Dispositivi alternativi per il trasferimento dei carichi verticali alla sottostruttura

# Isolamento alla base

Limitazione degli spostamenti

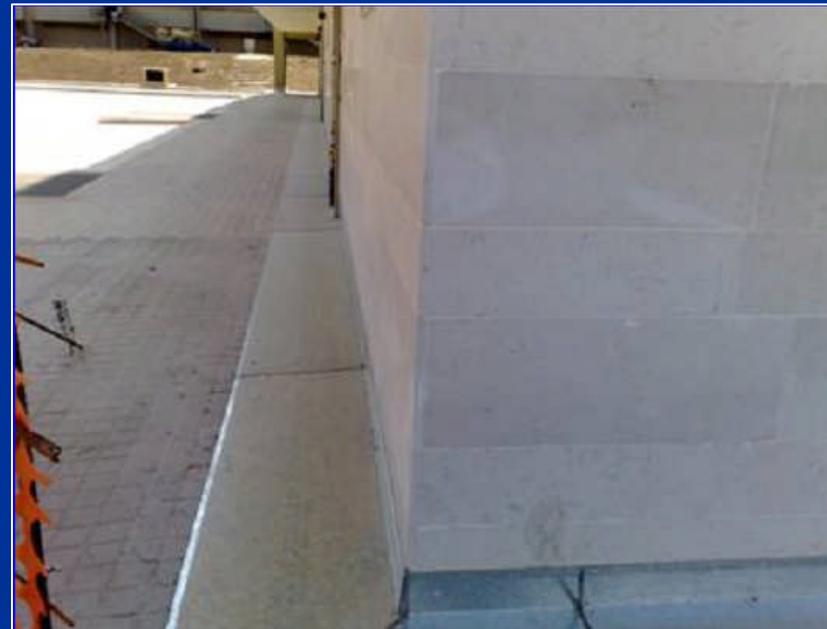


# Isolamento alla base

## Protezione dell'intercapedine

Deve essere previsto adeguato spazio tra la sovrastruttura e le costruzioni circostanti per consentire liberamente gli spostamenti sismici in tutte le direzioni.

Occorre porre attenzione per proteggere, ovvero coprire, tale intercapedine.



# Isolamento alla base

Protezione del gap



Palazzina residenziale isolata sismicamente con HDRB a Shantou nel 1994, prima applicazione cinese di moderni sistemi d'isolamento: si noti la scala d'accesso vincolata alla sovrastruttura ed il gap verticale che essa presenta rispetto al terreno circostante

# Isolamento alla base

## Elementi d'interfaccia

Occorre far si' che gli elementi d'interfaccia (tubazioni del gas, acqua e fognatura) non si rompano durante il moto della struttura isolata.

Per evitare la loro rottura occorre inserire elementi flessibile

# Isolamento alla base

## Elementi d'interfaccia



Elementi di interfaccia

# Isolamento alla base

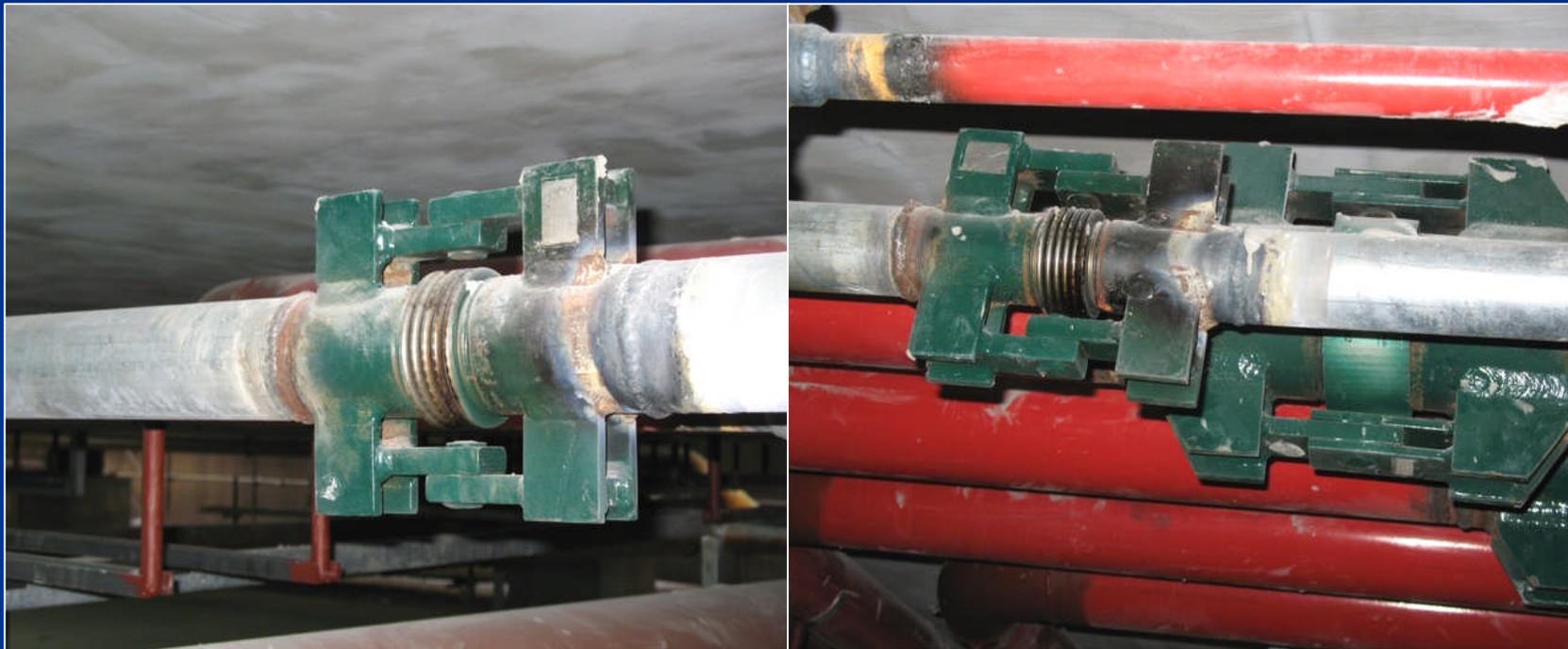
Elementi d'interfaccia



Elementi di interfaccia

# Isolamento alla base

Elementi d'interfaccia



Elementi di interfaccia

# Isolamento alla base

Elementi d'interfaccia



Elementi di interfaccia

# Sistemi isolati alla base

## Aspetti costruttivi

Nell'ambito del progetto si deve redigere un piano di qualità riguardante

- la progettazione dei dispositivi
- la costruzione
- la messa in opera
- la manutenzione
- Le verifiche analitiche

# Sistemi isolati alla base

## Aspetti costruttivi

I documenti di progetto devono indicare

- i dettagli,
- le dimensioni
- le prescrizioni sulla qualità,
- eventuali dispositivi di tipo speciale
- le tolleranze concernenti la messa in opera.

Elementi che richiedano particolari controlli durante le fasi di costruzione e messa in opera devono essere indicati negli elaborati grafici di progetto, insieme alle procedure di controllo da adottare.

# Sistemi isolati alla base

## Aspetti costruttivi

Il piano di qualità deve prevedere anche

- le modalità di installazione dei dispositivi durante la fase di costruzione dell'opera da isolare,
- i controlli periodici,
- gli interventi di manutenzione
- gli interventi di sostituzione, durante la vita nominale della struttura, la cui durata deve essere specificata nei documenti di progetto.,

# Sistemi isolati alla base

## Aspetti costruttivi

Ai fini della qualità della posa in opera, gli isolatori devono essere installati da personale specializzato, sulla base di un disegno planimetrico recante

- le coordinate di ciascun dispositivo
- la quota di ciascun dispositivo
- l'entità e la preregolazione degli eventuali dispositivi mobili a rotolamento,
- le dimensioni delle eventuali nicchie predisposte nei getti di calcestruzzo per accogliere staffe o perni di ancoraggio,
- le caratteristiche delle malte di spianamento e di sigillatura.

# Sistemi isolati alla base

## Sostituzione dei dispositivi di isolamento

Ai fini della sostituzione degli isolatori, il progetto delle strutture deve prevedere la possibilità di trasferire temporaneamente i carichi verticali dalla sovrastruttura alla sottostruttura per il tramite di martinetti oleodinamici, adiacenti all'isolatore da sostituire.

A tale scopo il progetto delle strutture può prevedere nicchie per l'inserimento dei martinetti tra la sottostruttura e la sovrastruttura ovvero altre disposizioni costruttive equivalenti.

# Sistemi isolati alla base

## Manutenzione

I percorsi, che consentono al personale addetto di raggiungere e di ispezionare gli isolatori, devono essere previsti e riportati sul progetto esecutivo delle strutture portanti e su quello delle eventuali murature di tamponamento, in modo da garantire l'accessibilità al dispositivo da tutti i lati.

Le risultanze delle visite periodiche di controllo devono essere annotate su un apposito documento, che deve essere conservato con il progetto della struttura isolata durante l'intera vita di utilizzazione della costruzione.

La normativa  
e  
i controlli su materiali e dispositivi

# Isolatori elastomerici

## Prescrizioni di normativa

Gli isolatori devono avere pianta con due assi di simmetria ortogonali, così da presentare un comportamento il più possibile indipendente dalla direzione della azione orizzontale agente.

Ai fini della determinazione degli effetti di azioni perpendicolari agli strati, le loro dimensioni utili debbono essere riferite alle dimensioni delle piastre in acciaio, depurate di eventuali fori, mentre per gli effetti delle azioni parallele alla giacitura degli strati si considererà la sezione intera dello strato di gomma.

Le piastre di acciaio devono essere conformi a quanto previsto nelle norme per gli apparecchi di appoggio, ovvero

allungamento minimo a rottura	18%		
spessore minimo pari a	2	mm	per le piastre
interne			
	20	mm	per le piastre
esterne			

# Isolatori elastomerici

## Prescrizioni di normativa

	Fornitura	Invecchiamento	Temperatura	Frequenza di prova
$k_{\text{eff}}$	$\pm 20\%$	$\pm 20\%$	$\pm 20\%$	$\pm 20\%$
$k_v$	-30%	-	-	-
$\xi_{\text{eff}}$	$\pm 20\%$	$\pm 20\%$	$\pm 20\%$	$\pm 20\%$

Le variazioni devono essere valutate con riferimento al 3° ciclo di prova. Le frequenze di prova per valutare le variazioni delle caratteristiche meccaniche sono 0.1Hz e 0.5Hz.

Le variazioni dovute al carico verticale, valutate come differenza tra i valori corrispondenti al carico verticale massimo ed a quello minimo, non dovranno superare il 15% del valore di progetto.

# Prove su materiali e dispositivi

## *Prescrizioni di normativa*

- Prove di accettazione sui materiali
- Prove di qualificazione dei dispositivi
- Prove di accettazione dei dispositivi

# Prove di accettazione sui materiali elastomerici

Le prove di accettazione sui materiali sono quelle previste dalle norme sugli apparecchi di appoggio, con le seguenti variazioni ed aggiunte:

- le prove di invecchiamento vanno effettuate per 21 giorni a 70°C; la variazione del modulo  $G$  deve essere contenuta entro il 20% del valore iniziale;
- il modulo  $G$  deve essere determinato anche per una deformazione tangenziale pari a  $\pm 100\%$ .

# Prove di qualificazione sui dispositivi elastomerici

Le prove di qualificazione sui dispositivi, possono essere estese a tutti i dispositivi geometricamente simili (rapporti di scala geometrica compresi tra 0.5 e 2, fattore di forma primario  $S_1$  uguale, con tolleranza del  $\pm 10\%$ , fattore di forma secondario  $S_2$  uguale o maggiore) e prodotti con gli stessi materiali di quelli provati.

## Nota !

Le prove devono essere effettuate nell'ordine e con le modalità specificate a non meno di

- due giorni di distanza dalla vulcanizzazione per dispositivi di dimensioni inferiori ai 700 mm
- quattro giorni per dispositivi più grandi

così da avere una temperatura uniforme sull'intero dispositivo.

# Prove di qualificazione sui dispositivi elastomerici

## Prove di qualificazione

- Determinazione statica della rigidità a compressione
- Determinazione statica del modulo di taglio
- Determinazione dinamica del modulo di taglio e dello smorzamento
- Determinazione delle curve  $G-\gamma$  e  $\xi-\gamma$  mediante prove dinamiche cicliche
- Valutazione della stabilità
- Valutazione della capacità di spostamento ciclico sotto carico verticale di progetto
- Valutazione dell'efficacia dell'aderenza elastomero-acciaio
- Determinazione delle caratteristiche di creep

# Prove di qualificazione sui dispositivi elastomerici

## Determinazione statica della rigidità a compressione

tra il 30% e il 100% del carico verticale  $N$  di progetto, opportunamente scalato, in presenza di sisma, somma dei carichi verticali dovuti a permanenti ed accidentali moltiplicati per opportuni coefficienti ed alle eventuali azioni concomitanti (forze orizzontali, spostamenti e rotazioni);

# Prove di qualificazione sui dispositivi elastomerici

## Determinazione statica del modulo di taglio

sotto compressione costante e pari a 6 MPa, o al valore della tensione di compressione di progetto (con una tolleranza del  $\pm 20\%$ ) se questa è superiore a 8 MPa.

Il modulo statico di taglio  $G$  e' convenzionalmente definito come il modulo secante tra le deformazioni di taglio corrispondenti agli spostamenti  $0.27t_e$  e  $0.58t_e$  ottenuti mediante prove di carico-scarico fino a uno spostamento massimo pari a  $t_e$  e in corrispondenza del 3° ciclo;

# Prove di qualificazione sui dispositivi elastomerici

## Determinazione dinamica del modulo di taglio e dello smorzamento

sotto compressione costante e pari a 6 MPa, o al valore della tensione di compressione di progetto (con una tolleranza del  $\pm 20\%$ ) se questa è superiore a 8 MPa.

Il modulo dinamico di taglio  $G_{din}$  e lo smorzamento  $\xi$  sono valutati mediante prove cicliche sinusoidali alla frequenza di 0.5 Hz e  $\gamma=1$  ed in corrispondenza del 3° ciclo.

In particolare, il modulo a taglio  $G_{din} = Ft_e/(Ad)$  e' valutato come modulo secante in corrispondenza di  $d/t_e=1$ , con l'obbligo per  $G_{din}$  di ricadere nell'intervallo 0.35-1.50 MPa;

# Prove di qualificazione sui dispositivi elastomerici

## Determinazione delle curve $G-\gamma$ e $\xi-\gamma$ mediante prove dinamiche cicliche

per i seguenti valori di  $\gamma$ : 0.05, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0  $\gamma_{\max}$ , e, comunque, per deformazioni corrispondenti, nel dispositivo reale, a spostamenti non inferiori a  $\pm 0.1 d_2$ ,  $\pm 0.2 d_2$ ,  $\pm 0.3 d_2$ ,  $\pm 0.5 d_2$ ,  $\pm 0.7 d_2$ ,  $\pm d_2$ , effettuando almeno 5 cicli per ciascuna ampiezza;

$\gamma_{\max}$  sarà preso pari a

1.5            se in corrispondenza di  $d_2$  risulta  $\gamma < 1.5$ ,  
2                se  $1.5 < \gamma < 2$ .

# Prove di qualificazione sui dispositivi elastomerici

## Valutazione della stabilita'

sotto compressione e taglio. La valutazione e' effettuata accertandosi che il dispositivo rimanga stabile se assoggettato ad uno spostamento orizzontale pari ad  $1.8 t_e$  in presenza di un carico verticale pari sia ad  $1.5 N_{max}$  che a  $0.5 N_{min}$  (indicando con  $N_{max}$  e  $N_{min}$  rispettivamente i valori massimo e minimo di N)

## Valutazione della capacita' di spostamento ciclico sotto carico verticale di progetto

sotto compressione costante e pari a 6 MPa, o al valore della tensione di compressione di progetto (con una tolleranza del  $\pm 20\%$ ) se questa è superiore a 8 MPa. Il dispositivo deve sopportare almeno 10 cicli con spostamento massimo impresso almeno pari a  $d_2$ .

# Prove di qualificazione sui dispositivi elastomerici

## Valutazione dell'efficacia dell'aderenza elastomero-acciaio

sotto compressione costante e pari a 6 MPa, o al valore della tensione di compressione di progetto (con una tolleranza del  $\pm 20\%$ ) se questa è superiore a 8 MPa, a una deformazione  $\gamma \geq 2.5$  senza che si verifichino danni.

Qualora in corrispondenza dello spostamento di progetto, il dispositivo subisca una deformazione  $\gamma < 1.5$  il dispositivo può essere caratterizzato per una deformazione  $\gamma = 2.0$ ;

# Prove di qualificazione sui dispositivi elastomerici

## Determinazione delle caratteristiche di creep

sotto compressione costante e pari al valore della tensione di compressione di progetto, con una tolleranza del  $\pm 20\%$ , della durata di almeno 7 giorni.

La deformazione verticale per creep deve essere inferiore al 20% della deformazione statica sotto il carico N;

Il valore di riferimento della deformazione statica sarà assunto pari a quello misurato dopo 10 minuti dall'inizio dell'applicazione del carico.

# Prove di qualificazione sui dispositivi elastomerici

Le prove di qualificazione devono essere effettuate su almeno 4 dispositivi, due per le prove senza invecchiamento e due per le prove dopo invecchiamento artificiale, ottenuto mantenendo i dispositivi di prova per 21 giorni a 70°C.

L'invecchiamento dovrà comunque essere preceduto dalla determinazione statica della rigidità a compressione e del modulo statico di taglio  $G$ , per valutare le caratteristiche dei dispositivi sottoposti a invecchiamento prima dell'invecchiamento stesso. I valori di  $G$  dopo l'invecchiamento non devono superare di 1.15 volte i valori di  $G$  prima dell'invecchiamento.

# Prove di qualificazione sui dispositivi elastomerici

*I dispositivi sottoposti a prove di qualificazione non potranno essere utilizzati nella costruzione.*

I dispositivi sottoposti a prove di qualificazione potranno essere utilizzati nella costruzione previa verifica della loro perfetta integrità a seguito delle prove, da accertare attraverso la successiva effettuazione delle prove di accettazione ed il controllo dei relativi parametri di verifica.

# Prove di qualificazione sui dispositivi elastomerici

La validità delle prove di invecchiamento potrà essere estesa a tutti i dispositivi realizzati con la stessa mescola, indipendentemente dai rapporti di forma.

Per qualificare lo stesso dispositivo per diversi valori della tensione di compressione le prove possono essere ripetute in sequenza sugli stessi dispositivi da qualificare, verificando che tra una prova e la successiva non si siano verificati danni ai dispositivi.

# Prove di accettazione sui dispositivi elastomerici

## Attenzione !

Le prove di accettazione devono essere effettuate su :

- almeno il 20% dei dispositivi
- almeno 4 dispositivi
- non più del numero di dispositivi da mettere in opera.

Le prove di accettazione si riterranno superate se :

1. il modulo statico di taglio  $G$  non differisce di oltre il  $\pm 10\%$  da quello delle prove di qualificazione
2. i risultati delle prove di seguito elencate soddisfano i limiti stabiliti per esse.

# Prove di accettazione sui dispositivi elastomerici

## Prove di accettazione

- misura della geometria esterna, che dovrà rispettare le tolleranze prescritte per gli apparecchi di appoggio, con la deroga dei dispositivi di altezza  $> 100$  mm per i quali la tolleranza sulle altezze è di 6mm;
- determinazione statica della rigidità verticale tra il 30% e il 100% del carico verticale  $V$ ;
- determinazione del modulo statico di taglio  $G$  o del modulo dinamico di taglio  $G_{din}$ , con le modalità specificate per le prove di qualificazione; il modulo dinamico è da preferire poiché riduce le incertezze sul controllo del reale comportamento dinamico.
- valutazione di efficacia dell'aderenza elastomero-acciaio, con le modalità specificate per le prove di qualificazione, ma adottando per la deformazione  $\gamma$  il valore corrispondente allo spostamento  $d_2$ .

# Isolatori a scorrimento

## Prescrizioni di normativa

Le superfici di scorrimento in acciaio e PTFE devono essere conformi alla normativa vigente per gli apparecchi di appoggio.

Gli isolatori a scorrimento devono essere in grado di sopportare, sotto spostamento massimo impresso pari a  $1.2 d_2$ , almeno 10 cicli di carico e scarico.

I cicli si riterranno favorevolmente sopportati se il coefficiente d'attrito ( $f$ ), nei cicli successivi al primo, non varierà di più del 25% rispetto alle caratteristiche riscontrate durante il terzo ciclo, ossia

$$|f(i) - f(3)| / f(3) < 0.25$$

avendo indicato con

il pedice "(i)" le caratteristiche valutate all'i-esimo ciclo  
il pedice "(3)" le caratteristiche valutate al terzo ciclo.

# Isolatori a scorrimento

## Prescrizioni di normativa

Detto  $d_{dc}$  lo spostamento massimo di progetto del centro di rigidità del sistema d'isolamento, corrispondente allo SLC,

qualora l'incremento della forza nel sistema di isolamento per spostamenti tra  $0,5 d_{dc}$  e  $d_{dc}$  sia inferiore all' 1.25% del peso totale della sovrastruttura, gli isolatori a scorrimento debbono essere in grado di garantire la loro funzione di appoggio fino a spostamenti pari ad  $1.25 d_2$ .

Si deve verificare che il coefficiente d'attrito sia sempre inferiore al valore di progetto per variazioni nell'ambito della fornitura, della temperatura e della frequenza di prova.

# Prove di accettazione sui materiali

## *Prescrizioni di normativa*

Le prove di accettazione sulle superfici di scorrimento sono quelle previste dalle norme per gli apparecchi di appoggio.

# Prove di qualificazione sui dispositivi a scorrimento

Le prove di qualificazione sui dispositivi, che possono essere estese a tutti i dispositivi geometricamente simili (rapporti di scala geometrica compresi tra 0,5 e 2) e prodotti con gli stessi materiali di quelli provati sono le seguenti:

## Prove di accettazione

- Determinazione statica del coefficiente d'attrito
- Determinazione dinamica del coefficiente d'attrito
- Valutazione della capacità di spostamento ciclico sotto carico verticale di progetto

# Prove di qualificazione sui dispositivi a scorrimento

## Determinazione statica del coefficiente d'attrito

per almeno tre valori della compressione, costanti durante la prova, pari a

- carico verticale  $V$  di esercizio
- carico di progetto sotto azioni sismiche  $V_{\max}$  e a  $V_{\min}$ , opportunamente scalati;

# Prove di qualificazione sui dispositivi a scorrimento

## Determinazione dinamica del coefficiente d'attrito

per almeno tre valori della compressione, costanti durante la prova,  
pari a

- carico verticale  $V$  di esercizio,
- carico di progetto sotto azioni sismiche  $N_{max}$  e  $N_{min}$ , opportunamente scalati,

per tre valori della velocità (frequenza),  
pari a

- velocità di progetto
- velocità di progetto variata del  $\pm 30\%$ .

# Prove di qualificazione sui dispositivi a scorrimento

## Valutazione della capacita' di spostamento ciclico sotto carico verticale di progetto

sotto compressione costante e pari al valore della tensione di compressione di progetto, con una tolleranza del  $\pm 20\%$ . Il dispositivo deve sopportare almeno 10 cicli con spostamento massimo impresso almeno pari a  $d_2$ .

# Prove di accettazione sui dispositivi a scorrimento

## Attenzione !

Le prove di accettazione devono essere effettuate su :

- almeno il 20% dei dispositivi
- almeno 4 dispositivi
- non più del numero di dispositivi da mettere in opera.

Qualora gli isolatori fossero dotati di elementi o meccanismi supplementari atti a migliorarne le prestazioni sismiche, su almeno un dispositivo completo di tali parti supplementari verrà anche condotta una prova "quasi statica", imponendo almeno 5 cicli completi di deformazioni alternate, con ampiezza massima pari a  $\pm d_2$ .

Il dispositivo non potrà essere utilizzato nella costruzione, a meno che il suo perfetto funzionamento non sia ripristinabile con la sostituzione degli elementi base.

# Prove di accettazione sui dispositivi a scorrimento

Le prove di accettazione sui dispositivi saranno effettuate con le modalità già viste per le prove di qualificazione.

## Prove di accettazione

- Verifica delle tolleranze dimensionali delle superfici di scorrimento come previste dalle norme per gli apparecchi di appoggio.
- Determinazione statica del coefficiente d'attrito, per almeno tre valori della compressione, costanti durante la prova, pari a :
  - carico verticale  $N$  di esercizio,
  - carico di progetto sotto azioni sismiche  $N_{\max}$  e  $N_{\min}$ .

**Quali sono i principi di  
progettazione stabiliti dalla  
normativa ?**

# Principi di progettazione

Negli edifici,

le strutture del piano di posa degli isolatori e  
le strutture del piano da cui spicca la sovrastruttura

devono essere dimensionate in modo da assicurare un  
comportamento rigido nel piano suddetto,  
così da limitare gli effetti di spostamenti sismici differenziali.

# Principi di progettazione

La condizione si considera soddisfatta se

**1.** un diaframma rigido costituito

- da un solaio in c.a. oppure
- da una griglia di travi progettata  
tenendo conto di possibili fenomeni di instabilità

è presente sia al di sopra che al di sotto del sistema di isolamento

**2.** se i dispositivi del sistema di isolamento sono fissati ad entrambi i diaframmi o direttamente o attraverso elementi verticali il cui spostamento orizzontale in condizioni sismiche sia minore di 1/20 dello spostamento relativo del sistema di isolamento.

Tali elementi verticali devono rispondere in campo elastico

**Nota !**

In caso contrario deve essere considerata la variabilità spaziale del moto del terreno.

# Principi di progettazione

Per minimizzare gli effetti torsionali

➤ le proiezioni

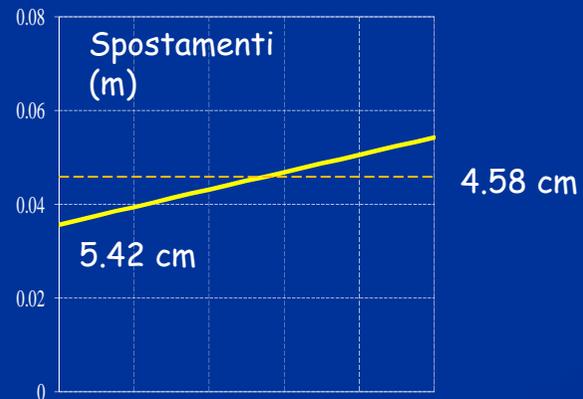
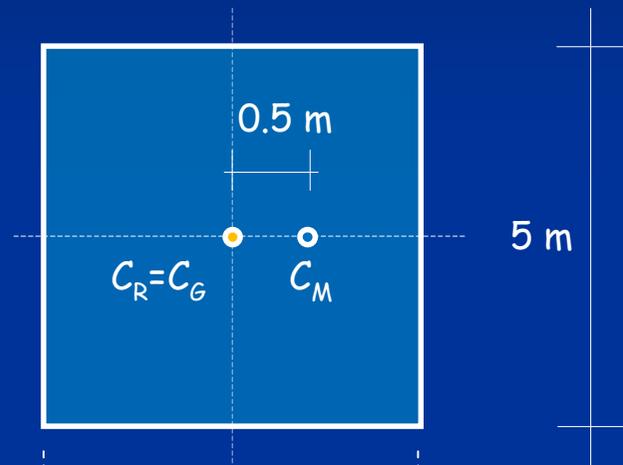
del centro di massa della sovrastruttura sul piano degli isolatori del centro di rigidità dei dispositivi di isolamento

o, nel caso di sottostruttura flessibile,  
il centro di rigidità del sistema sottostruttura-isolamento  
devono essere, per quanto possibile, coincidenti.

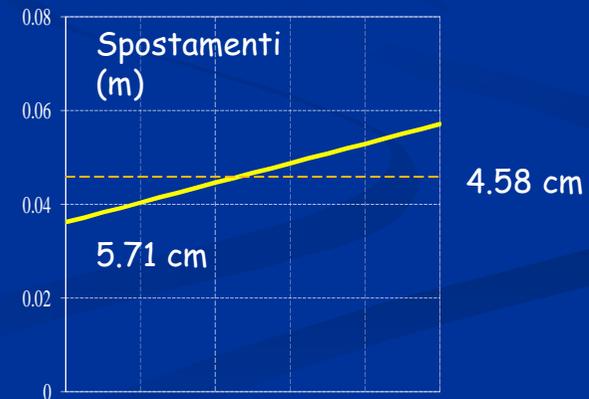
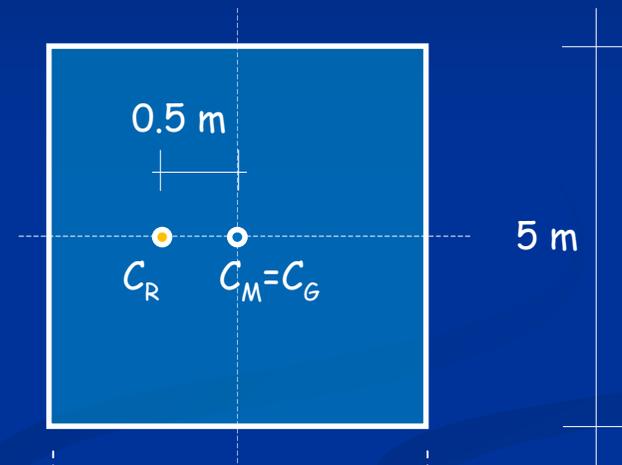
# Sistemi asimmetrici (non isolati)

## Esempi

Caso 1



Caso 2



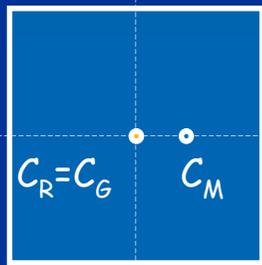
# Sistemi asimmetrici (isolati)

## Esempi

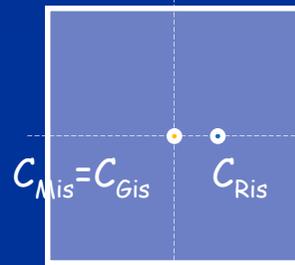
Caso 1

Caso 2

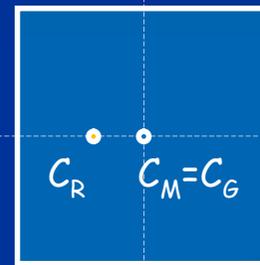
Impalcato sup.



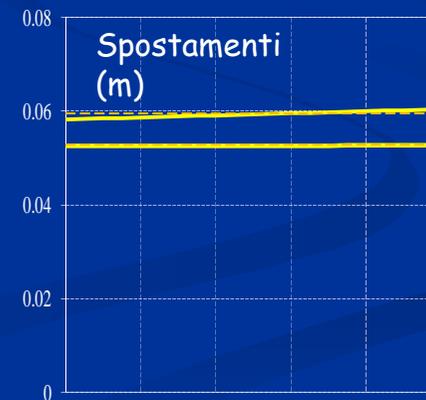
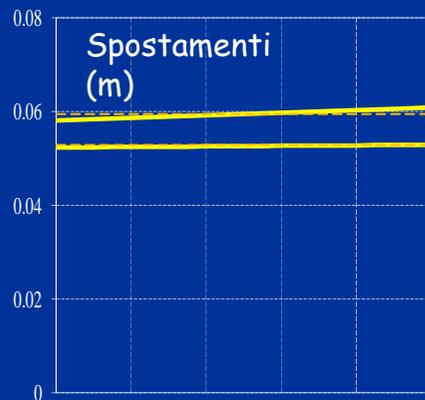
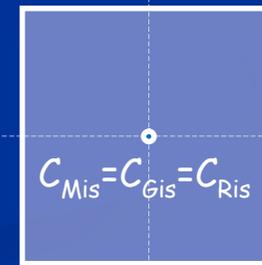
Impalcato inf.



Impalcato sup.



Impalcato inf.



# Principi di progettazione

Per minimizzare gli effetti torsionali

➤ nei casi in cui il sistema di isolamento affidi a pochi dispositivi le sue capacità dissipative e ricentranti rispetto alle azioni orizzontali,

tali dispositivi devono essere disposti, per quanto possibile, in maniera da minimizzare gli effetti torsionali (ad esempio perimetralmente) e siano in numero staticamente ridondante.

# Principi di progettazione

Per minimizzare le differenze di comportamento degli isolatori

- le tensioni di compressione a cui lavorano devono essere, per quanto possibile, uniformi.

Nel caso di sistemi d'isolamento che utilizzino isolatori di diverso tipo, particolare attenzione deve essere posta sugli effetti indotti dalla differente deformabilità verticale sotto le azioni sia statiche che sismiche.

# Principi di progettazione

Per evitare o limitare azioni di trazione negli isolatori

➤ gli interassi della maglia strutturale devono essere scelti in modo tale che il carico verticale di progetto agente sul singolo isolatore sotto le azioni sismiche e quelle concomitanti, risulti essere di compressione o, al più, nullo.

# Principi di progettazione

Per evitare o limitare azioni di trazione negli isolatori

Per gli isolatori elastomerici,

nel caso in cui dall'analisi risultasse  $V < 0$ ,

la tensione di trazione deve essere, in modulo, inferiore a

•  $2G$  ( $G$  modulo di taglio del materiale elastomerico)

• 1 MPa

Per gli isolatori di altro tipo,

nel caso in cui dall'analisi risultasse  $V < 0$ ,

occorre dimostrare, attraverso adeguate prove sperimentali,

che l'isolatore è in grado di sostenere tale condizione,

oppure predisporre opportuni dispositivi in grado di assorbire integralmente la trazione.

# Requisiti generali

## Sovrastruttura e sottostruttura

La sovrastruttura e la sottostruttura devono rimanere sostanzialmente in campo elastico.

Per questo la sovrastruttura e la sottostruttura potranno essere progettate con riferimento alle prescrizioni relative alle strutture con bassa duttilità (DC "B").

# Modellazione dei sistemi isolati alla base

1. La sovrastruttura e la sottostruttura sono modellate come sistemi a comportamento elastico lineare.
2. Il sistema di isolamento può essere modellato come avente comportamento visco-elastico lineare oppure con legame costitutivo non lineare.

La deformabilità verticale degli isolatori devà essere messa in conto quando il rapporto tra la rigidezza verticale del sistema di isolamento  $K_v$  e la rigidezza equivalente orizzontale  $K_{e_{si}}$  è inferiore a 800.

# Modellazione del sistema di isolamento

Il comportamento del sistema di isolamento può essere modellato come lineare equivalente se sono soddisfatte tutte le seguenti condizioni:

- a) la rigidezza equiv. del sistema d'isolamento è almeno pari al 50% della rigidezza secante per cicli con spostamento pari al 20% dello spost. di riferimento;
- b) lo smorzamento lineare equiv. del sistema di isolamento è inferiore al 30%;
- c) le caratteristiche forza-spostamento del sistema d'isolamento non variano di più del 10% per effetto di variazioni della velocità di deformazione, in un campo del  $\pm 30\%$  intorno al valore di progetto, e dell'azione verticale sui dispositivi, nel campo di variabilità di progetto;
- d) l'incremento della forza nel sistema d'isolamento per spost. tra  $0,5d_{dc}$  e  $d_{dc}$ , essendo  $d_{dc}$  lo spostamento del centro di rigidezza dovuto all'azione sismica, è almeno pari al 2.5% del peso totale della sovrastruttura.

# Modellazione del sistema di isolamento

Le proprietà meccaniche del sistema di isolamento da adottare nelle analisi di progetto sono le più sfavorevoli che si possono verificare durante la sua vita utile. Esse devono tener conto, ove pertinente, di:

- entità delle deformazioni subite in relazione allo stato limite per la verifica del quale si svolge l'analisi,
- variabilità delle caratteristiche meccaniche dei dispositivi, nell'ambito della fornitura,
- velocità massima di deformazione (frequenza), in un intervallo di variabilità di  $\pm 30\%$  del valore di progetto,
- entità dei carichi verticali agenti simultaneamente al sisma,
- entità dei carichi e delle deformazioni in direzione trasversale a quella considerata,
- temperatura, per i valori massimo e minimo di progetto,
- cambiamento delle caratteristiche nel tempo (invecchiamento).

# Modellazione del sistema di isolamento

Si devono eseguire più analisi per ciascuno stato limite da verificare, attribuendo ai parametri del modello i valori estremi più sfavorevoli ai fini della valutazione delle grandezze da verificare e coerenti con l'entità delle deformazioni subite dai dispositivi.

## **Nota !**

Nella progettazione delle costruzioni di classe d'uso I e II, si possono adottare i valori medi delle proprietà meccaniche del sistema di isolamento, a condizione che i valori estremi (massimo oppure minimo) differiscano di non più del 20% dal valor medio.

# Analisi strutturale

Possono essere eseguite le seguenti analisi strutturali:

- *Analisi statica lineare*
- *Analisi dinamica lineare*
- *Analisi dinamica non-lineare*

# Analisi statica lineare

Può essere applicata se la struttura isolata soddisfa i requisiti:

- a) il sistema d'isolamento può essere modellato come lineare
- b) il periodo equivalente  $T_{is}$  della costruzione isolata ha un valore compreso fra  $3T_{bf}$  e  $3.0$  s, in cui  $T_{bf}$  è il periodo della sovrastruttura assunta a base fissa, stimato con un'espressione approssimata;
- c) la rigidezza verticale del sistema di isolamento  $K_v$  è almeno 800 volte più grande della rigidezza equivalente orizzontale del sistema di isolamento  $K_{esi}$ ;
- d) il periodo in direzione verticale  $T_v$ , calcolato come  $T_v = 2\pi M / K_v$ , è inferiore a 0.1 s;
- e) nessun isolatore risulta in trazione per l'effetto combinato dell'azione sismica e dei carichi verticali;
- f) il sistema resistente all'azione sismica possiede una configurazione strutturale regolare in pianta

# Regolarità in pianta

- la configurazione in pianta è compatta e approssimativamente simmetrica rispetto a due direzioni ortogonali, in relazione alla distribuzione di masse e rigidzze;
- il rapporto tra i lati di un rettangolo in cui la costruzione risulta inscritta è inferiore a 4;
- nessuna dimensione di eventuali rientri o sporgenze supera il 25 % della dimensione totale della costruzione nella corrispondente direzione;
- gli orizzontamenti possono essere considerati infinitamente rigidi nel loro piano rispetto agli elementi verticali e sufficientemente resistenti.

# Analisi statica lineare

Per le costruzioni civili e industriali,  
si aggiungono i seguenti requisiti:

- la sovrastrutt. ha altezza non maggiore di 20 metri e non più di 5 piani.
- la sottostruttura può essere considerata infinitamente rigida ovvero il suo periodo proprio è non maggiore di 0.05s.
- la dimensione maggiore in pianta della sovrastruttura è inferiore a 50 m;
- in ciascuna delle direzioni principali orizzontali l'eccentricità totale (esclusa quella accidentale) tra il centro di rigidezza del sistema di isolamento e la proiezione verticale del centro di massa non è superiore al 3% della dimensione della sovrastruttura trasversale alla direzione orizzontale considerata.

# Analisi statica lineare

Il calcolo può essere svolto su due modelli separati, per ciascuno dei quali si assume un valore diverso dello smorzamento.

**1° MODELLO - SOVRASTRUTTURA PIÙ SISTEMA D'ISOLAMENTO**

**2° MODELLO - SOTTOSTRUTTURA**

Su quest'ultimo agiscono le forze ricavate dal primo modello e le forze d'inerzia prodotte direttamente dal moto del terreno.

# Analisi statica lineare

Nella valutazione degli spostamenti del sistema di isolamento l'analisi statica lineare considera la risposta strutturale come sovrapposizione di :

- traslazioni orizzontali indipendenti
- rotazioni planimetriche dovute ad eccentricità strutturali ed accidentali.

# Analisi statica lineare

Con riferimento al comportamento traslazionale, si assume che la sovrastruttura sia un solido rigido che trasla al di sopra del sistema di isolamento, con un periodo equivalente di traslazione :

$$T_{is} = 2\pi\sqrt{M/K_{esi}}$$

dove :

$M$  è la massa totale della sovrastruttura

$K_{esi}$  è la rigidezza equivalente orizzontale del sistema d'isolamento, ottenuta trascurando eventuali effetti torsionali a livello di isolamento

# Analisi statica lineare

## Effetto della traslazione

Lo spostamento  $d_{dc}$  del centro di rigidità del sistema di isolamento, dovuto all'azione sismica e' calcolato, in ciascuna direzione orizzontale, mediante l'espressione:

$$d_{dc} = \frac{S_e(T_{is}, \xi_{esi})}{\omega_{is}^2} = \frac{M S_e(T_{is}, \xi_{esi})}{K_{esi, \min}}$$

dove :

$S_e(T_{is}, \xi_{esi})$  è l'accelerazione spettrale definita per la categoria di suolo di fondazione appropriata.

$K_{esi, \min}$  è la rigidità equivalente minima in relazione alla variabilità delle proprietà meccaniche del sistema di isolamento.

# Analisi statica lineare

## Effetto della rotazione in pianta

Gli effetti della torsione della sovrastruttura sui dispositivi di isolamento possono essere messi in conto amplificando in ciascuna direzione gli effetti indotti dalla traslazione mediante i fattori  $\delta_{xi}$  e  $\delta_{yi}$ .

Ovvero:

$$d_{xi} = d_{dc} \cdot \delta_{xi}$$

$$d_{yi} = d_{dc} \cdot \delta_{yi}$$

dove :

$d_{xi}, d_{yi}$  Spostamento in direzione x/y dell'iesimo dispositivo di isolamento

$d_{dc}$  Spostamento del centro di rigidezza dell'intero sistema di isolamento

# Analisi statica lineare

## Effetto della rotazione in pianta

I fattori  $\delta_{xi}$  e  $\delta_{yi}$ , da applicare rispettivamente agli effetti in direzione x e y, sono calcolati attraverso le relazioni:

$$\delta_{xi} = 1 + \frac{e_{tot,y}}{r_y^2} y \qquad \delta_{yi} = 1 + \frac{e_{tot,x}}{r_x^2} x$$

dove :

$e_{tot,x}$   $e_{tot,y}$  sono le eccentricità totali (ovvero strutturale + accidentale) nelle direzioni x e y;

$x_i, y_i$  sono le coordinate del singolo dispositivo di isolamento rispetto al centro di rigidità del sistema di isolamento;

$r_x, r_y$  sono le componenti, in direzione x e y, del raggio torsionale del sistema di isolamento;

$$r_x^2 = \sum (x_i^2 K_{yi} + y_i^2 K_{xi}) / K_{yi} \qquad r_y^2 = \sum (x_i^2 K_{yi} + y_i^2 K_{xi}) / K_{xi}$$

# Analisi statica lineare

## Spostamenti orizzontali degli isolatori

In virtu' del carattere bidirezionale dell'input sismico  
lo spostamento degli isolatori nelle direzioni x e y risulta essere :

Componente principale  
in direzione X

Spost. dir. x

$$d_{EX,xi} = d_{dc,xi} \delta_{xi}$$

Spost. dir. y

$$d_{EX,yi} = 0.3 d_{dc,yi} \delta_{yi}$$

Componente principale  
in direzione Y

Spost. dir. x

$$d_{EY,xi} = 0.3 d_{dc,xi} \delta_{xi}$$

Spost. dir. y

$$d_{EY,yi} = d_{dc,yi} \delta_{yi}$$

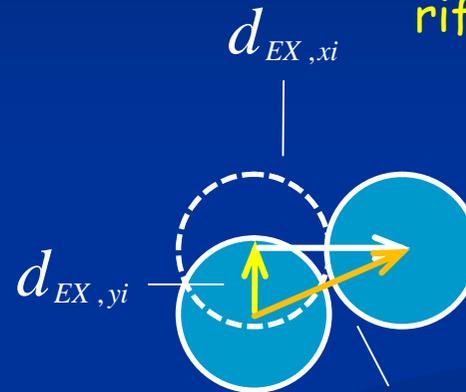
# Analisi statica lineare

## Spostamenti orizzontali degli isolatori

Ricorda che per la verifica degli spostamenti dei dispositivi devi fare riferimento allo SLC!

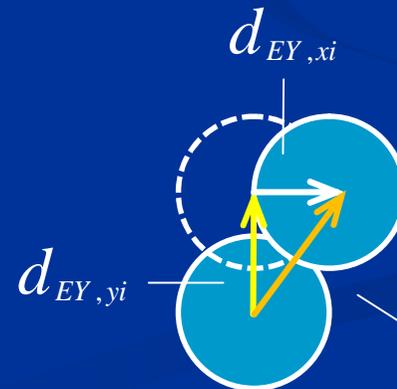
Componendo gli spostamenti si ha quindi :

Componente principale in direzione X



$$d_{EX} = \sqrt{d_{EX,x}^2 + d_{EX,y}^2}$$

Componente principale in direzione Y



$$d_{EY} = \sqrt{d_{EY,x}^2 + d_{EY,y}^2}$$

# Analisi statica lineare

La forza orizzontale complessiva applicata al sistema d'isolamento è :

$$F = M S_e(T_{is}, \xi_{esi})$$

dove :

$M$  è la massa totale dell'edificio

$S_e(T_{is}, \xi_{esi})$  è la pseudo-accelerazione definita per la categoria di suolo di fondazione appropriata.

# Analisi statica lineare

Ricorda che per la verifica della sovrastruttura devi fare riferimento allo SLV!

Le forze orizzontali da applicare a ciascun livello della sovrastruttura devono essere calcolate mediante la relazione:

$$f_j = m_j \cdot S_e(T_{is}, \xi_{esi})$$

dove :

$m_j$  è la massa del livello j-esimo

$S_e(T_{is}, \xi_{esi})$  è la pseudo-accelerazione definita per la categoria di suolo di fondazione appropriata.

## Nota !

Se le masse sono eguali in elevazione, le forze sono costanti ai vari piani.

# Analisi dinamica lineare

L'analisi dinamica lineare è ammessa quando risulta possibile modellare elasticamente il comportamento del sistema di isolamento.

L'analisi può essere svolta mediante

- analisi modale con spettro di risposta o
- mediante integrazione al passo delle equazioni del moto, eventualmente previo disaccoppiamento modale, considerando un numero di modi tale da portare in conto anche un'aliquota significativa della massa della sottostruttura, se inclusa nel modello.

# Analisi dinamica lineare

## Il modello fisico

Il modello deve comprendere sia la sovrastruttura che la sottostruttura, qualora il sistema di isolamento non sia immediatamente al di sopra delle fondazioni.

# Analisi dinamica lineare

## La modellazione dell'azione sismica

Le componenti orizzontali dell'azione sismica si considerano in generale agenti simultaneamente.

## La componente verticale dell'azione sismica

deve essere messa in conto nei casi previsti già per gli edifici a base fissa e, in ogni caso, quando il rapporto tra la rigidezza verticale del sistema di isolamento  $K_v$  e la rigidezza equivalente orizzontale  $K_{esi}$  risulti inferiore a 800. In tali casi si avrà cura che la massa eccitata dai modi in direzione verticale considerati nell'analisi sia significativa.

## Le regole di combinazione degli effetti

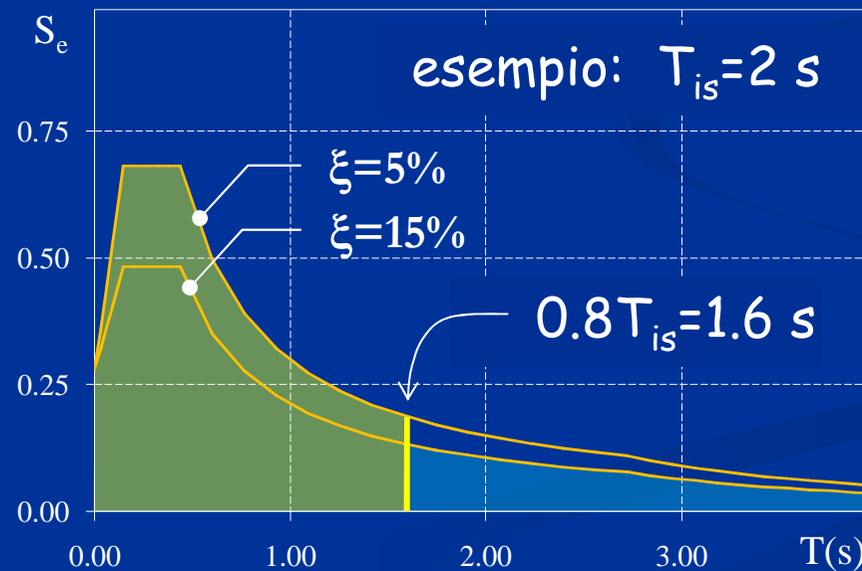
sono le stesse riportate per gli edifici a base fissa.

# Analisi dinamica lineare

## La modellazione dell'azione sismica

### Lo spettro elastico

va ridotto per tutto il campo di periodi  $T \geq 0.8T_{is}$ , assumendo per il coefficiente riduttivo  $\eta$  il valore corrispondente al coefficiente di smorzamento viscoso equivalente  $\xi$  del sistema di isolamento.



# Analisi dinamica lineare

## La modellazione dell'azione sismica

Nel caso di analisi lineare con integrazione al passo, la messa in conto del corretto valore del coefficiente di smorzamento viscoso equivalente  $\xi$  si ottiene, quando si opera sulle singole equazioni modali disaccoppiate, assegnando a ciascuna equazione il corrispondente valore modale di  $\xi$  o, quando si opera sul sistema completo, definendo in maniera appropriata la matrice di smorzamento del sistema.

# Verifica degli isolatori elastomerici

## Prescrizioni di normativa (Circolare)

E' opportuno che la loro progettazione rispetti le seguenti limitazioni:

la tensione max orizzontale  $\sigma_s$  agente nella generica piastra in acciaio sia non maggiore di  $f_{yk}$

La tensione  $\sigma_s$  puo' essere ricavata da un equilibrio alla traslazione

$$\sigma_s A_s = p A_e$$

ovvero

$$\sigma_s t_s = p (t_1 + t_2)$$

dove:

$t_1, t_2$  sono gli spessori degli strati di gomma a contatto con la piastra

$t_s$  è lo spessore della piastra ( $t_s \geq 2\text{mm}$ )

$A_s$  e' l'area trasversale ridotta efficace dell'isolatore

$A_e$  e' l'area trasversale degli strati di gomma a contatto con la piastra

# Verifica degli isolatori elastomerici

## Prescrizioni di normativa (Circolare)

E' opportuno che la loro progettazione rispetti le seguenti limitazioni:

la tensione max orizzontale  $\sigma_s$  agente nella generica piastra in acciaio sia non maggiore di  $f_{yk}$

La Circolare stabilisce che:

$$\sigma_s = 1.3N(t_1 + t_2) / (A_r t_s) \leq f_{yk}$$

dove:

$t_1, t_2$  sono gli spessori degli strati di gomma a contatto con la piastra

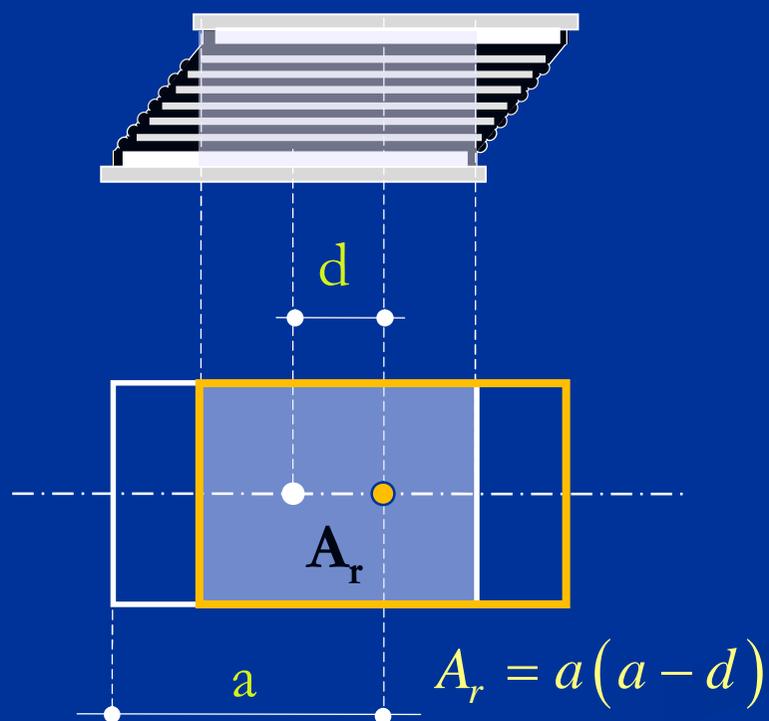
$t_s$  è lo spessore della piastra ( $t_s \geq 2\text{mm}$ )

$A_r$  e' l'area ridotta efficace dell'isolatore

# Verifica degli isolatori elastomerici

## Prescrizioni di normativa

Area ridotta efficace per  
isolatore elastomerico  
rettangolare



Secondo Circolare

$$A_r = \min [(b_x - d_{rftx} - d_{Ex}) (b_y - d_{rfty} - 0,3d_{Ey}) , \\ (b_x - d_{rftx} - 0,3d_{Ex}) (b_y - d_{rfty} - d_{Ey})]$$

dove

$b_x$  e  $b_y$  sono i lati dell'isolatore rettangolare

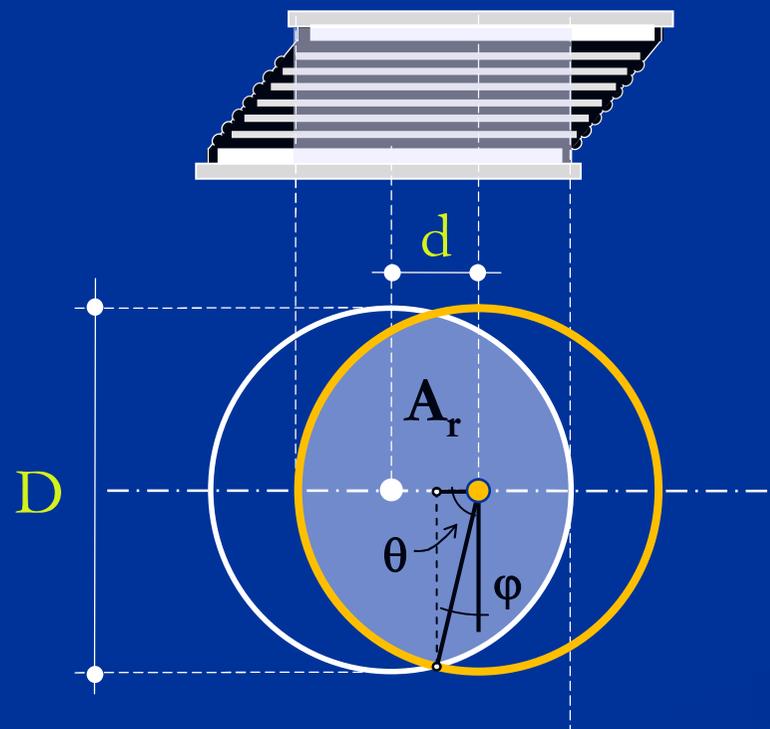
$d_{Ex}, d_{Ey}$  sono gli spostamenti relativi, misurati tra le facce superiori e inferiori degli isolatori, prodotti dalla azione sismica in direzione x ed y

$d_{rft}$  sono gli spostamenti relativi misurati tra le facce superiori e inferiori degli isolatori, prodotti dalle azioni di ritiro, fluge, e termiche (ridotte al 50%), ove rilevanti.

# Verifica degli isolatori elastomerici

## Prescrizioni di normativa

Area ridotta per  
isolatore elastomerico circolare



L'area ridotta puo' essere espressa  
come :

$$A_r = 2R^2 (\theta - \text{sen}\theta \cos \theta)$$

oppure come :

$$A_r = 2R^2 \left( \theta - \frac{1}{2} \text{sen}2\theta \right)$$

Poiche'  $d = 2R \cos \theta$

vale la relazione  $\theta = \arccos(d/D)$

Poiche'  $\varphi = 2\theta = 2 \arccos(d/D)$

$$A_r = \frac{D^2}{4} (\varphi - \text{sen}\varphi)$$

# Verifica degli isolatori elastomerici

## Prescrizioni di normativa

E' opportuno che la loro progettazione rispetti le seguenti limitazioni:

$$\gamma_t \leq 5$$

$$\gamma_s \leq \gamma^*/1.5 \leq 2$$

dove:

$\gamma_t = \gamma_c + \gamma_s + \gamma_a$  e' la deformazione a taglio totale di progetto

$\gamma_c$  e' la deformazione di taglio dell'elastomero prodotta dalla compressione

$\gamma_s$  e' la deformazione di taglio dell'elastomero prodotta dallo spostamenti sismico totale, inclusi gli effetti torsionali

$\gamma_a$  e' la deformazione di taglio dell'elastomero prodotta dalla rotazione angolare

$\gamma^*$  e' la deformazione di taglio massima raggiunta nelle prove di qualificazione relative all'efficacia dell'aderenza elastomero-acciaio, senza segni di rottura

# Verifica degli isolatori elastomerici

## Prescrizioni di normativa

E' opportuno che la loro progettazione rispetti le seguenti limitazioni:

$$\gamma_t \leq 5$$

$$\gamma_s \leq \gamma^*/1.5 \leq 2$$

dove:

$$\gamma_c = 1.5V / (S_1 G_{din} A_r)$$

$$\gamma_s = d_2 / t_e$$

$$\gamma_a = a^2 / 2t_i t_e$$

$$a^2 = (\alpha_x b_x^2 + \alpha_y b_y^2) \quad \alpha_x \text{ e } \alpha_y \text{ rotazioni attorno alle dir. x e y per isolatore rettangolare}$$

$$a^2 = 3\alpha D^2 / 4 \quad \text{per isolatore circolare}$$

# Verifica degli isolatori elastomerici

## Prescrizioni di normativa

E' opportuno che la loro progettazione rispetti le seguenti limitazioni:

Il carico massimo verticale agente sul singolo isolatore dovrà essere inferiore al carico critico  $N_{cr}$  diviso per un coefficiente di sicurezza 2,0.

$$N_{cr} = G_{din} A_r S_1 b_{min} / t_e$$

dove:

$b_{min}$  è il minore tra  $b_x$  e  $b_y$  per gli isolatori rettangolari

$G_{din}$  è il modulo di taglio dinamico dell'elastomero

$t_e$  è lo spessore del singolo strato di elastomero

$S_1$  è il fattore primario di forma

$A_r$  è l'area efficace ridotta

# Sistemi isolati alla base

## Collaudo

Il collaudo statico deve essere effettuato in corso d'opera; al riguardo si segnala che di fondamentale importanza è il controllo della posa in opera dei dispositivi, nel rispetto delle tolleranze e delle modalità di posa prescritte dal progetto, nonché la verifica della completa separazione tra sottostruttura e sovrastruttura e tra quest'ultima ed altre strutture adiacenti, con il rigoroso rispetto delle distanze di separazione previste in progetto.

Il collaudatore può disporre l'esecuzione di speciali prove per la caratterizzazione dinamica del sistema di isolamento atte a verificare, nei riguardi di azioni di tipo sismico, che le caratteristiche della costruzione corrispondano a quelle attese.