

Università di Catania  
Corso di laurea in ingegneria civile strutturale e geotecnica

## Costruzioni in zona sismica

.....

19 gennaio 2012  
Aurelio Gherzi e Salvo Monteleone

# Tecniche convenzionali di progettazione

Strutture a base fissa

Bassa accelerazione

Comportamento  
elastico lineare



nessun danno  
strutturale

Alta accelerazione

Comportamento  
inelastico



danno strutturale  
e non-strutturale

# Tecniche convenzionali di progettazione

Danni ad elementi strutturali



# Tecniche convenzionali di progettazione

Danni ad elementi non strutturali





# Tecniche innovative di protezione sismica

## Obiettivi

Migliorare le prestazioni delle strutture  
nei confronti delle azioni sismiche a tutti i livelli di rischio:

- riducendo il danno agli elementi strutturali e non strutturali
- minimizzando i danni agli oggetti contenuti negli edifici
- riducendo l'interruzione d'uso delle attività

# Il controllo delle vibrazioni

## Classificazione

Il controllo delle vibrazioni può essere:

### Passivo:

I dispositivi influenzano la risposta strutturale senza che le proprie caratteristiche siano modificate durante l'evento sismico.  
Essi non richiedono fonti di energia esterna

### Attivo:

I dispositivi invertono il processo dinamico mediante forze contrarie a quelle inerziali, o modificando grandezze specifiche come rigidità e/o smorzamento  
Essi richiedono fonti di energia esterna

### Semiattivo:

I dispositivi possono immaginarsi come dispositivi passivi controllabili.  
Essi richiedono una minima fonte di energia esterna

# Il controllo delle vibrazioni

## Tecniche applicative

### Controllo Passivo

massa smorzante accordata  
liquido smorzante accordato  
dissipatori di energia  
dispositivi di isolamento alla base

### Controllo Attivi

massa smorzante controllata  
variazione di rigidità  
smorzatori ad attrito attivi

### Controllo Semiattivo

massa smorzante semiattiva  
isolamento semiattivo

**l'isolamento alla base è il sistema di controllo più comune**

# Isolamento sismico alla base

## Aspetti fondamentali del comportamento

### 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.



# Isolamento sismico alla base

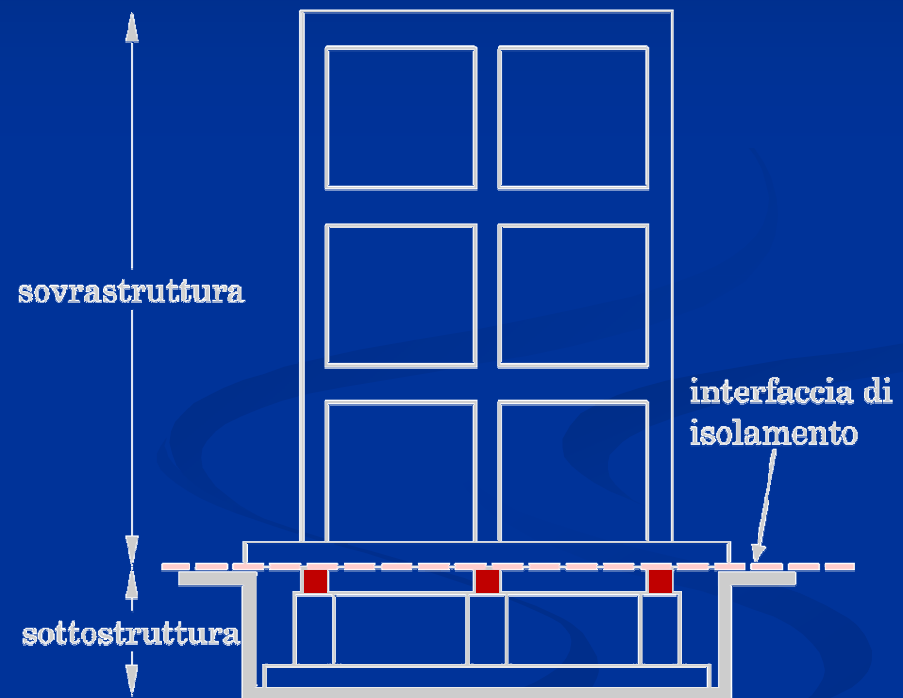
## Aspetti fondamentali del comportamento

### Obiettivo:

ridurre drasticamente  
l'energia sismica d'ingresso

### Il metodo:

introdurre una sconnessione  
alla base degli edifici e  
disaccoppiare il moto del  
terreno da quello della  
struttura



# Isolamento sismico alla base

Aspetti fondamentali del comportamento



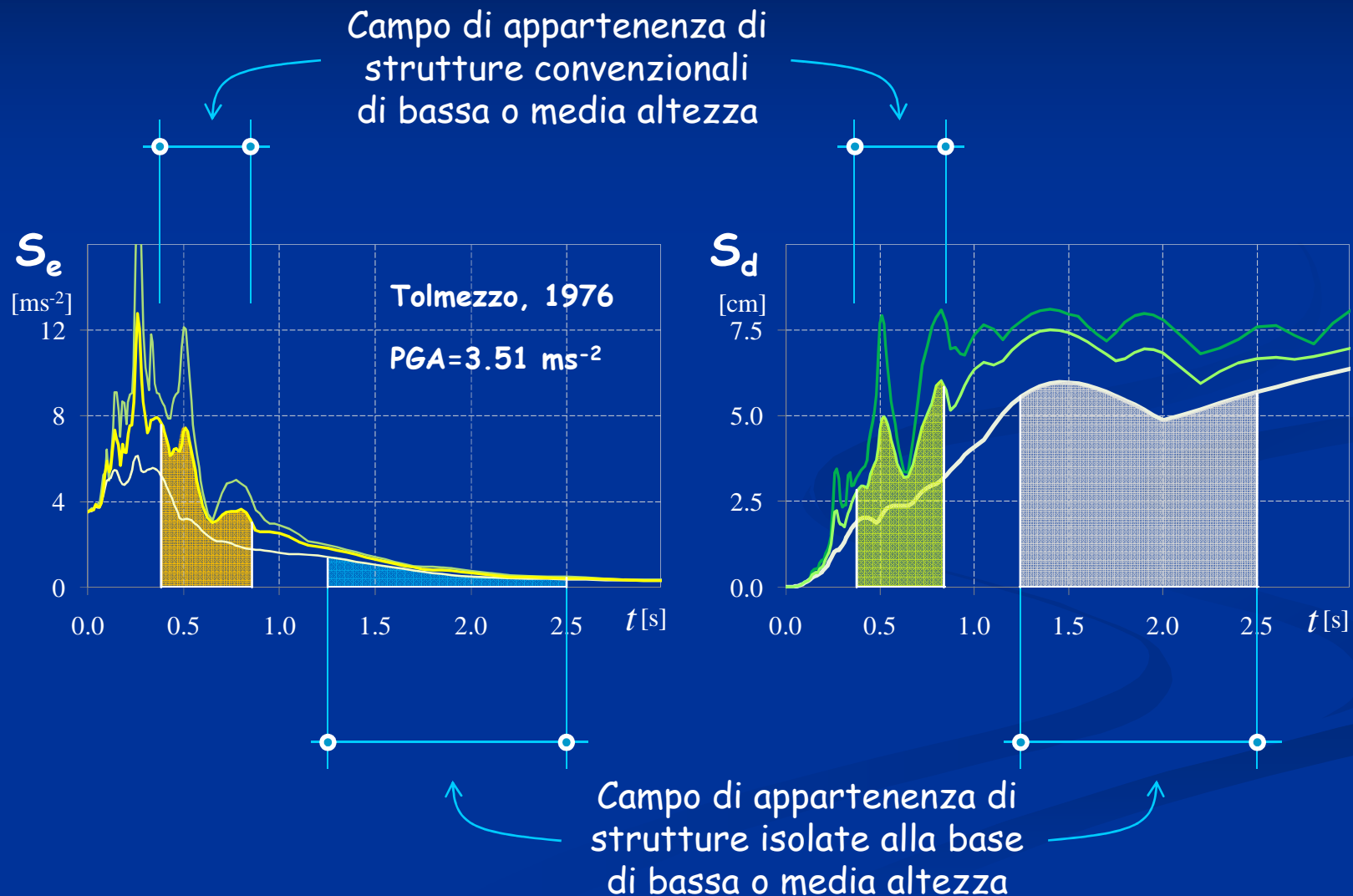
Senza isolamento alla base



Con isolamento alla base

# Isolamento sismico alla base

## Aspetti fondamentali del comportamento



# Isolamento sismico alla base

## Aspetti fondamentali del comportamento

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



# Isolamento sismico alla base

## Applicabilità

### Maggiormente efficace

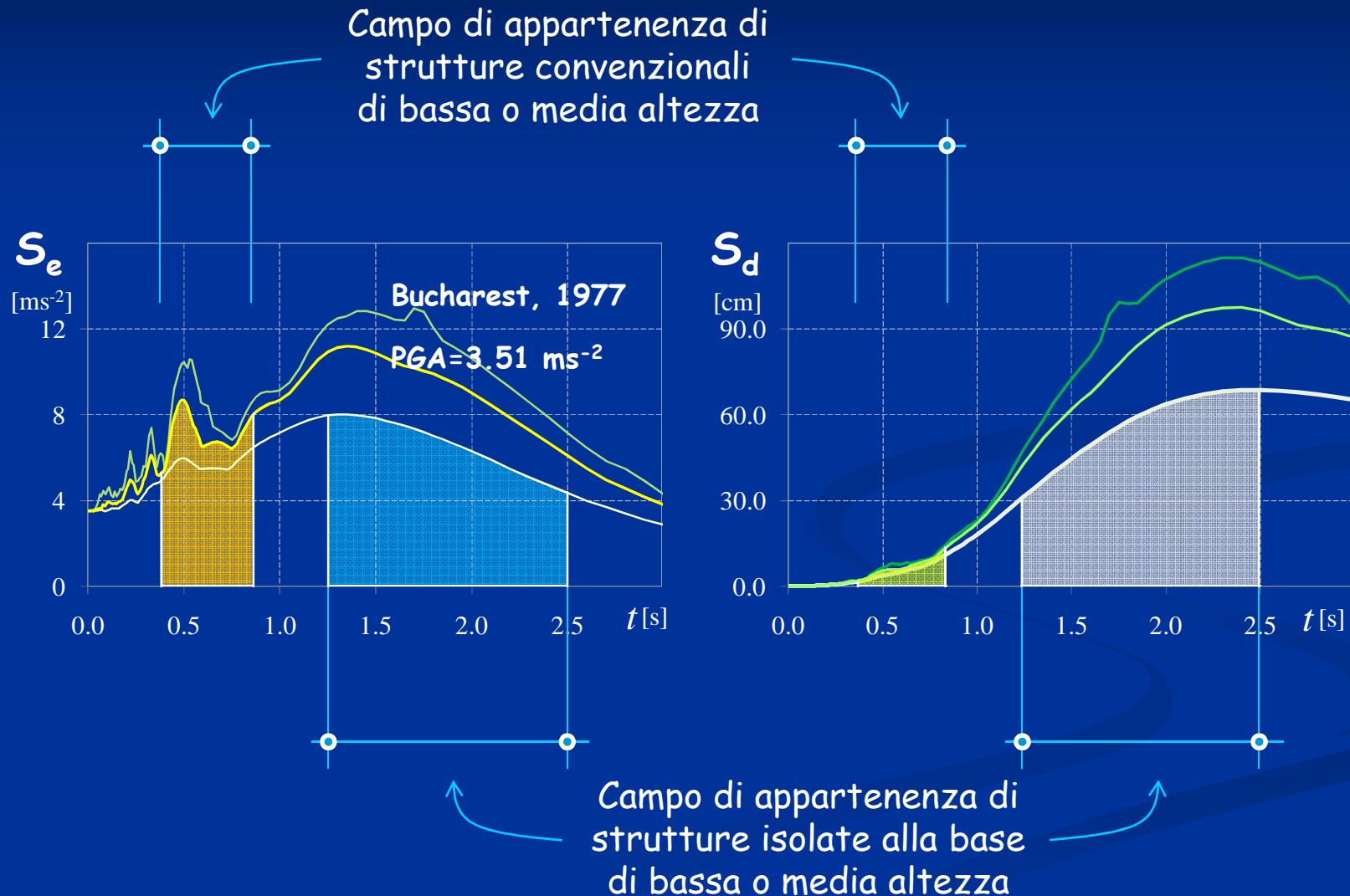
- Strutture su suolo rigido
- Strutture con basso periodo fondamentale di vibrazione (edifici di bassa altezza)

### Meno efficace

- Strutture su suolo soffice
- Strutture con alto periodo fondamentale di vibrazione (edifici di elevata altezza)

# Isolamento sismico alla base

## Applicabilità



# Dispositivi di isolamento alla base

## Isolatori elastomerici

- gomma naturale (isoprene)
- a basso smorzamento - LDRB (Low Damping Rubber Bearings)
- ad elevato smorzamento - HDRB (High Damping Rubber Bearings)
- con inserto in piombo - LDRB (Lead Rubber Bearings)

## Isolatori a scorrimento

- a superficie piana
- a superficie curva

# Isolatori elastomerici a basso smorzamento

- elevata rigidezza verticale
- semplicità di produzione
- semplicità di modellazione  
comportamento elastico fino a 100÷150%
- basso smorzamento 2÷4%

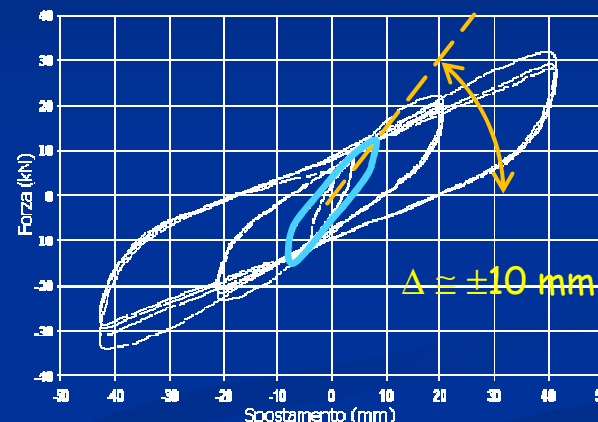
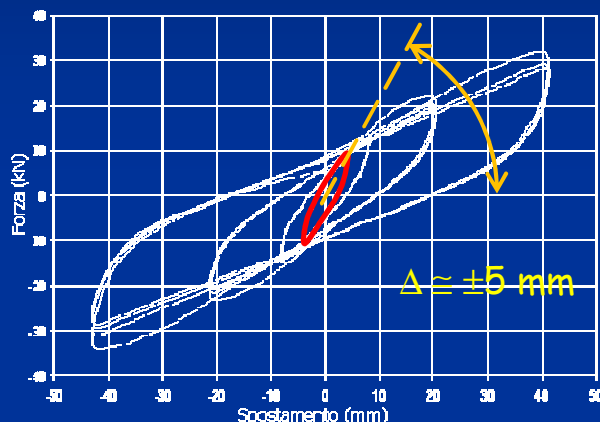


necessità di sistemi ausiliari  
per dissipare energia e  
controllare gli spostamenti





# Isolatori elastomerici ad elevato smorzamento



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



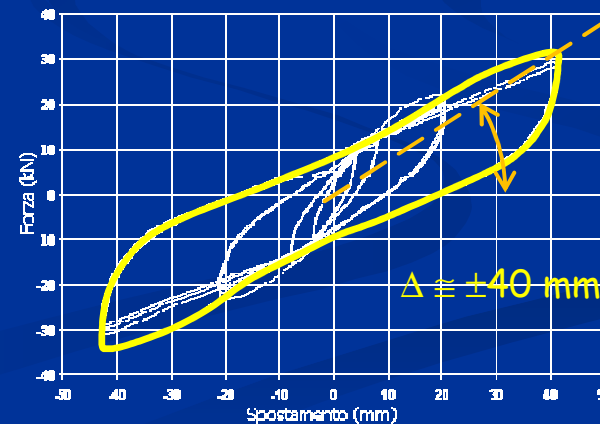
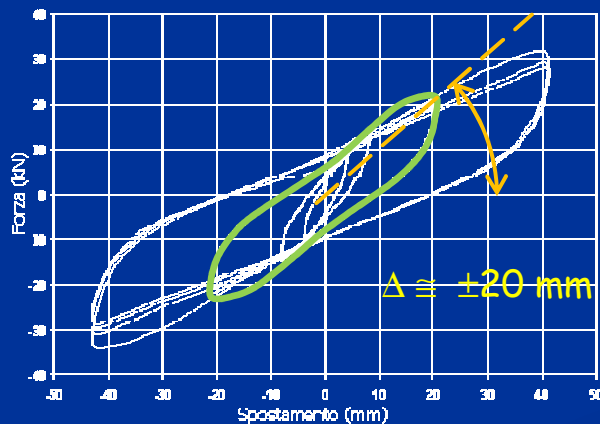
Ciò consente di ridurre l'ampiezza delle vibrazioni  
in presenza di forze di taglio di moderata intensità' (ad es. vento)

# Isolatori elastomerici ad elevato smorzamento

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



Ciò consente di ridurre le azioni da sisma sulla sovrastruttura



# Isolatori elastomerici

Prove di laboratorio



Prove di laboratorio  
di isolatore elastomerico

# Isolatori a scorrimento a superficie piana

- Hanno funzione di sostegno dei carichi verticali
- Necessitano di dispositivi ausiliari per aumentare la rigidità, la capacità dissipativa e ricentrante



Sono utilizzati congiuntamente agli isolatori elastomerici per ridurre la rigidità orizzontale del sistema di isolamento



Isolatore a scorrimento a superficie piana

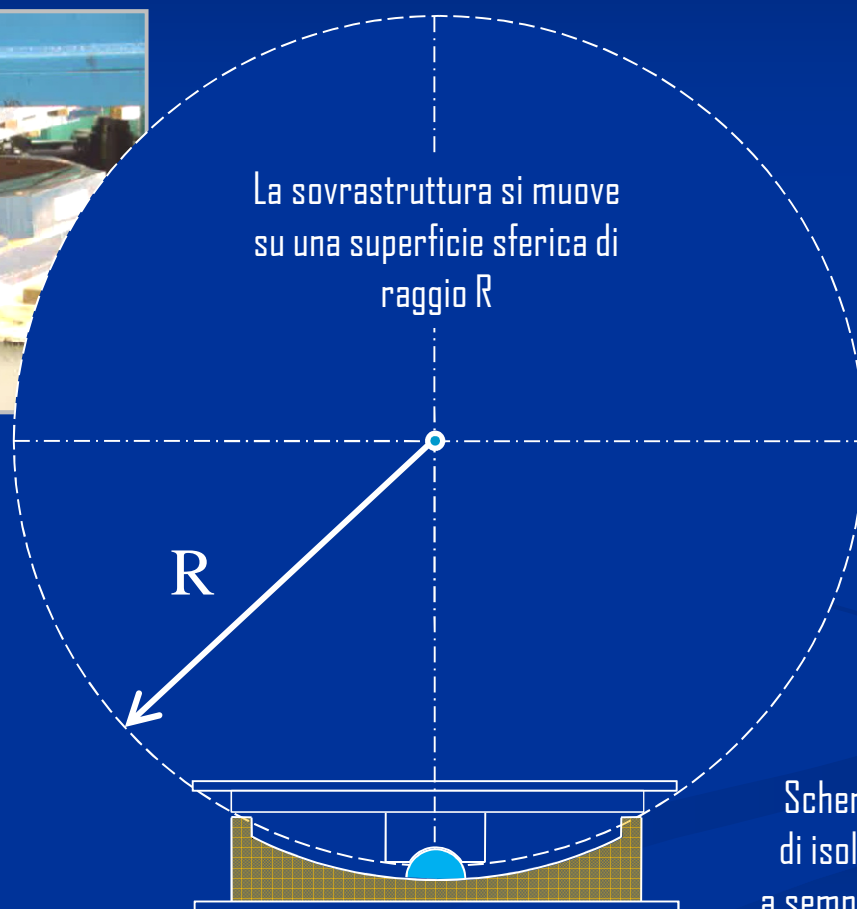


# Isolatori a scorrimento a superficie curva semplice



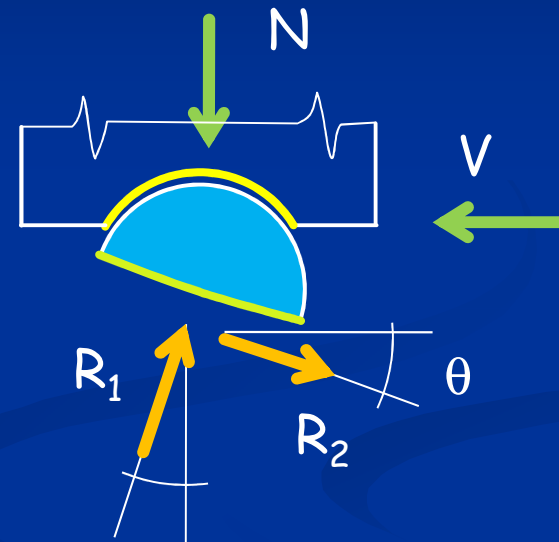
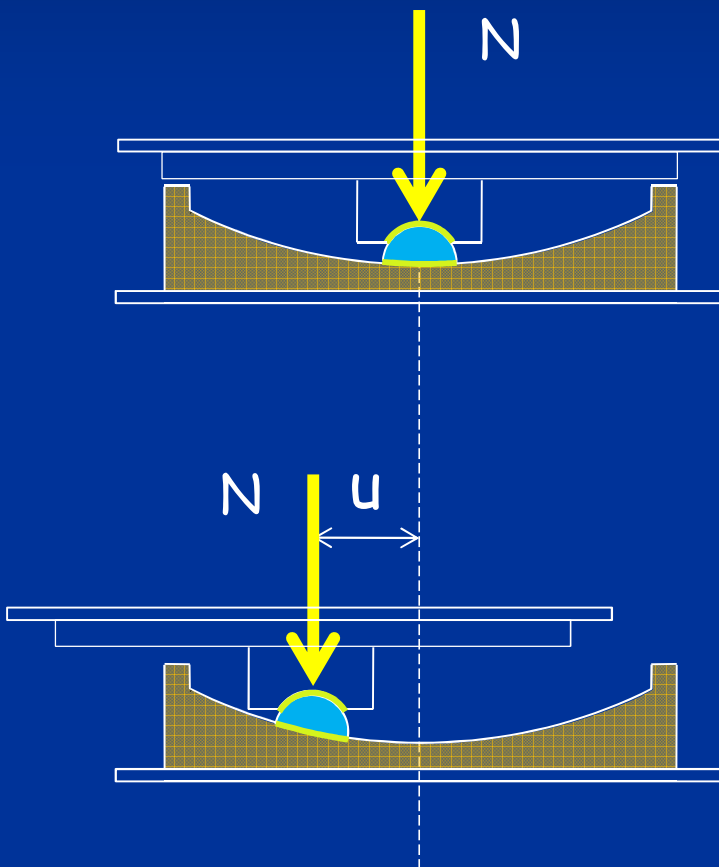
Foto di isolatori a scorrimento a superficie curva semplice

# 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



$$V = R_1 \sin \theta + R_2 \cos \theta$$

$$N = R_1 \cos \theta + R_2 \sin \theta$$



$$V = N \tan \theta + R_2 / \cos \theta$$

# Isolamento alla base

## Applicazione

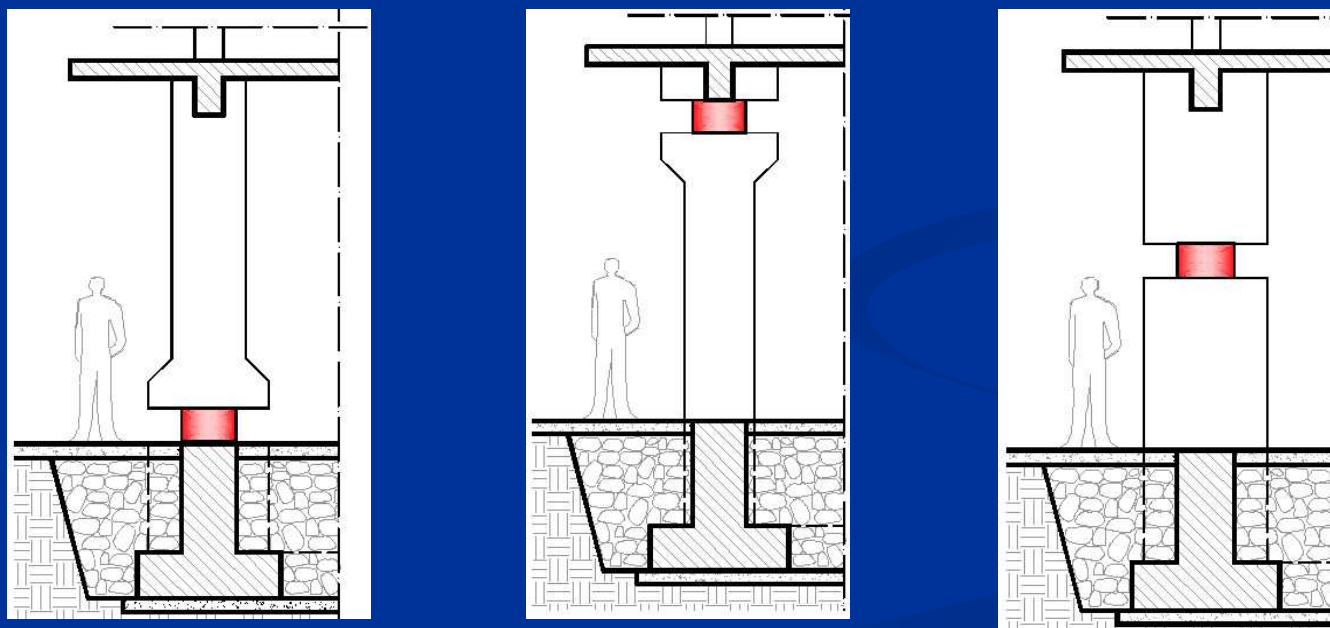
L'isolamento sismico prevede l'introduzione di una superficie di discontinuità fisica (interfaccia di isolamento) all'interno della struttura.

**Ma dove posizionare gli isolatori ?**

# 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, ...

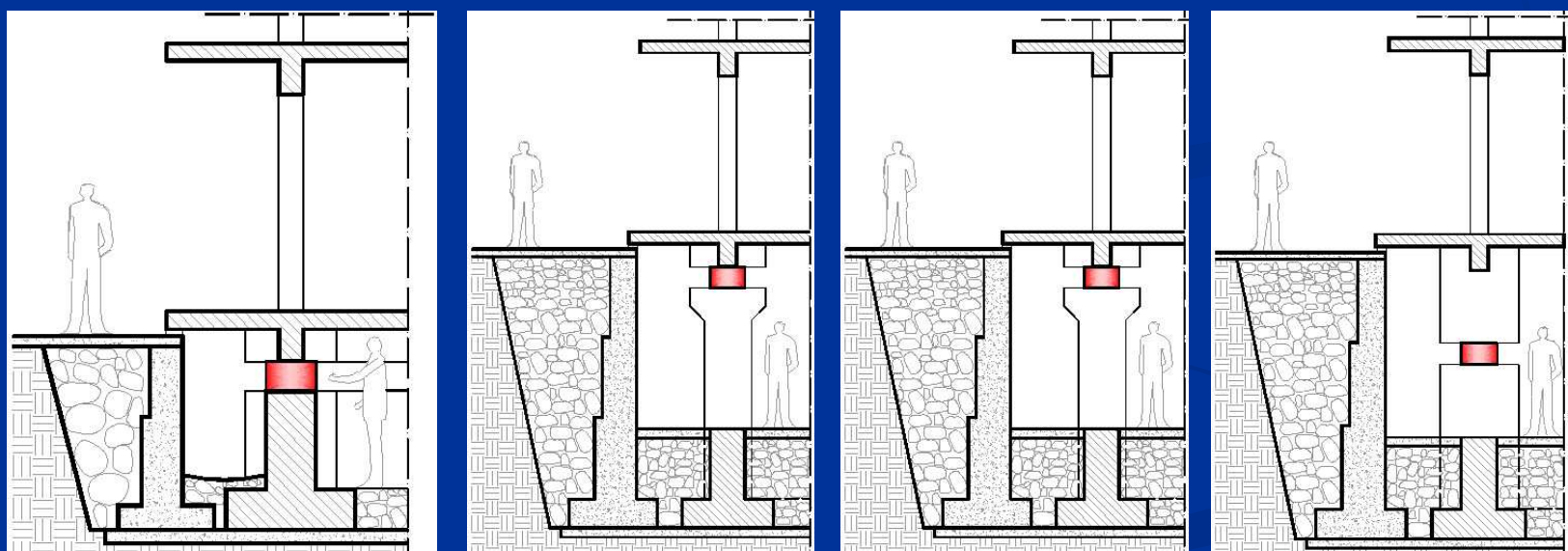


Posizioni alternative dell'interfaccia di isolamento all'interno di un edificio

# Isolamento alla base

## Posizionamento

...direttamente sui plinti di fondazione, in sommità ai pilastri del piano interrato o a metà altezza di detti pilastri, ...

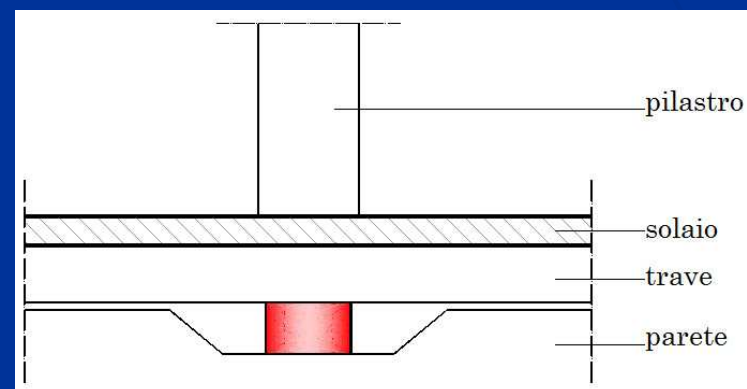
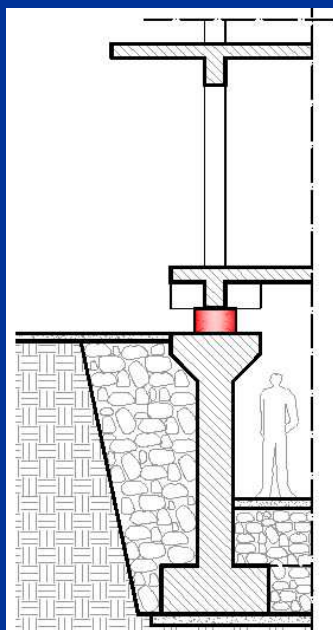


Posizioni alternative dell'interfaccia di isolamento all'interno di un edificio

# Isolamento alla base

## Posizionamento

...lungo il perimetro delle pareti del piano cantinato.



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



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 taglio con bassa rigidità orizzontale;
- dissipazione di energia;
- ricentraggio del sistema;
- vincolo laterale, 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.

# 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  $\frac{2}{3}$  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.

## Connessioni 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 mescola 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

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

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.

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

# Dispositivi elastomerici

## Specifiche di progetto

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

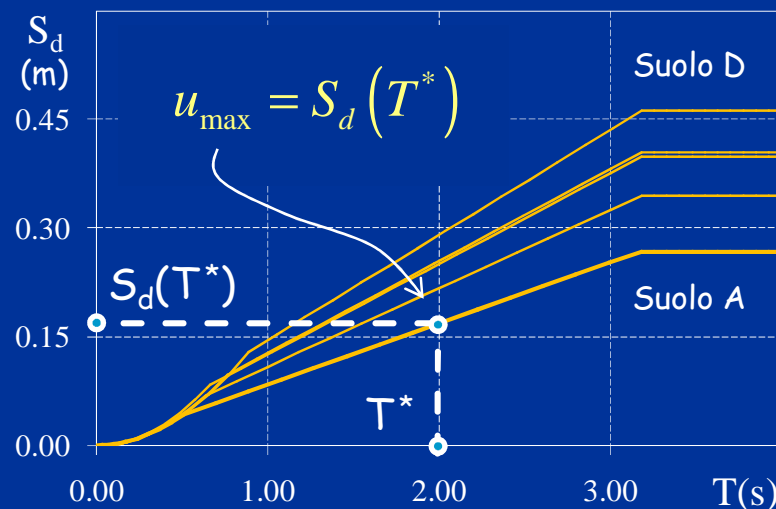
- divisa per il numero totale di pilastri  
(supponendo che al sotto di ogni pilastro ci sia un isolatore elastomerico e che il tipo di isolatore sia unico)
- ripartita non uniformemente tra gli isolatori al di sotto dei pilastri  
(supponendo che al sotto di ogni pilastro ci sia un isolatore elastomerico)
- 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



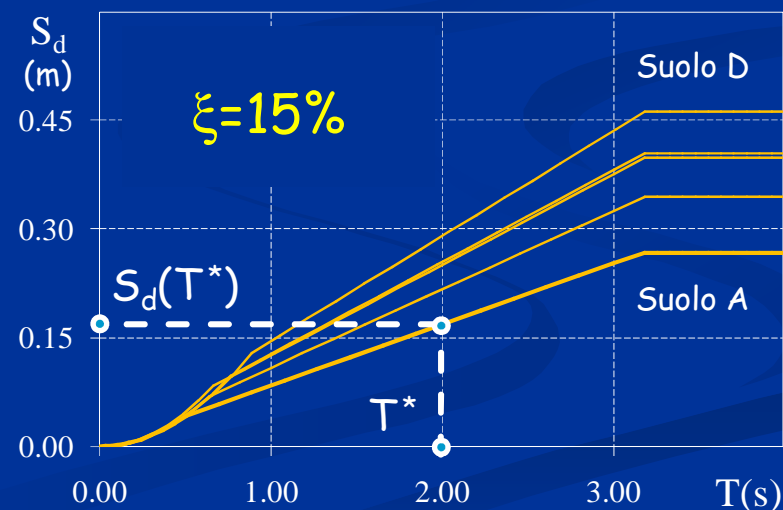
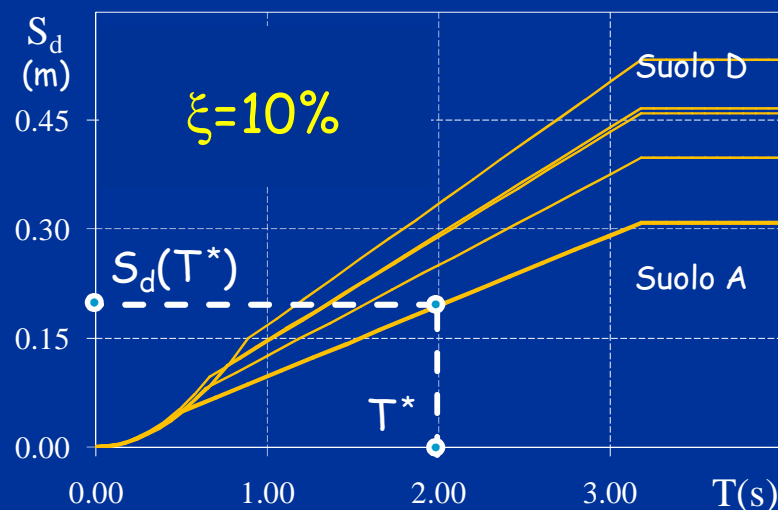
Lo spettro da utilizzare è

- 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 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

## 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

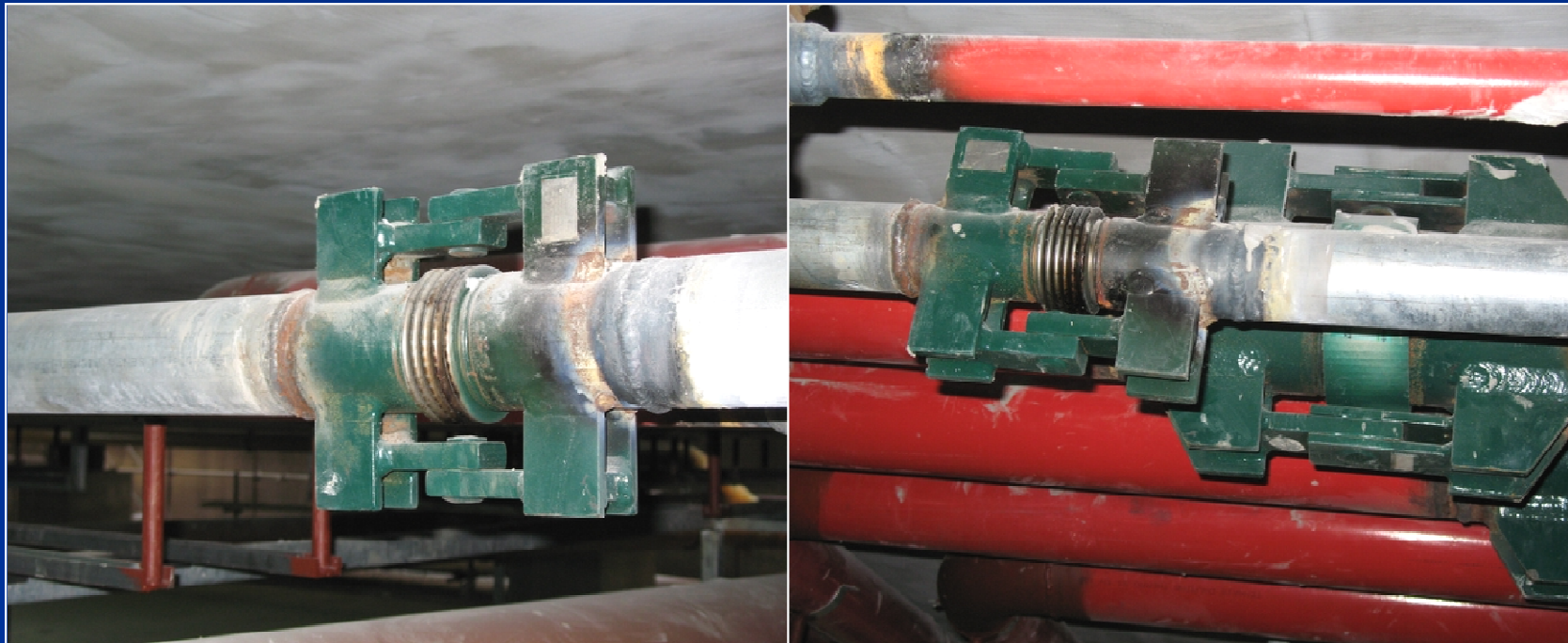


Elementi di interfaccia



# Isolamento alla base

Elementi d'interfaccia



Elementi di interfaccia

# Isolamento alla base

Elementi d'interfaccia



Elementi di interfaccia

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

- la proiezione del  
centro di massa della sovrastruttura sul piano degli isolatori e  
il centro di rigidezza dei dispositivi di isolamento  
o, nel caso di sottostruttura flessibile,  
il centro di rigidezza del sistema sottostruttura-isolamento  
devono essere, per quanto possibile, coincidenti.

# 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.

# 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 dev'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.

# 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:

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

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

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;

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

# 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

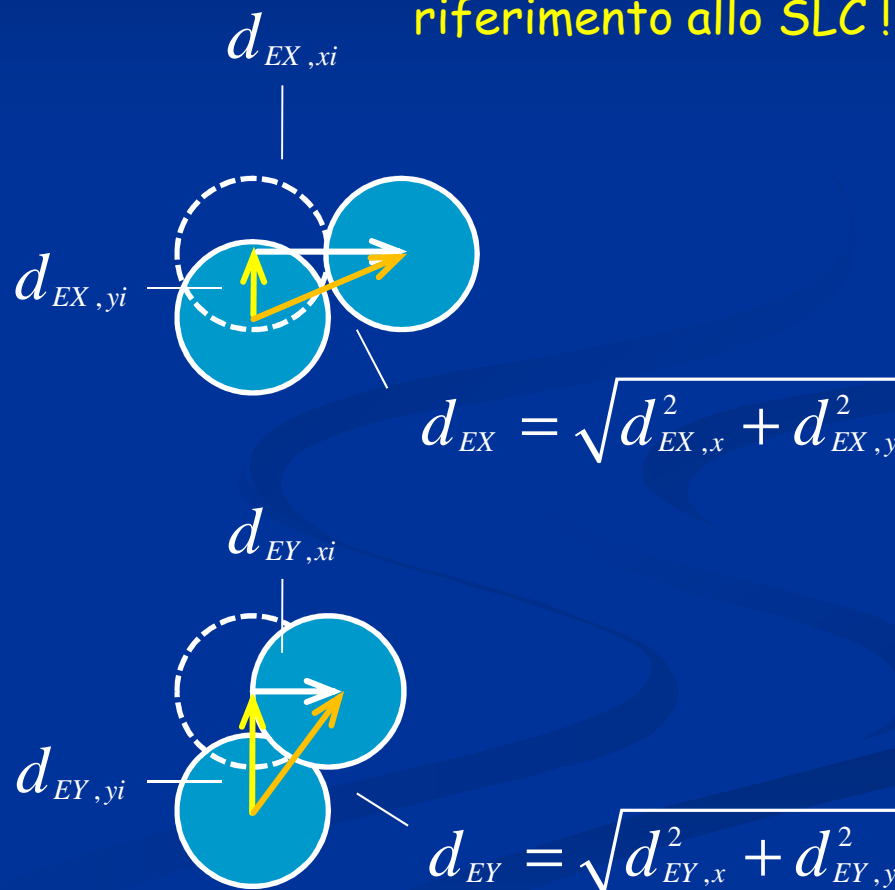
## Spostamenti orizzontali degli isolatori

Componendo gli spostamenti si ha quindi :

Componente principale in direzione X

Componente principale in direzione Y

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



# 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

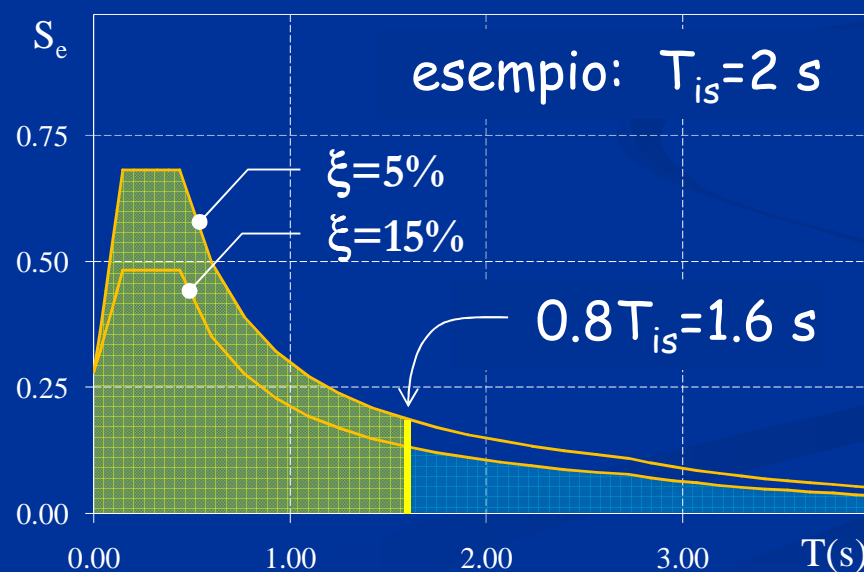
sono le stesse riportate per gli edifici a base fissa.

# 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.



# 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

# 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.



# Esempio

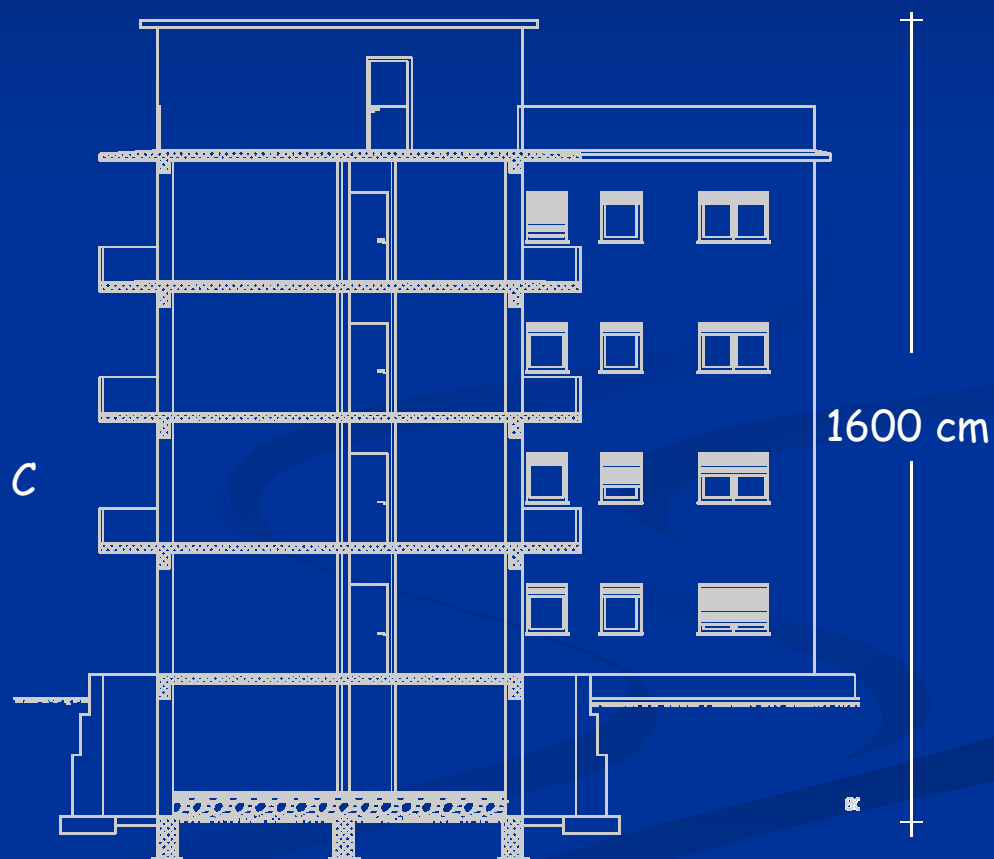
## Descrizione edificio in esame

### Caratteristiche generali:

- uso residenziale
- suolo costituito da sabbie e argille mediamente addensate
- zona sismica di media intensità
- materiali: cls C25/30 acciaio B450 C

### Sviluppo in elevazione:

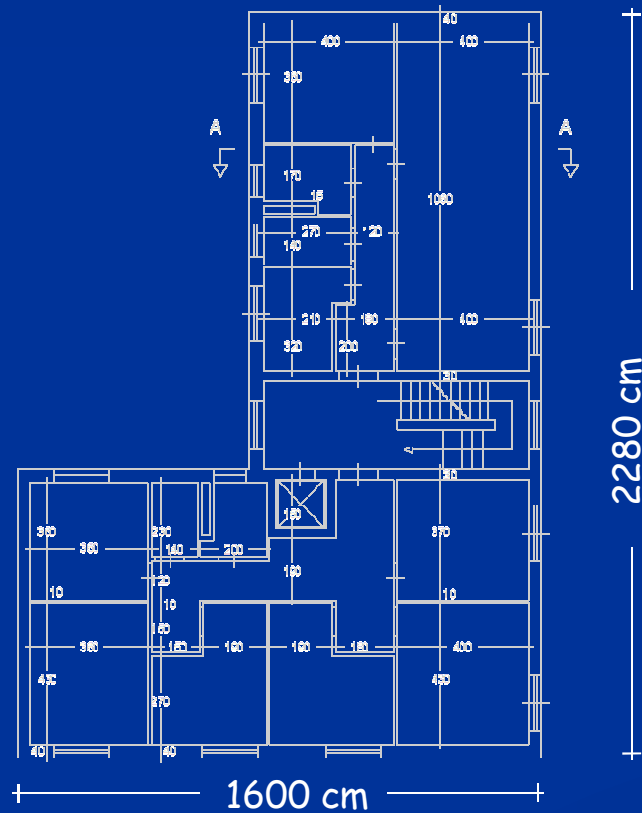
- terrazza praticabile
- 3 piani in elevazione
- piano terra
- piano cantinato



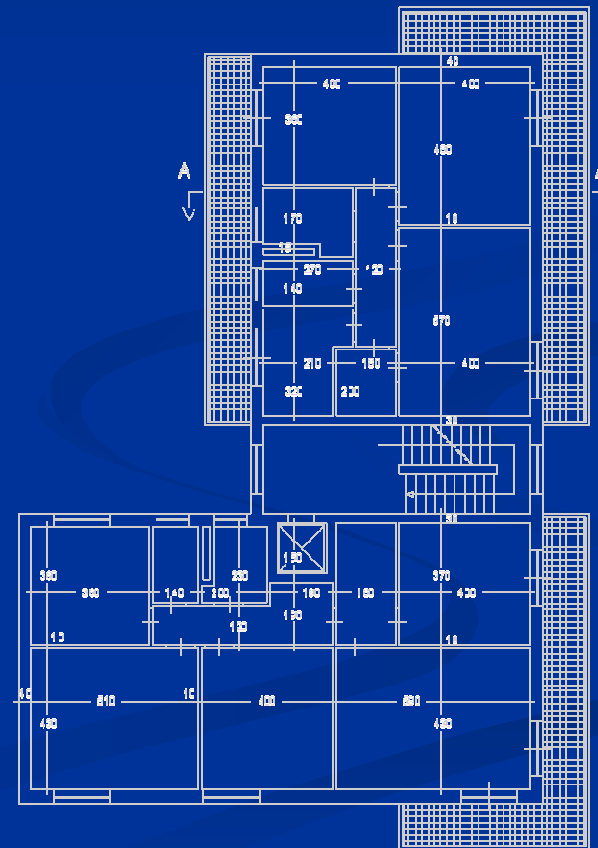
# Edificio in esame

## Descrizione

Piano terra



Piano tipo

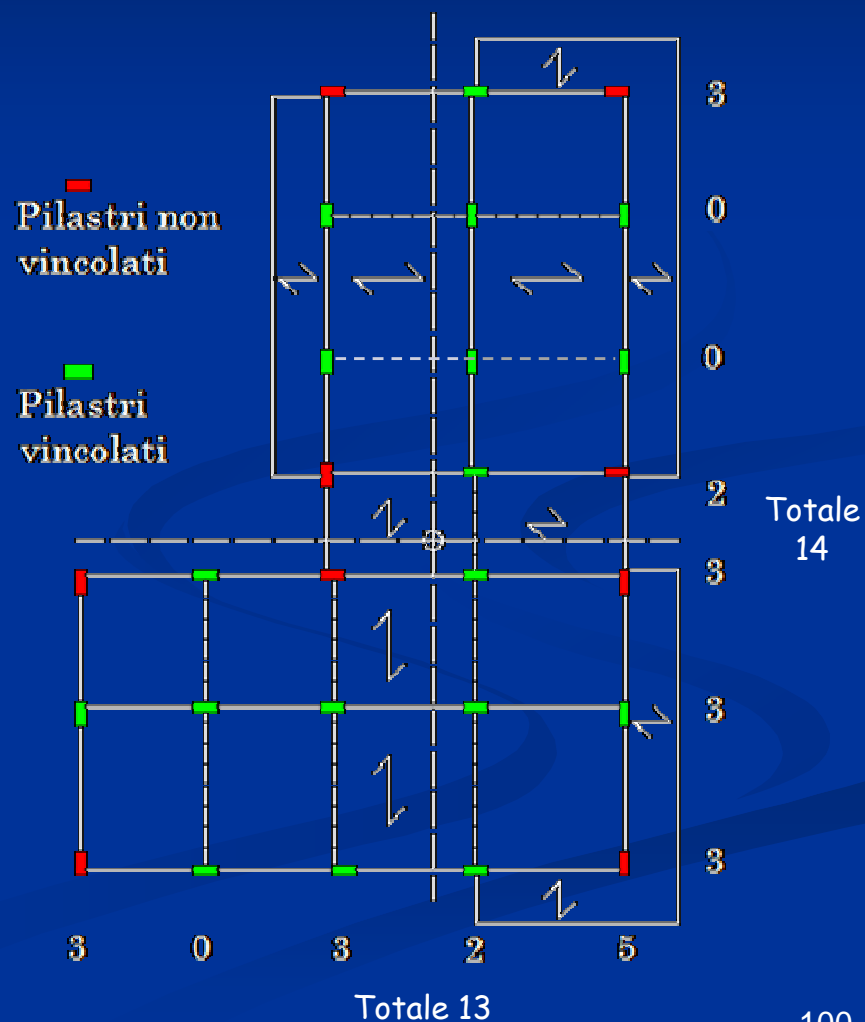


# Edificio in esame

## Impostazione della carpenteria

Nessuna differenza di impostazione della carpenteria tra BF e BI in quanto essa deriva dall'esigenza di:

- portare i carichi verticali
- distribuire uniformemente gli elementi resistenti alle azioni sismiche
- rispettare l'architettoneco



# Edificio in esame

## Predimensionamento delle sezioni

### Base fissa

risposta inelastica controllata  
degli elementi strutturali



scelta fra CD "A" o CD "B"

### Base isolata

risposta elastica degli  
elementi strutturali e  
spostamento controllato del  
sistema di isolamento



scelta di periodo e  
smorzamento

# Dimensionamento edificio isolato

## Predimensionamento delle sezioni

- Solaio 22cm (18 cm per il torrino scala)
- Travi a spessore 60x22
- Travi emergenti 30x50 in copertura e torrino scala  
30x60 in tutti gli altri piani
- Pilastri 30x50 torrino scala  
30x70 per tutti i pilastri dal II al V ordine

# Verifica delle scelte progettuali – SLV

Valutazione degli effetti sismici al variare di periodo e smorzamento

Periodo BF

$$T_{bf} = 0.611s$$

Periodo BI

$$1.833 s \leq T_{is} \leq 3.0 s$$

Si considerano 4 Casi di isolamento

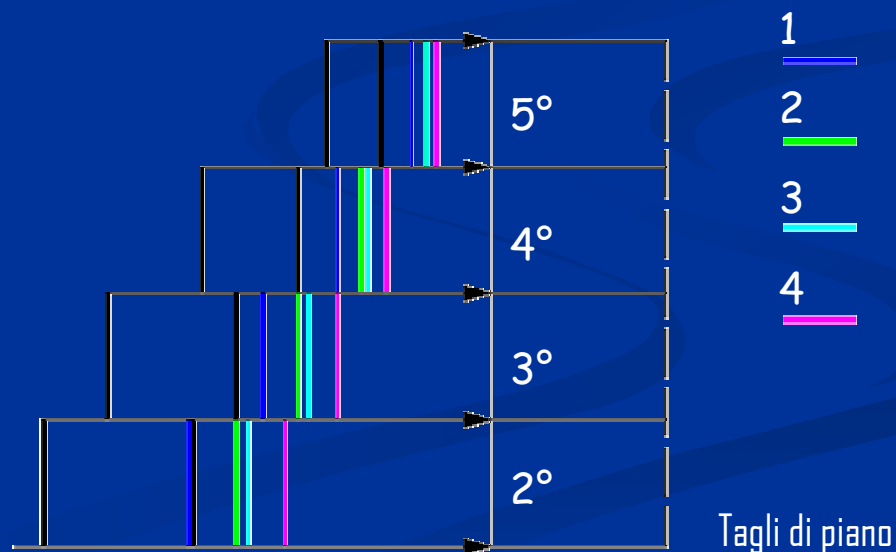
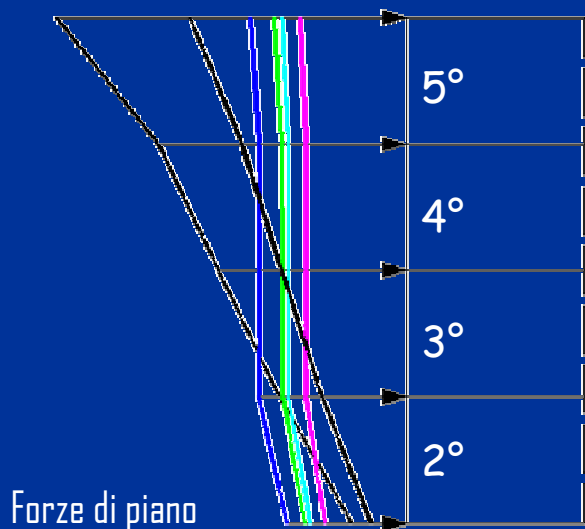
	Tipo di struttura	Periodo [s]	Smorzamento [%]	Fattore di struttura	$S_e$	Variazione di $S_e$ rispetto al caso 5
Caso 1	BI	2.0	10	1.50	0.116 g	-2 %
Caso 2	BI	2.0	16	1.50	0.098 g	-18 %
Caso 3	BI	2.5	10	1.50	0.093 g	-22 %
Caso 4	BI	2.5	16	1.50	0.079 g	-44 %
Caso 5	BF CD "B"	0.611	5	3.90	0.179 g	+50%
Caso 6	BF CD "A"	0.611	5	5.85	0.119 g	-

# Verifica delle scelte progettuali – SLV

Valutazione degli effetti sismici al variare di periodo e smorzamento

Per la struttura isolata si ha :

- forze proporzionale solo alla massa
- riduzione delle forze di piano agli ultimi ordini
- riduzione del taglio di piano a tutti gli ordini



# Verifica delle scelte progettuali – SLV

Valutazione degli effetti sismici al variare di periodo e smorzamento

## Caso 1

### Verifica Travi (2° ordine)

$$M_{\max} = 260 \text{ kNm}$$



sezione 30x60  
più che sufficiente

### Verifica Pilastri (2° ordine)

$$M_{\max} = 225 \text{ kNm}$$

$$N = 90-1070 \text{ kN}$$



sezione 30x70  
più che sufficiente  
anche per  $M_x + 0.3M_y$



# Verifica delle scelte progettuali – SLV

## Prime conclusioni

### Caso 1-4

$$T_{is} \cong 3T_{bf}$$

(ovvero  $T_{is} = 2.0 \text{ s}$ )



sezioni approssimabili a quelle necessarie per la BF in CD "A"

$$T_{is} > 3T_{bf}$$

(ovvero  $T_{is} = 2.5 \text{ s}$ )



riduzione delle sezioni rispetto a quelle necessarie per la BF in CD "A"

# Sistema di isolamento

## Verifica allo SLC

### Spostamento di progetto

$d_2 = d_{dc} + \text{incremento di spostamento per effetto torsionale}$

In tale espressione, scelto il periodo fondamentale della struttura isolata si ricava la rigidezza del sistema di isolamento e quindi

$$d_{dc} = \frac{w S_e (T_{is}, \xi_{is})}{k_{is}}$$

	Caso 1 (2.0s, 10%)	Caso 2 (2.0s, 16%)	Caso 3 (2.5s, 10%)	Caso 4 (2.5s, 16%)
$k_{is}$ [kN/m]	15851	15851	10145	10145
$S_e$ [g]	0.225	0.190	0.180	0.152
$d_{dc}$ [m]	0.224	0.189	0.280	0.236

# Sistema di isolamento

Verifica allo SLC

Spostamento di progetto

$d_2 = d_{dc} + \text{incremento di spostamento per effetto torsionale}$

In tale espressione, l'incremento di spostamento per effetto torsionale dipende da:

- eccentricità accidentale, fissata dalle NTC (5% di  $L_x$  o  $L_y$ )
- eccentricità strutturale dipendente dalla distribuzione planimetrica degli isolatori



si sono studiate diverse ipotesi di distribuzione planimetrica degli isolatori

# Sistema di isolamento

Verifica allo SLC

Ipotesi 1 [cm]

$e_x = 0.02$     $e_y = 0.92$



# Sistema di isolamento

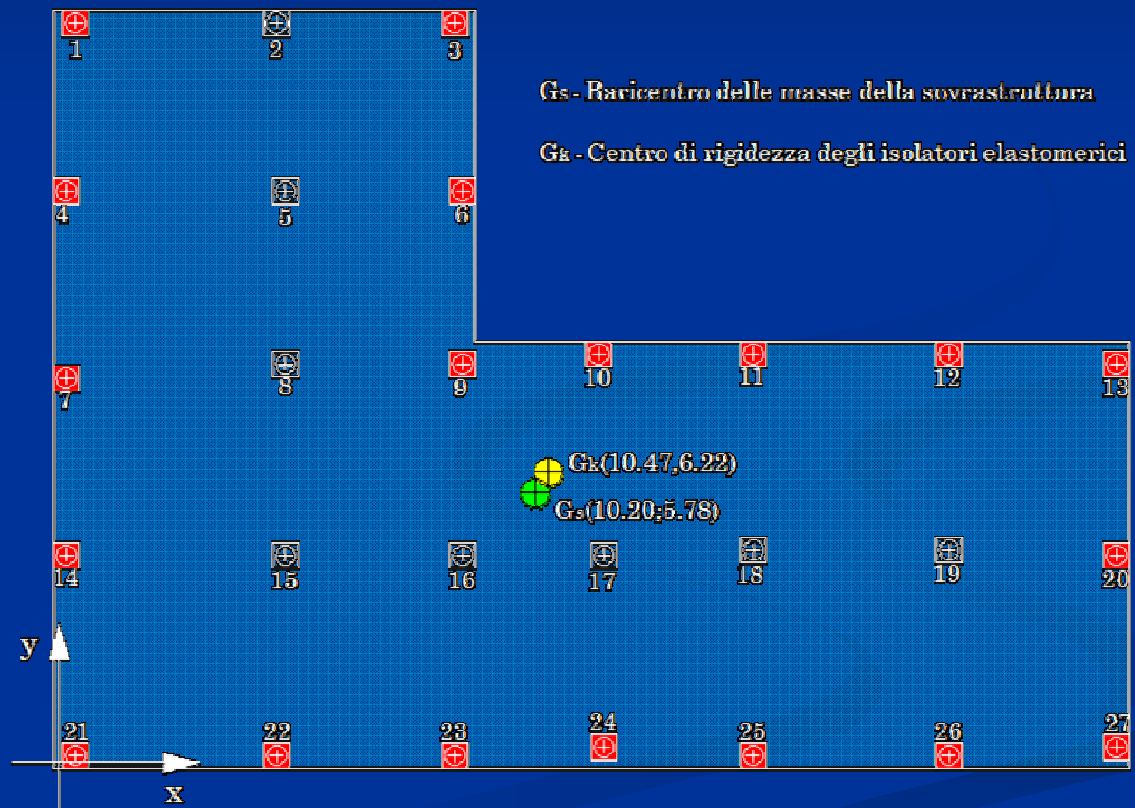
## Verifica allo SLC

Ipotesi 1 [cm]

$e_x = 0.02$     $e_y = 0.92$

Ipotesi 2

$e_x = 0.27$     $e_y = 0.44$



# Sistema di isolamento

## Verifica allo SLC

Ipotesi 1 [cm]

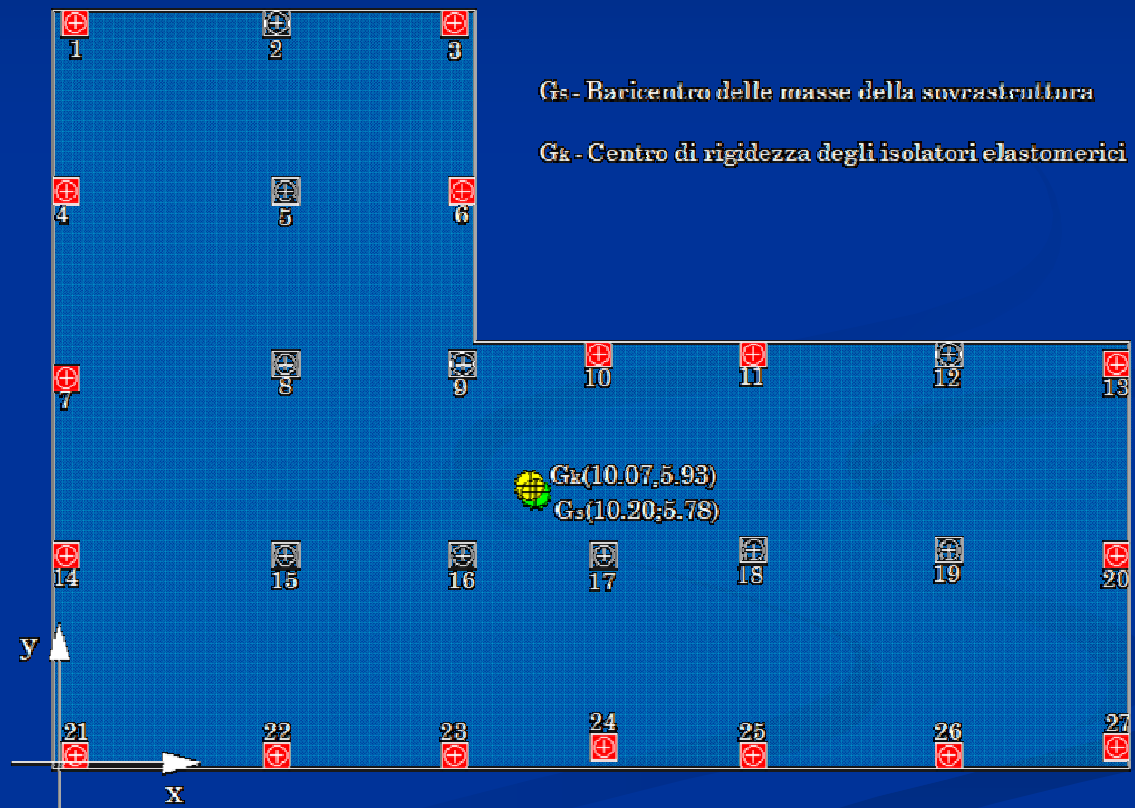
$e_x = 0.02$     $e_y = 0.92$

Ipotesi 2

$e_x = 0.27$     $e_y = 0.44$

Ipotesi 3

$e_x = 0.13$     $e_y = 0.15$



# Sistema di isolamento

## Verifica allo SLC

Ipotesi 1 [cm]

$e_x = 0.02$     $e_y = 0.92$

Ipotesi 2

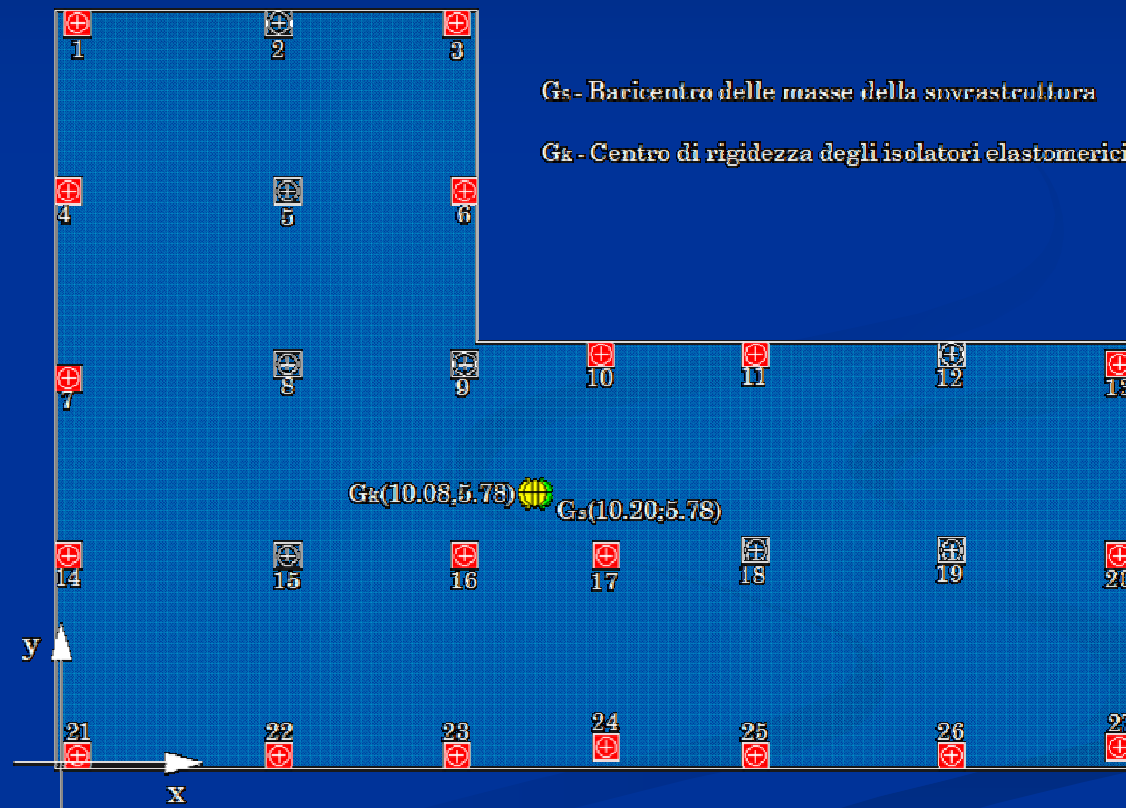
$e_x = 0.27$     $e_y = 0.44$

Ipotesi 3

$e_x = 0.13$     $e_y = 0.15$

Ipotesi 4

$e_x = 0.12$     $e_y = 0.00$



# Sistema di isolamento

## Verifica allo SLC

Ipotesi 1 [cm]

$e_x = 0.02$     $e_y = 0.92$

Ipotesi 2

$e_x = 0.27$     $e_y = 0.44$

Ipotesi 3

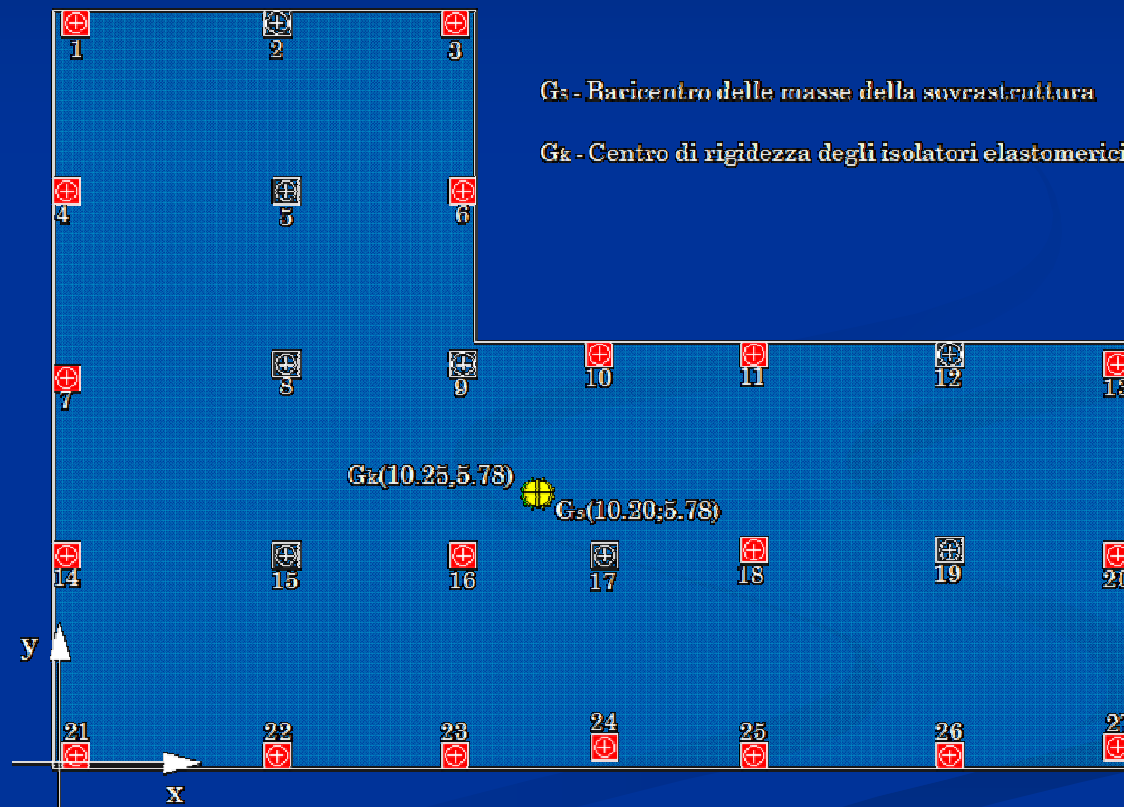
$e_x = 0.13$     $e_y = 0.15$

Ipotesi 4

$e_x = 0.12$     $e_y = 0.00$

Ipotesi 5

$e_x = 0.05$     $e_y = 0.00$





# Sistema di isolamento

Verifica allo SLC

Ipotesi 5	Caso 1 (2.0s,10%)	Caso 2 (2.0s,16%)	Caso 3 (2.5s,10%)	Caso 4 (2.5s,16%)
$k_{is}$ [kN/mm]	0.834	0.834	0.533	0.533
$d_2$ [cm]	27.4	23.2	34.3	28.9

Isolatore scelto

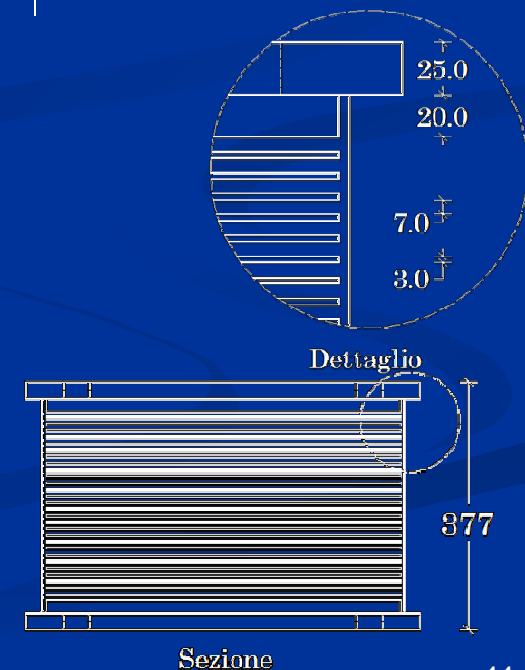
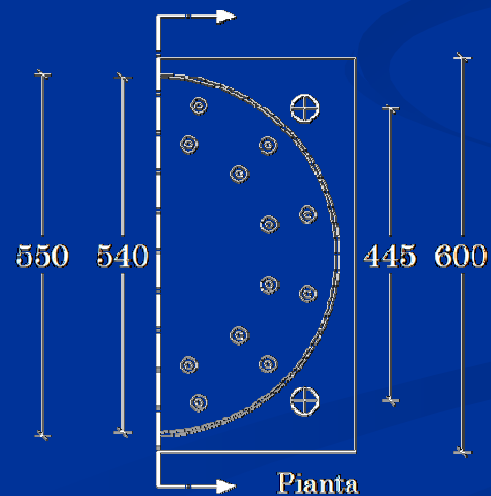
HDRB Normal

$G_{din} = 0.8 \text{ MPa}$

$\xi = 10\%$

$k_{is} = 0.94 \text{ kN/mm}$

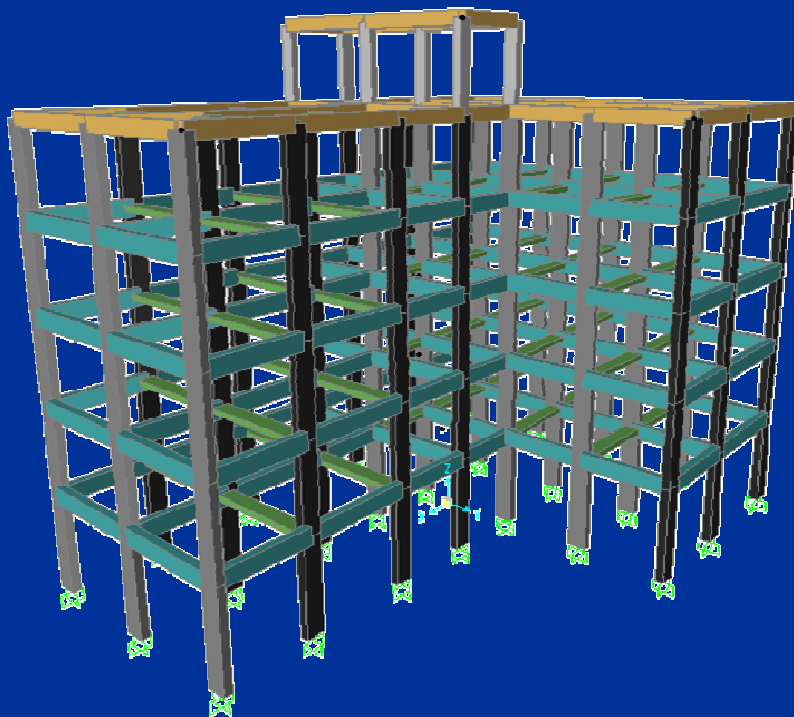
$d_{max} = 400 \text{ mm}$



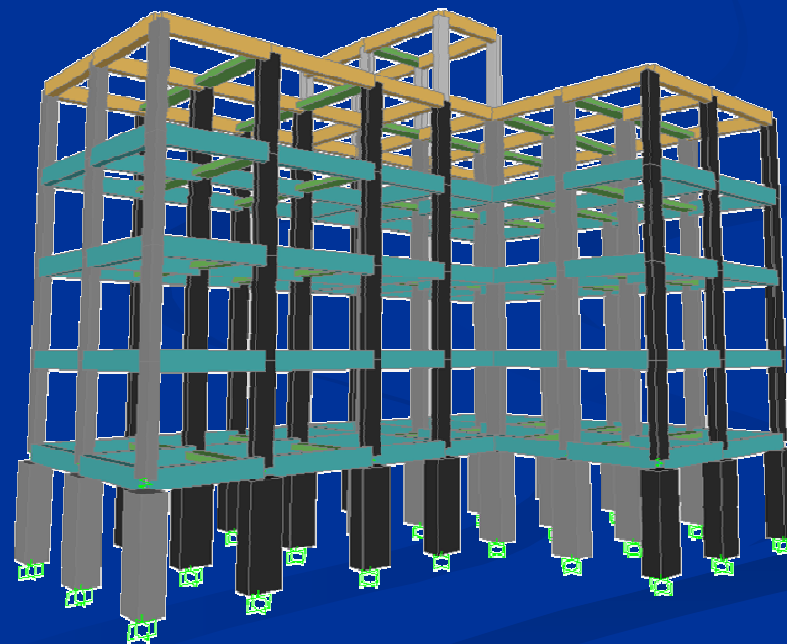
# Risoluzione dello schema strutturale

## Analisi modale

Entrambe le strutture sono state schematizzate come telai spaziali



Modellazione struttura a base fissa

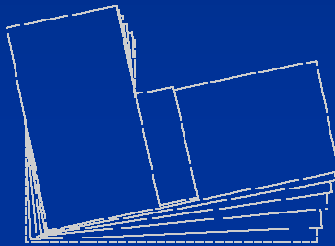


Modellazione struttura isolata

# Risoluzione dello schema strutturale

## Analisi modale

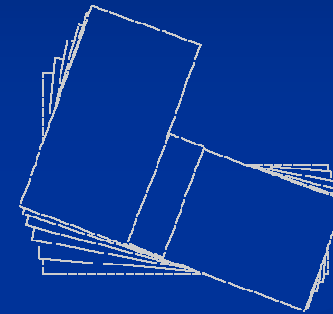
### Deformate modali BF



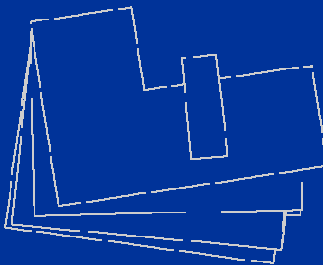
Modo 1  $T = 0.600s$



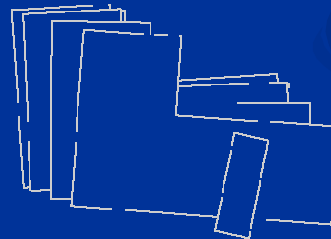
Modo 2  $T = 0.573s$



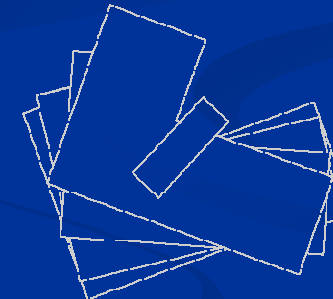
Modo 3  $T = 0.475s$



Modo 4  $T = 0.195s$



Modo 5  $T = 0.191s$



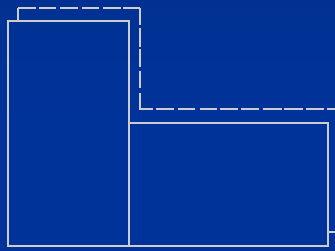
Modo 6  $T = 0.155s$

- Il moto traslatorio - rotatorio è fortemente accoppiato per sisma in direzione y
- La parte destra dell'edificio risulta più deformabile per sisma in direzione y

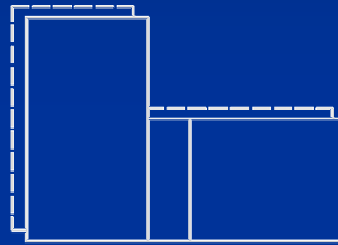
# Risoluzione dello schema strutturale

## Analisi modale

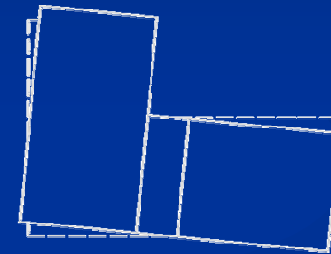
### Deformate modali BI



Modo 1  $T = 1.960s$



Modo 2  $T = 1.959s$



Modo 3  $T = 1.704s$

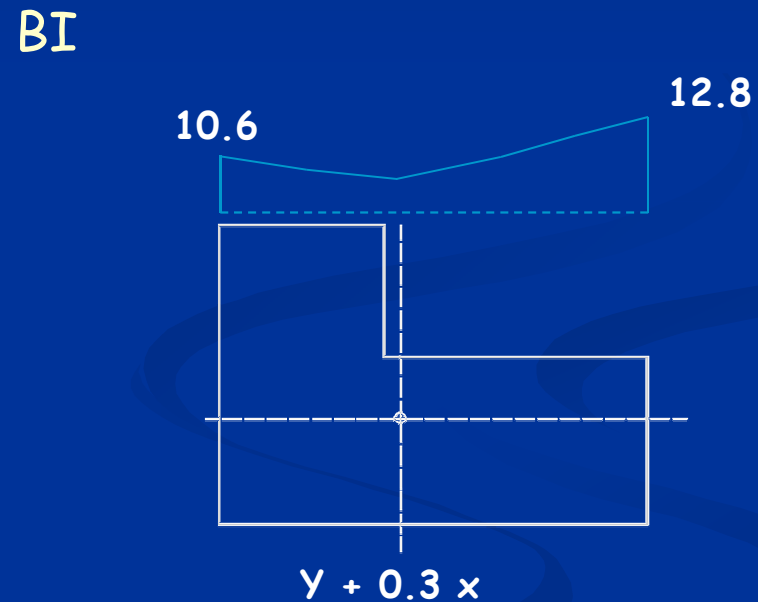
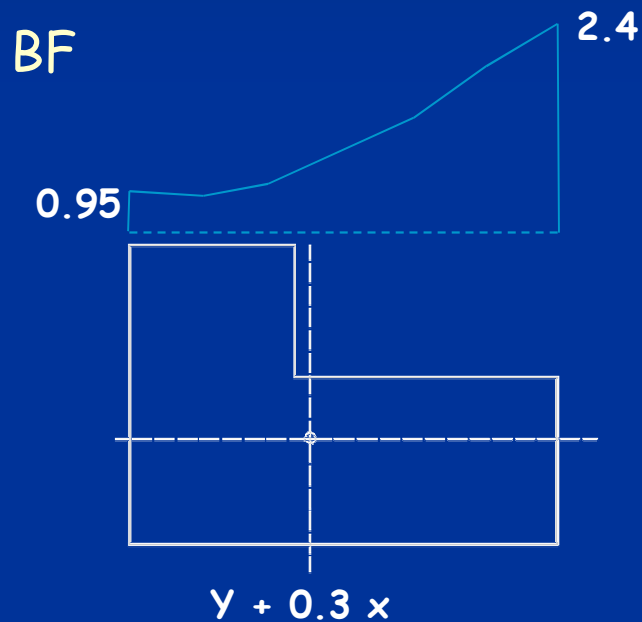
- I primi due modi sono di traslazione lungo le direzioni principali di inerzia
- Il terzo modo è puramente rotazionale
- la sovrastruttura si comporta come un corpo rigido oscillante sul sistema di isolamento

Grazie all'isolamento alla base, l'edificio risente molto meno della carenza di rigidità della parte destra della struttura per azione sismica in direzione y

# Risoluzione dello schema strutturale

Analisi modale con spettro di progetto

## Inviluppo spostamenti



Grazie all'isolamento alla base, l'edificio risente molto meno della carenza di rigidità della parte destra della struttura per azione sismica in direzione  $y$

# Risoluzione dello schema strutturale

## Ultime conclusioni

L'isolamento alla base riduce gli effetti torsionali dovuti a:

- cattiva impostazione della carpenteria
- irregolarità strutturali