



**21-10-2019**

# **DISPOSITIVI DI ISOLAMENTO SISMICO**

**Principi, modalità d'impiego e confronti con  
strutture tradizionali – II PARTE**

**Modellazione ed analisi di strutture isolate:**

**applicazioni a casi pratici di strutture nuove ed esistenti**

*BENEVENTO, 21-X-2019*

*Pierpaolo Cicchiello – Strutturista in MONZA (pc@ingegneriintegrata.com)*

# Progettare strutture protette dai terremoti con dispositivi antisismici - **APPLICAZIONI**

Criteri di modellazione dei dispositivi sismici

Caso di studio: analisi dinamica lineare con isolatori elastomerici

Analisi dinamica Time History e gestione dello smorzamento

Esempio 1:

Isolamento alla base con friction pendulum di una struttura civile

Esempio 2:

Isolamento con dissipatori a scorrimento di un capannone esistente

Esempio 3:

Isolamento sotto la platea fondale di un ospedale esistente

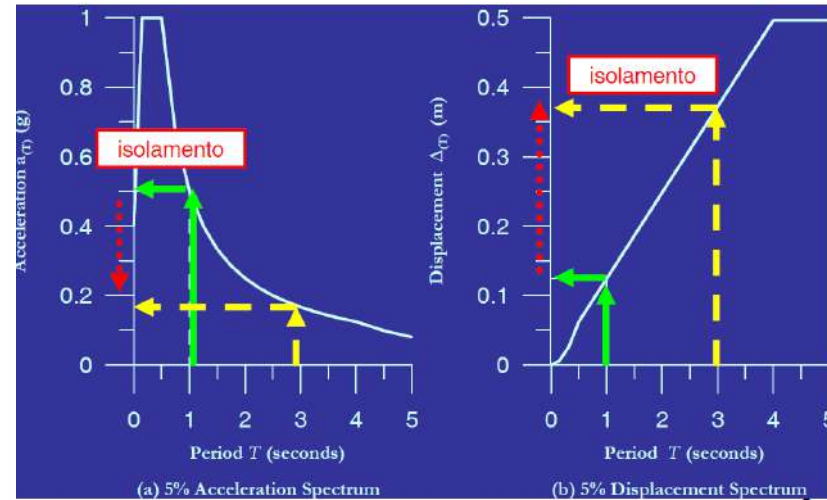
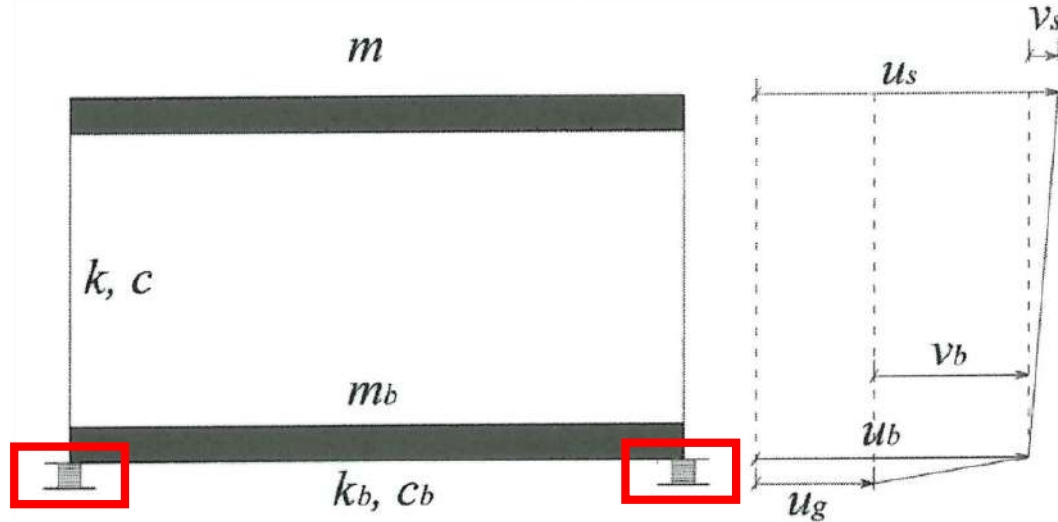
Pre-Dimensionamento 1: Isolamento con HDRB

Pre-Dimensionamento 2: Isolamento con FP

# CRITERI DI MODELLAZIONE DISPOSITIVI SISMICI

# CRITERI DI MODELLAZIONE DISPOSITIVI SISMICI

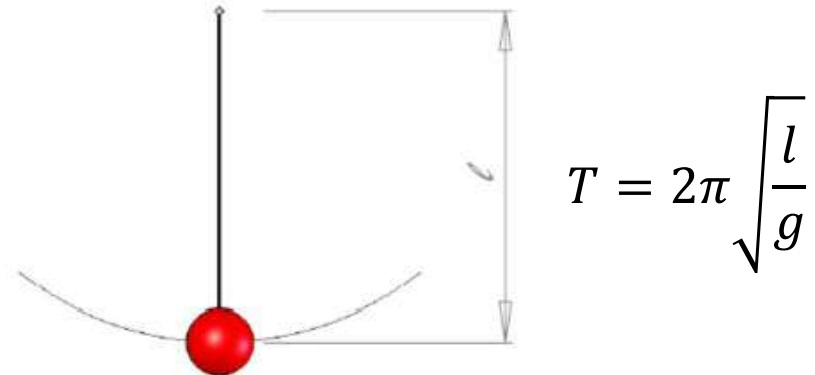
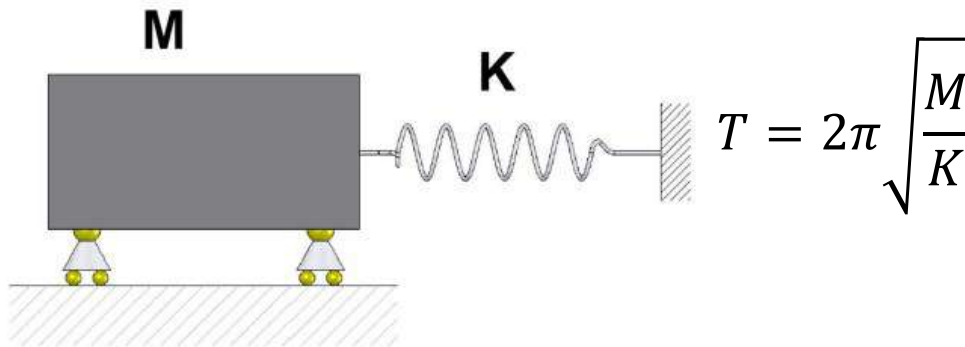
## DISPOSITIVI DI ISOLAMENTO ALLA BASE



*Trattazione di Naeim e Kelly*

Come si fa ad aumentare il periodo proprio di una parte della struttura?

Inserendo fra la struttura e la sottostruttura un oscillatore che forzi la struttura ad oscillare prevalentemente secondo il periodo proprio dell'oscillatore stesso



# CRITERI DI MODELLAZIONE DISPOSITIVI SISMICI

## ISOLATORI IN GOMMA A BASSO SMORZAMENTO (LDRB)

Possono essere ottenuti con gomma naturale (isoprene) o neoprene. I 2 tipi di gomma, con proprietà molto stabili, non esibiscono il fenomeno di **creep** per carichi di lunga durata.

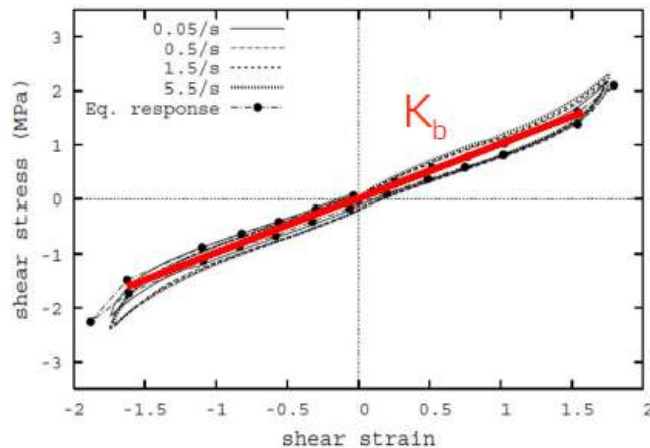
Sperimentalmente tali isolatori presentano un **ciclo d'isteresi molto affusolato** (racchiude un'area molto esigua), indice di un comportamento elastico lineare al crescere della deformazione.

La rigidezza  $K_b$  si mantiene pressoché costante sino al raggiungimento del valore di progetto della deformazione di taglio e quindi la relazione forza-deformazione può essere approssimata tramite un legame lineare. Tale caratteristica rende molto **agevole** la loro **modellazione analitica** e rappresenta un vantaggio tipico di questi dispositivi, con la **semplicità** ed i **bassi costi di produzione** e all'invarianza delle proprietà meccaniche rispetto ai cicli di carico, alla temperatura e all'invecchiamento.

L'unico svantaggio è rappresentato dal basso valore dello smorzamento (2÷3%) che può implicare la necessità di introdurre sistemi dissipativi ausiliari per contenere gli spostamenti.



CS test [RB2]



## CREEP

Deformazione di un materiale sottoposto a **sforzo costante** che si verifica nei materiali mantenuti per **lunghi periodi ad alta temperatura**

# CRITERI DI MODELLAZIONE DISPOSITIVI SISMICI

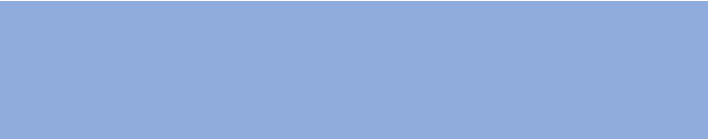
## ISOLATORI IN GOMMA A BASSO SMORZAMENTO (LDRB)

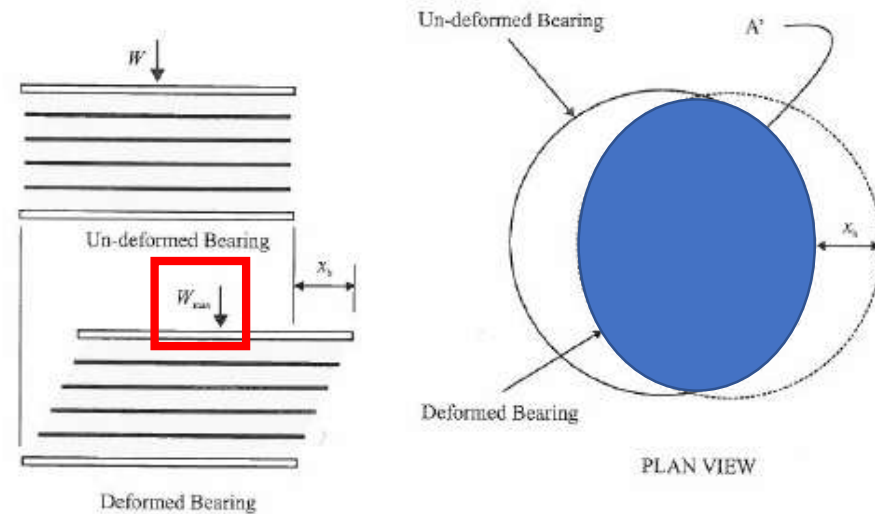
Caratteristiche:

Resistenza assiale

$$W_{max} = A' G_r S \gamma$$

Dove:

- 
- $G_r$  è il modulo di taglio della gomma (0.4 MPa - 1.4 MPa);
- $S$  è un fattore di forma (per isolatori circolari  $S = D/4t_r$ , con  $t_r$  spessore dello strato di gomma
- $\gamma$  è la deformazione a taglio ammissibile (circa pari a 1.0)



# CRITERI DI MODELLAZIONE DISPOSITIVI SISMICI

## ISOLATORI IN GOMMA A BASSO SMORZAMENTO (LDRB)

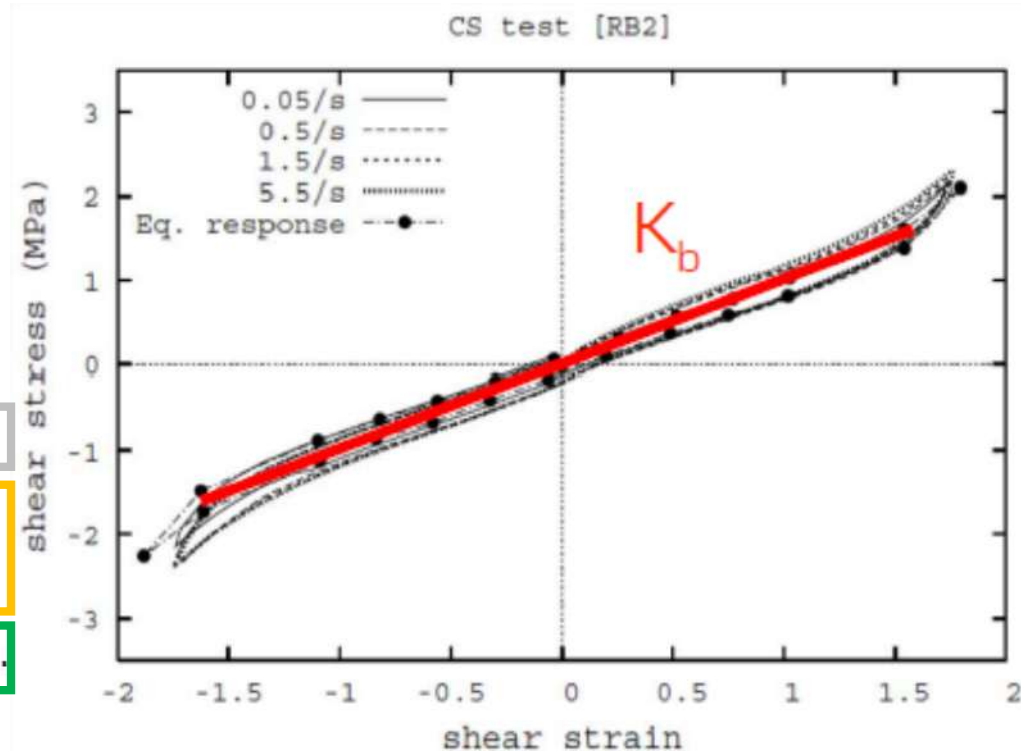
Caratteristiche:

Rigidità orizzontale

$$K_b = \frac{G_r A}{h}$$

Dove:

- A è l'area dell'isolatore;
- $G_r$  è il modulo di taglio della gomma (0.4 MPa - 1.4 MPa);
- h è l'altezza complessiva della gomma.

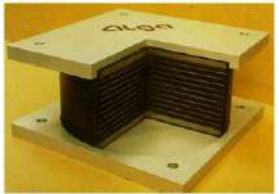


(Da Bhuiyan & Okui, 2012)



# CRITERI DI MODELLAZIONE DISPOSITIVI SISMICI

## ISOLATORI IN GOMMA AD ALTO SMORZAMENTO (HDRB)



Gli HDRB usano mescole ottenute aggiungendo all'elastomero speciali cariche additive (nerofumo, silicio).

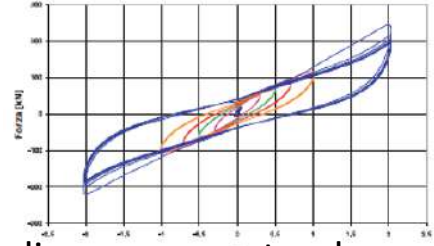
[S, N, H, identificano, nella sigla dell'isolatore, la miscela morbida (S), normale(N), dura (H)]

Vantaggi:

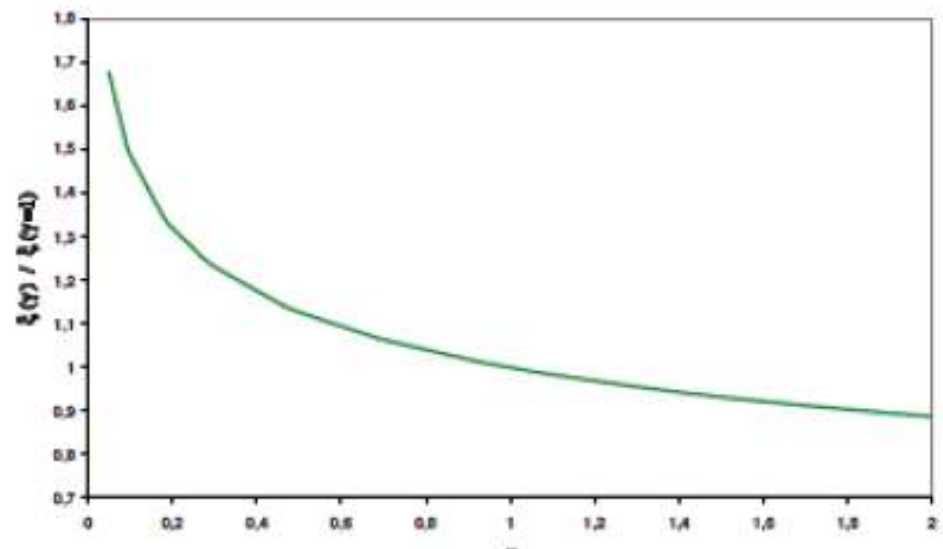
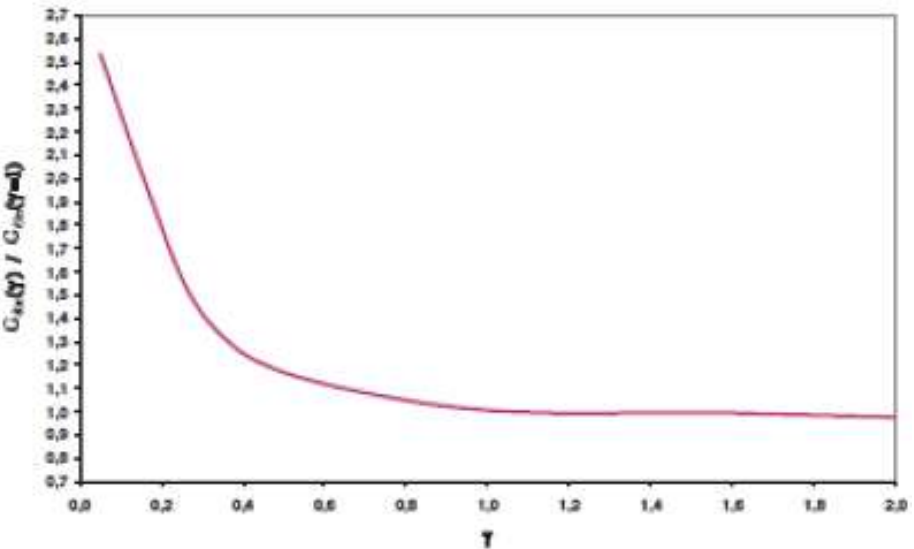
- elevata capacità dissipativa, che limita lo spostamento di progetto a valori accettabili (10÷18%);
- una buona capacità ricentrante.

Limiti derivati dalle proprietà delle gomme:

- sono più soggette a fenomeni di invecchiamento
- cambiano a causa delle alte temperature



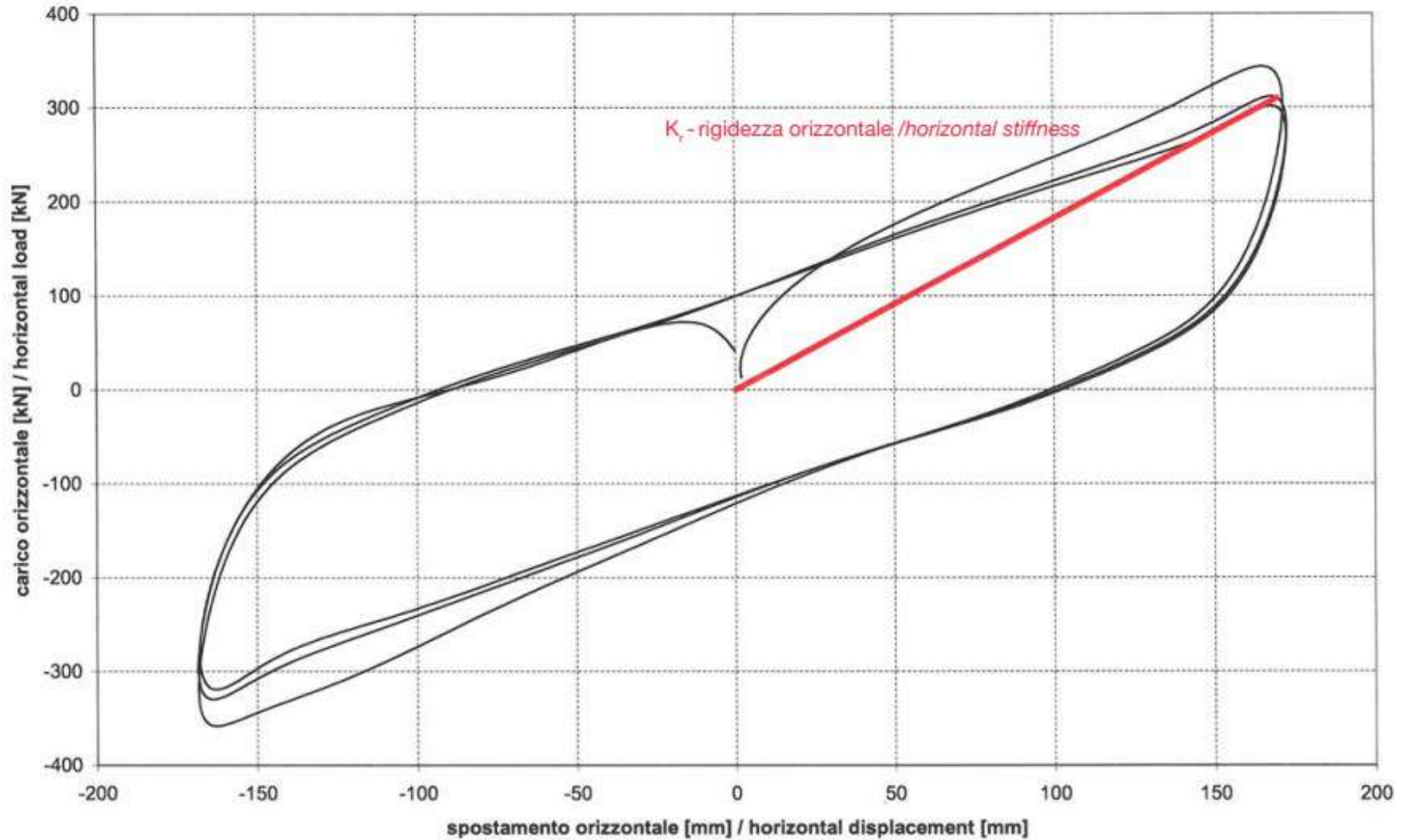
Mostrano risposta fortemente non lineare, caratterizzati da valori di rigidità e di smorzamento che variano al variare della deformazione tagliante  $\gamma$ .





# CRITERI DI MODELLAZIONE DISPOSITIVI SISMICI

## ISOLATORI IN GOMMA AD ALTO SMORZAMENTO (HDRB)



# CRITERI DI MODELLAZIONE DISPOSITIVI SISMICI

## ISOLATORI ELASTOMERICI (RB – Rubber Bearing) – Modellazione

### PER ANALISI LINEARI E NON LINEARI:

- Modellati con elementi *link* elastici

- Rigidezza orizzontale:

$$K_b = \frac{G_r A}{h}$$

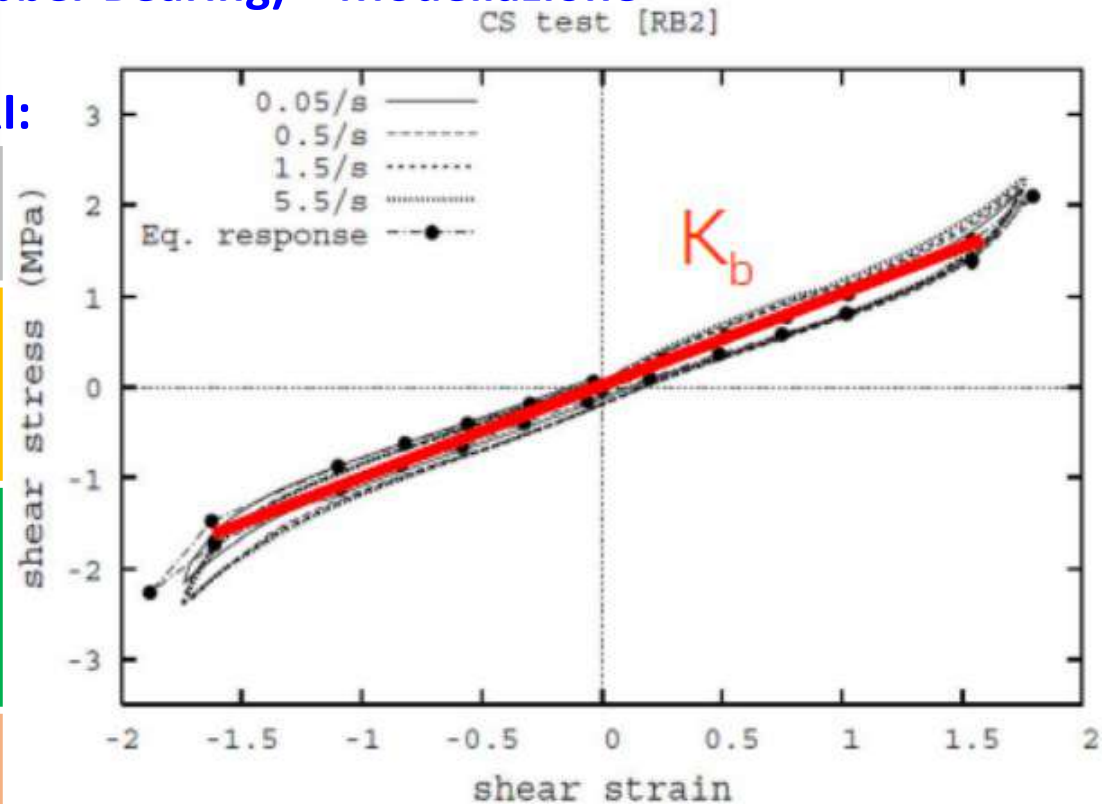
- Rigidezza verticale:

$$K_v = \frac{k_{vY} k_{vV}}{k_{vY} + k_{vV}}$$

$$k_{vY} = \frac{6G_r S^2 A_r}{h_r}$$

$$k_{vV} = \frac{\kappa_r A_r}{h_r}$$

Dove  $\kappa_r$  è il modulo di compressione della gomma,  $\kappa_r \approx 2000$  MPa.



(Da Bhuiyan & Okui, 2012)

$$\xi = 5\%$$

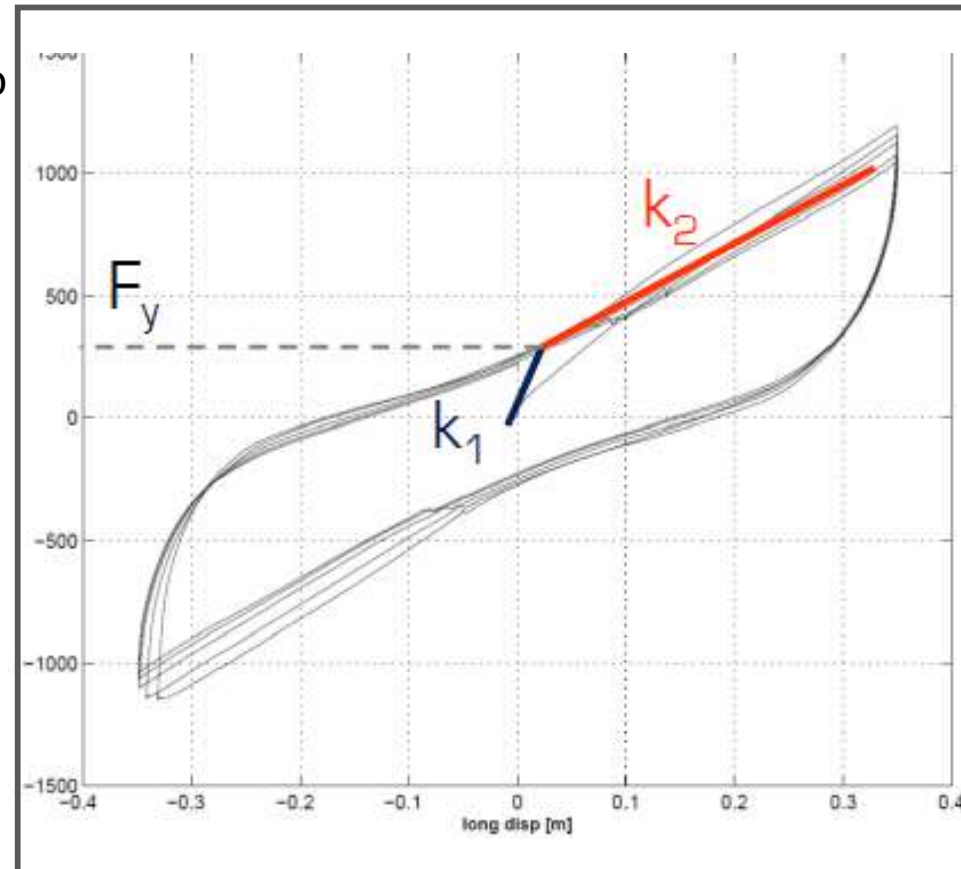
# CRITERI DI MODELLAZIONE DISPOSITIVI SISMICI

## ISOLATORI IN GOMMA CON NUCLEO IN PIOMBO (LRB)

Gli isolatori LRB si differenziano dagli usuali isolatori elastomerici per la presenza di un nucleo centrale in **piombo a cui è affidata la funzione di dissipare energia** mediante la plasticizzazione del piombo; la miscela elastomerica utilizzata è solitamente del tipo a basso smorzamento.

Sono caratterizzati da un legame costitutivo forza–spostamento bilineare, combinazione di:

- quello elastico lineare dell'elastomero
- quello elastico-plastico del nucleo in piombo



# CRITERI DI MODELLAZIONE DISPOSITIVI SISMICI

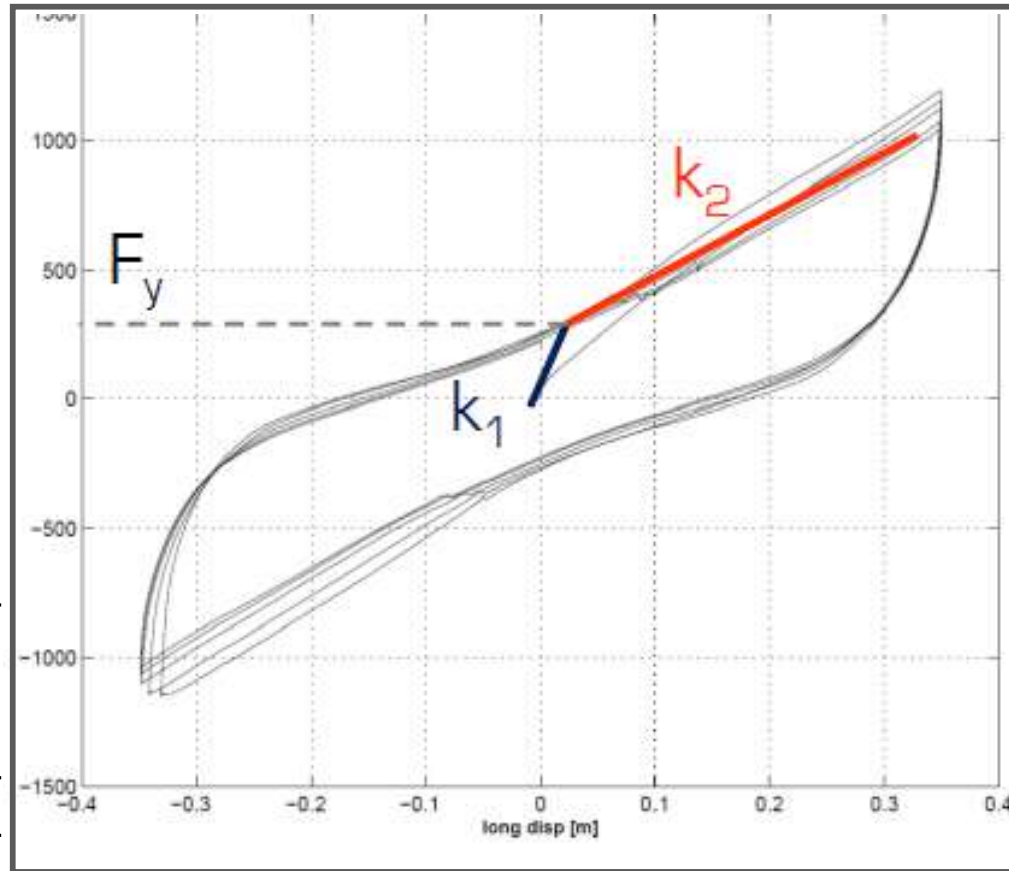
## ISOLATORI IN GOMMA CON NUCLEO IN PIOMBO (LRB)

Si ha dissipazione di energia superiore a quella degli isolatori elastomerici, con un valore dello smorzamento viscoso equivalente che può superare il 30%.

### CICLO DI ISTERESI

Caratterizzato da **rigidezza iniziale  $K_1$** , sino al valore  **$F_y$**  della forza di **snervamento del nucleo in piombo**, e da una **rigidezza finale  $K_2$** .

Lo snervamento del nucleo in piombo, se pur consente di ottenere elevata rigidezza iniziale (9÷16 volte la rigidezza di un isolatore elastomerico armato), rappresenta un limite poiché il superamento della soglia elastica da parte dell'inserito metallico annulla in parte la capacità ricentrante propria dell'elastomero, dando luogo a deformazioni permanenti non trascurabili.





# CRITERI DI MODELLAZIONE DISPOSITIVI SISMICI

## ISOLATORI IN GOMMA CON NUCLEO IN PIOMBO (LRB) - MODELLAZIONE

Rigidezza iniziale

$$k_1 = \frac{1}{h_r} (G_r A_r + G_p A_p)$$

Dove:

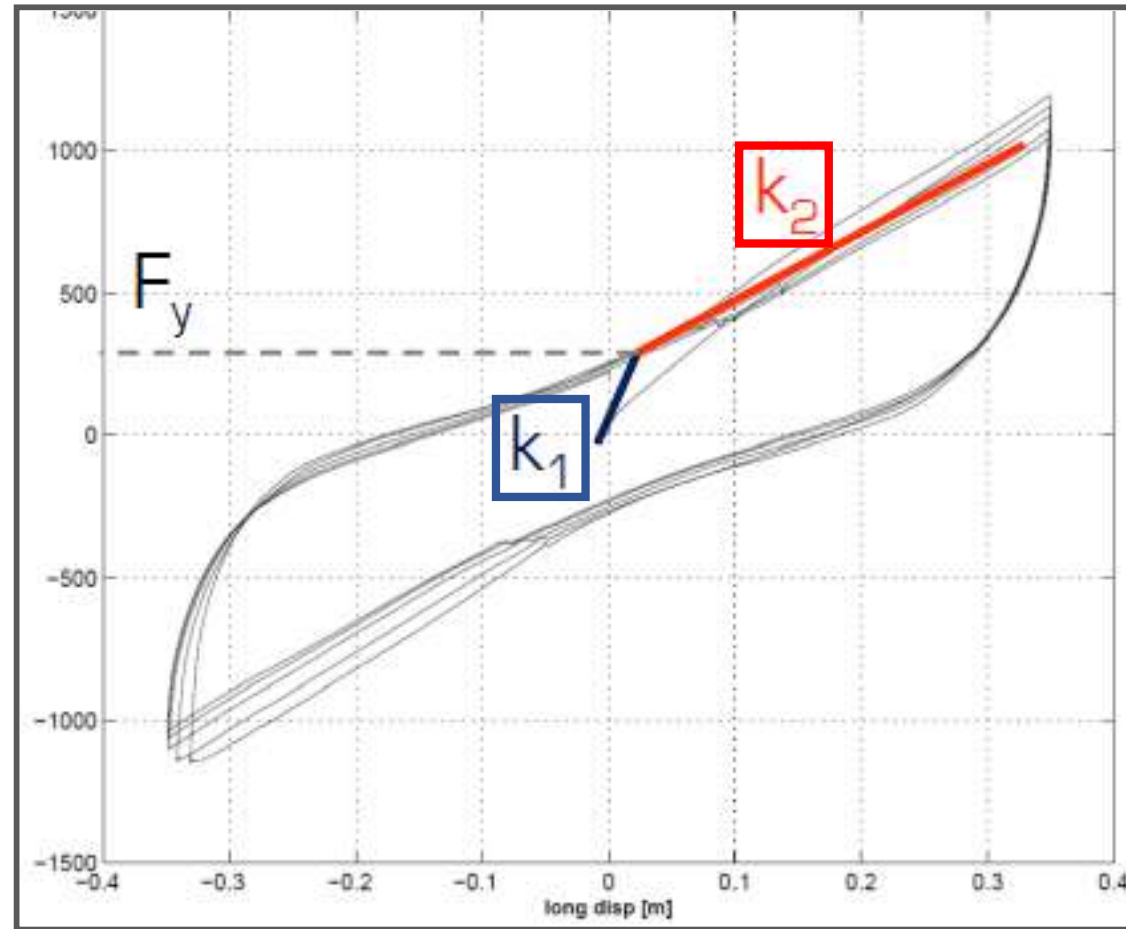
- $A_r$  è l'area della parte in gomma;
- $G_r$  è il modulo di taglio della gomma (0.4 MPa - 1.4 MPa);
- $A_p$  è l'area della parte in piombo;
- $G_p$  è il modulo di taglio del piombo (150 MPa);
- $h_r$  è l'altezza complessiva dell'isolatore.

Rigidezza post-elastica

$$k_2 = \frac{G_r A_r}{h_r}$$

Dove:

- $A_r$  è l'area della parte in gomma;
- $G_r$  è il modulo di taglio della gomma (0.4 MPa - 1.4 MPa);
- $h_r$  è l'altezza complessiva dell'isolatore.



Per i dispositivi comunemente in commercio:

$$k_2 \approx 10k_1 = 10k_b$$

# CRITERI DI MODELLAZIONE DISPOSITIVI SISMICI

## ISOLATORI IN GOMMA CON NUCLEO IN PIOMBO (LRB) – MODELLAZIONE

Forza di snervamento:

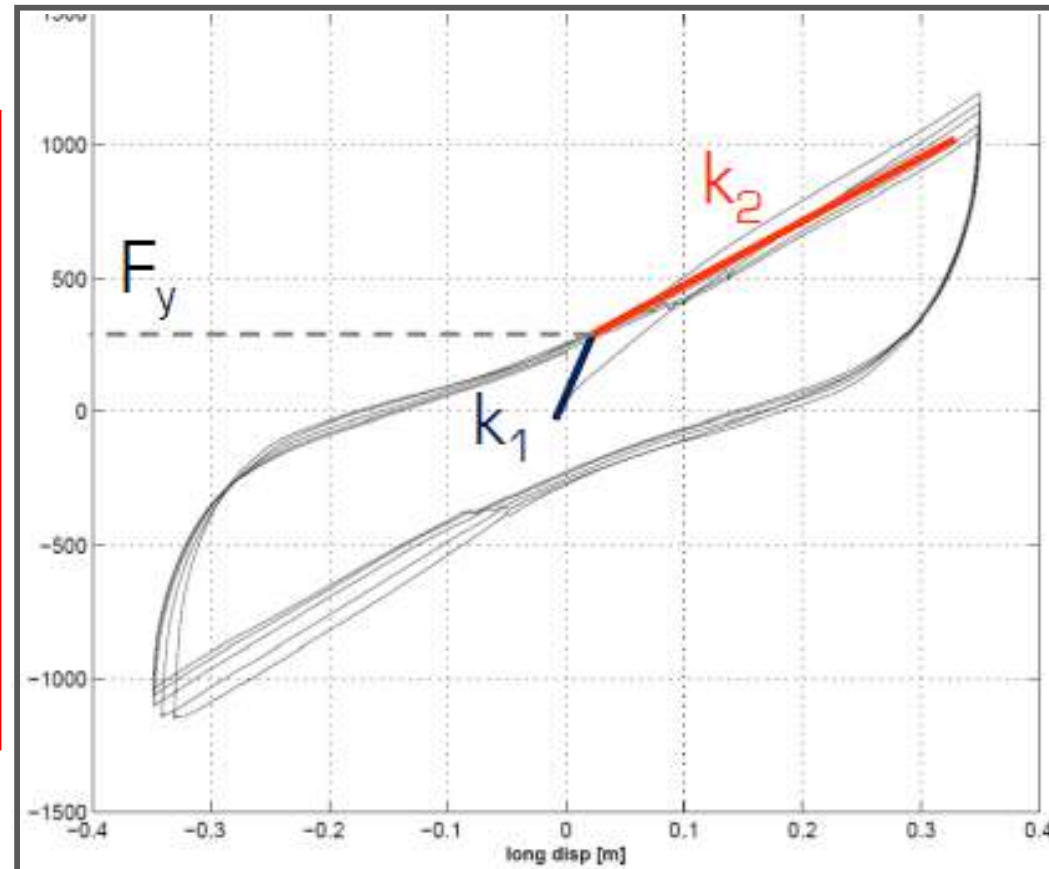
$$F_y = \tau_{py} A_p \left( 1 + \frac{G_r A_r}{G_p A_p} \right)$$

Forza Elastica nella gomma

Trascurabile

Dove:

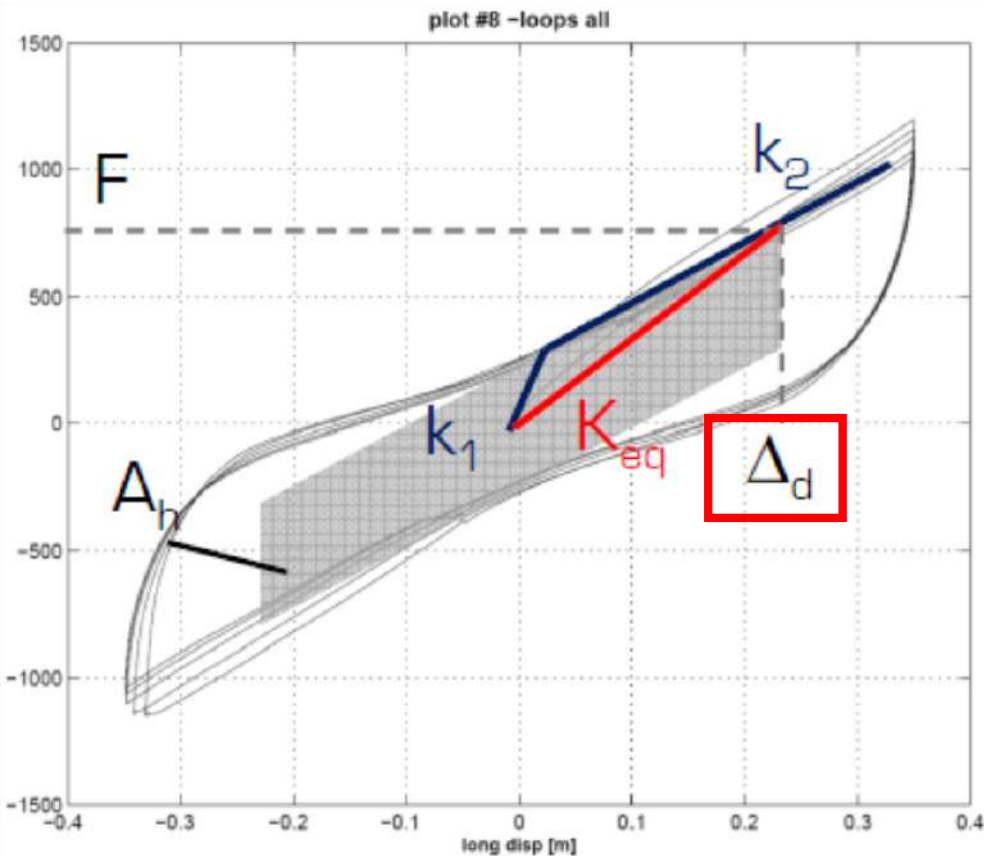
- $\tau_{py}$  è la tensione di snervamento a taglio del piombo,  $\tau_{py} \approx 10 \text{ MPa}$ ;
- $A_p$  è l'area della parte in piombo;
- $A_r$  è l'area della parte in gomma;
- $G_r$  è il modulo di taglio della gomma (0.4 MPa - 1.4 MPa);
- $G_p$  è il modulo di taglio del piombo (150 MPa);



# CRITERI DI MODELLAZIONE DISPOSITIVI SISMICI

## ISOLATORI ELASTOMERICI HDRB E LRB – MODELLAZIONE

### ANALISI LINEARI



- Modellati con elementi *link* elastici
- Comportamento non-lineare, si stima una rigidezza equivalente  $K_{eq}$  corrispondente allo spostamento di progetto  $\Delta_d$  nel sistema di isolamento → Metodo Iterativo:

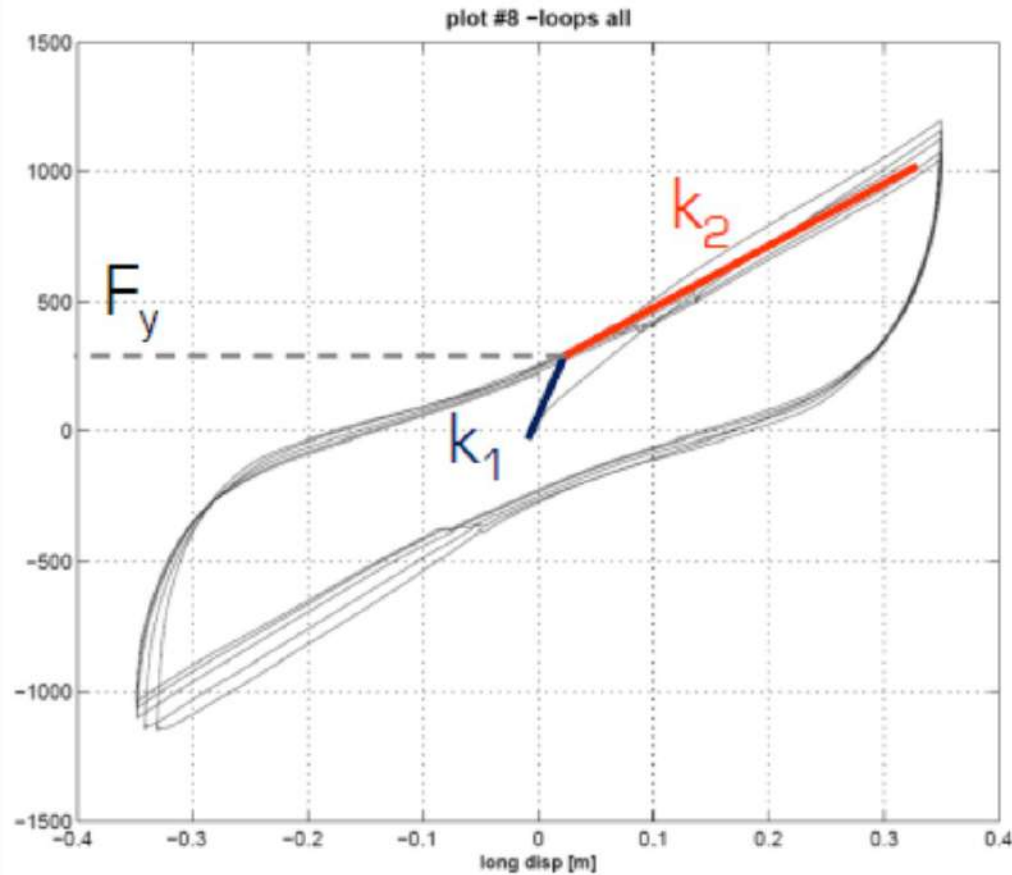
$$\xi_{eq} = \frac{A_h}{2\pi F \Delta_d}$$



# CRITERI DI MODELLAZIONE DISPOSITIVI SISMICI

## ISOLATORI ELASTOMERICI HDRB E LRB – MODELLAZIONE

### ANALISI NON LINEARI



- Modellati con elementi *link* con comportamento bilineare
- Parametri modello bilineare:

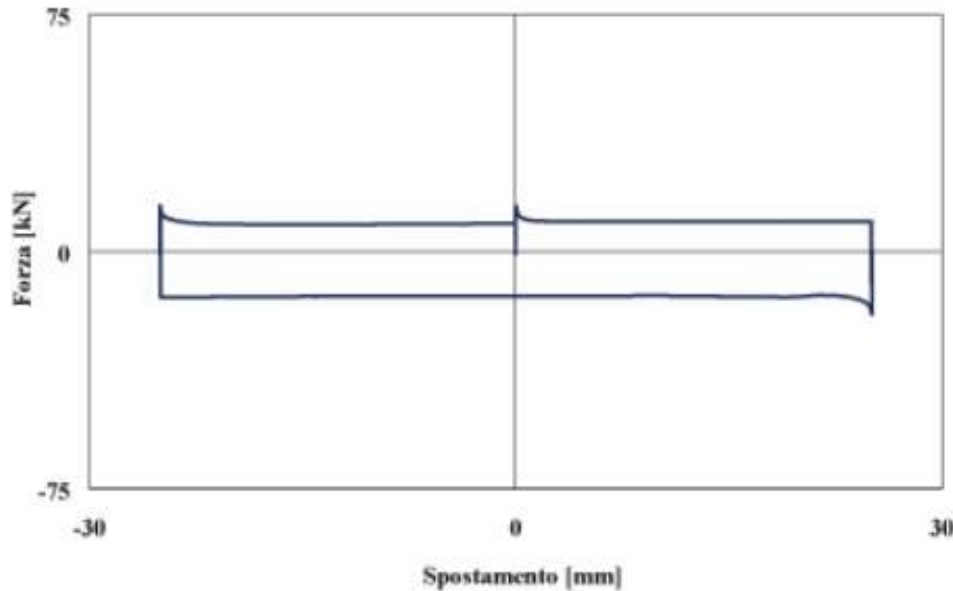
$$F_y = \tau_{py} A_p$$

$$k_1 = \frac{1}{h_r} (G_r A_r + G_p A_p)$$

$$k_2 = \frac{G_r A_r}{h_r}$$

# CRITERI DI MODELLAZIONE DISPOSITIVI SISMICI

## ISOLATORI A SCORRIMENTO E A ROTOLAMENTO (SD)



Gli isolatori a scorrimento o **sliding devices** (SD) sono costituiti da due blocchi in grado di scorrere o rotolare uno sull'altro, essendo le superfici a contatto rivestite con particolari materiali a basso coefficiente di attrito.

Presentano un ciclo d'isteresi del tipo elastico-perfettamente plastico: al crescere della deformazione non si ha incrudimento. La massima sollecitazione tagliante trasmessa alla sovrastruttura è pari al prodotto del coefficiente di attrito dinamico  $\mu$  per il carico verticale di competenza  $W$ .

Non avendo capacità ricentrante, non vengono mai impiegati da soli, quale unica componente del sistema di isolamento, ma in aggiunta a dispositivi ausiliari in grado di esplicare forza di richiamo e smorzamento.

# CRITERI DI MODELLAZIONE DISPOSITIVI SISMICI

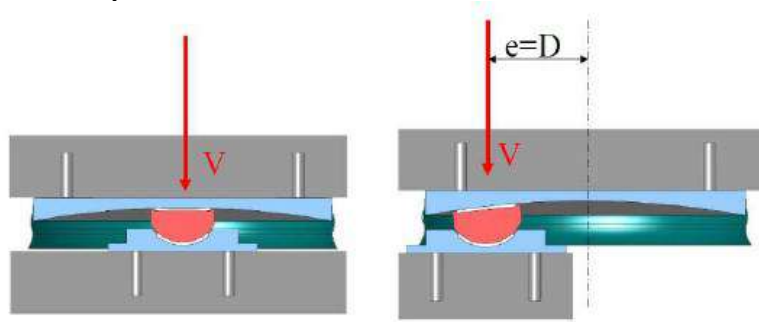
## ISOLATORI A PENDOLO SCORREVOLE (FPS)

Il concetto fondamentale su cui si basa il sistema FPS è quello di moto pendolare che sfruttando la superficie concava del basamento ed il peso scaricato tende a ricentrare il sistema.

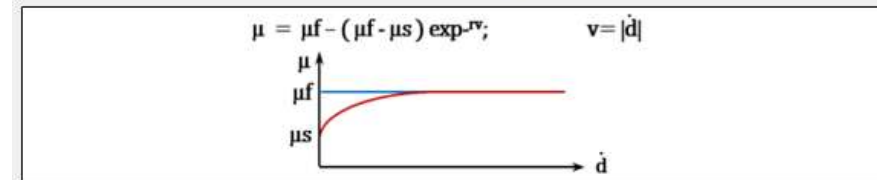
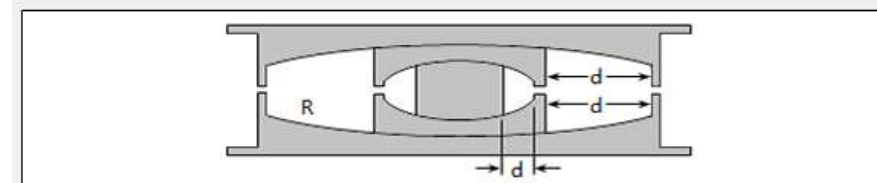
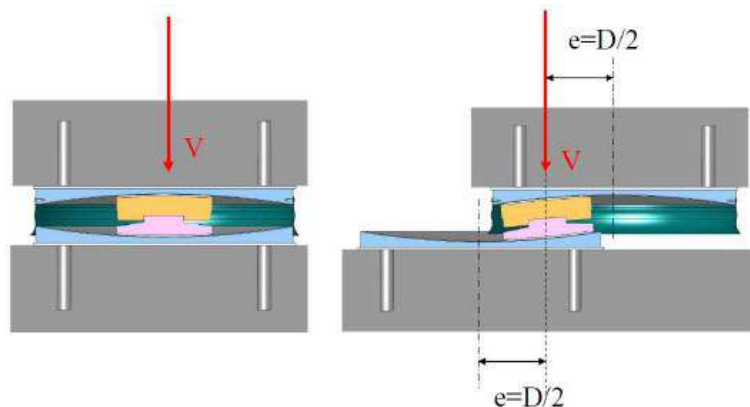
Questi dispositivi sono formati da una superficie articolata che scorre su una calotta sferica di acciaio inox. La superficie articolata è rivestita da materiale composito a basso attrito ed ad alta resistenza. Il movimento del sistema causa la nascita di forze di ricentraggio per geometria.

Permettono lo spostamento relativo tra la sovrastruttura e le fondazioni secondo una, due o addirittura tre superfici sferiche:

Isolatore a singola superficie di scorrimento



Isolatore a doppia superficie di scorrimento



# CRITERI DI MODELLAZIONE DISPOSITIVI SISMICI

## ISOLATORI A PENDOLO SCORREVOLE (FPS)



– il **periodo proprio della sovrastruttura** risulta essere **dipendente**, principalmente, dal **raggio di curvatura** della **superficie concava di contatto**; variando questo si riescono ad ottenere diversi periodi di oscillazione;

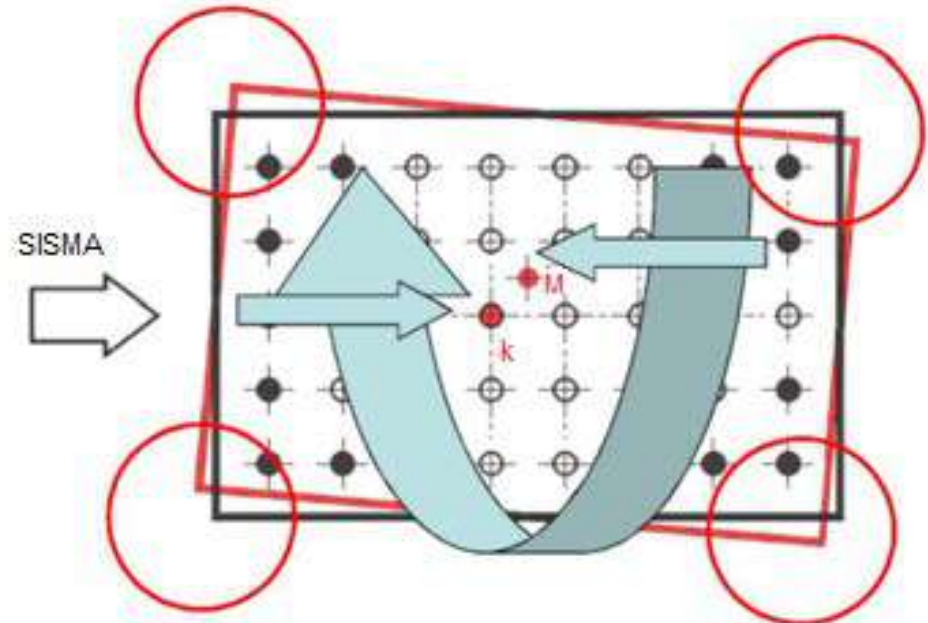
– sono **auto-ricentranti** dopo un evento sismico: la funzione ricentrante è data ovviamente dalla superficie curva, che consente di far tornare in posizione il dispositivo quando cessa l'azione esterna. Durante il sisma, la calotta articolata in acciaio e Teflon si muove lungo la superficie concava sferica, causando così l'innalzamento della massa supportata della sovrastruttura. L'innalzamento realizzato dal pendolo converte energia cinetica in energia potenziale e quest'ultima richiama la massa oscillante nella sua posizione iniziale di equilibrio stabile.

– **l'attrito della superficie di scorrimento** determina lo **smorzamento viscoso equivalente**. ←

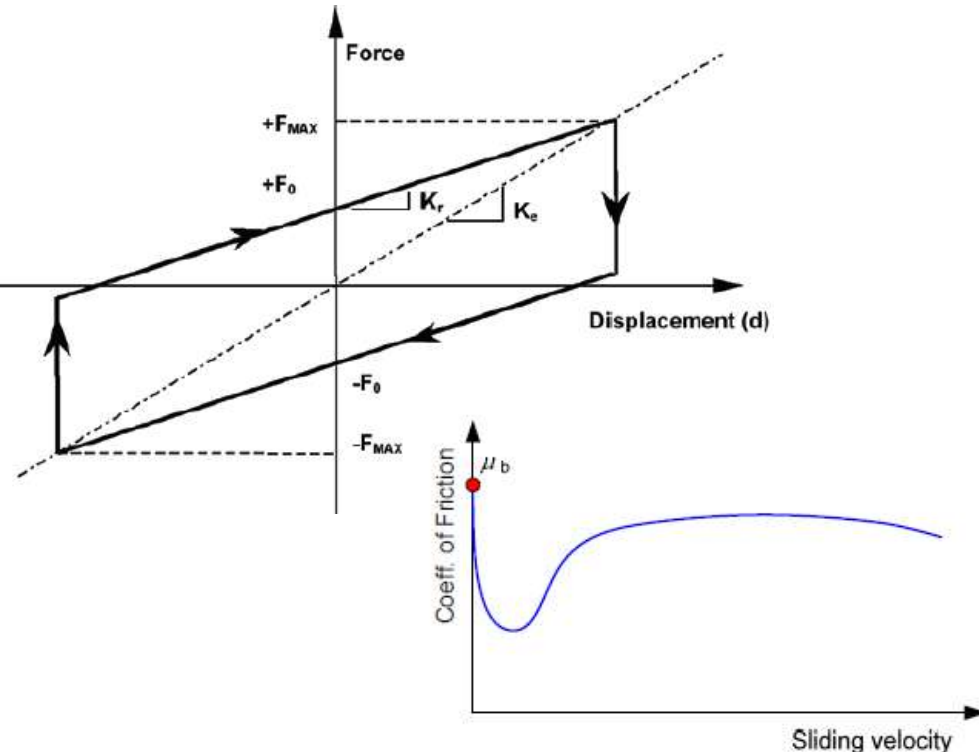
# CRITERI DI MODELLAZIONE DISPOSITIVI SISMICI

## ISOLATORI A PENDOLO SCORREVOLE (FPS)

- 1 Il periodo proprio è indipendente dalla massa della struttura;
  - 2 la rigidezza è proporzionale al peso e quindi alla massa;
- di conseguenza non si creano effetti torsionali attorno all'asse verticale durante il terremoto perché garantiscono la coincidenza fra il baricentro delle masse e quello delle rigidezze



L'attrito della superficie di scorrimento determina lo **smorzamento viscoso equivalente**: la scelta del materiale e delle proprietà della superficie di scorrimento definisce la quantità di energia sismica assorbita dal sistema (generalmente il **massimo smorzamento** che si può avere in questi dispositivi è **intorno al 20%**). Lo smorzamento dipende dal coefficiente di attrito che varia in funzione della velocità di slittamento.



# CRITERI DI MODELLAZIONE DISPOSITIVI SISMICI

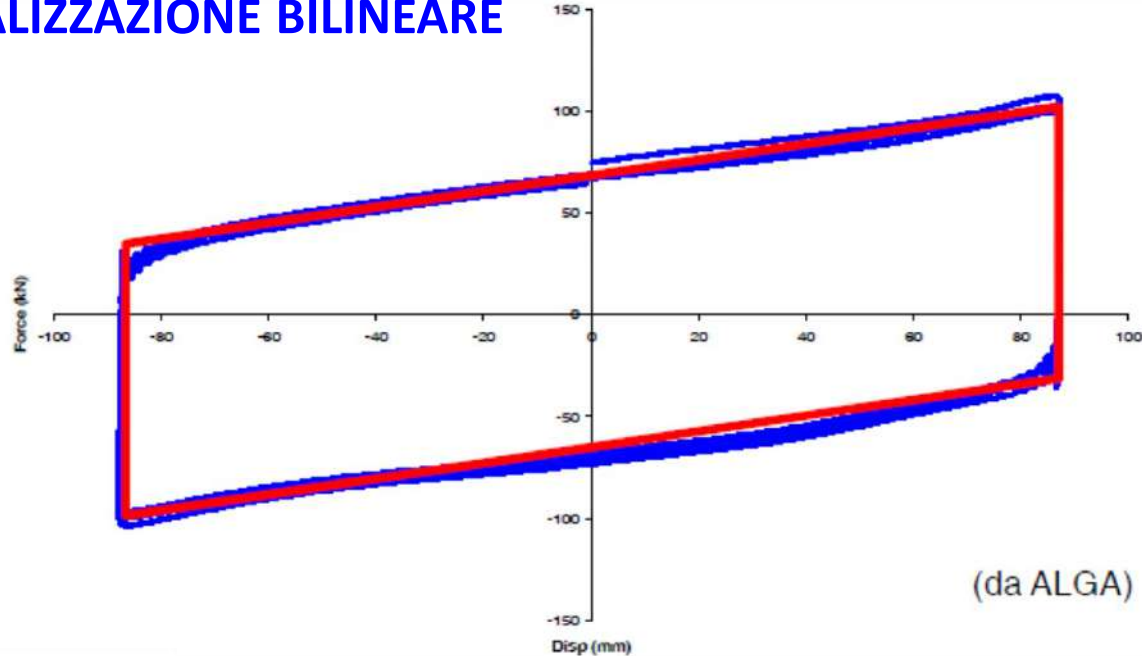
## ISOLATORI A PENDOLO SCORREVOLE (FPS)

### COMPORTAMENTO REALE – IDEALIZZAZIONE BILINEARE

$$F = \frac{W}{R} \Delta + W\mu \operatorname{sgn}(\dot{\Delta})$$

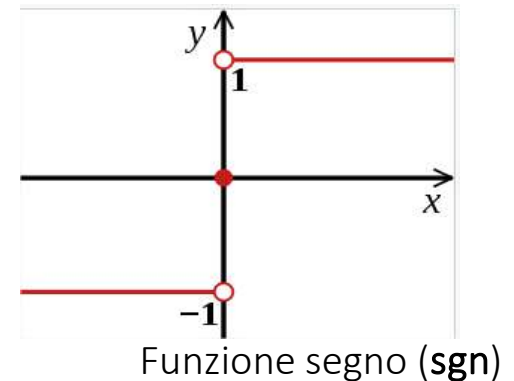
Forza di elastica di ricentraggio

Forza di attrito



Dove:

- $W$  è la forza verticale agente sull'isolatore;
- $R$  è il raggio di curvatura dell'isolatore;
- $\mu$  è il coefficiente di attrito ad alte velocità;
- $u$  è lo spostamento orizzontale





# CRITERI DI MODELLAZIONE DISPOSITIVI SISMICI

## ISOLATORI A PENDOLO SCORREVOLE (FPS) - CARATTERISTICHE

Periodo di vibrazione:

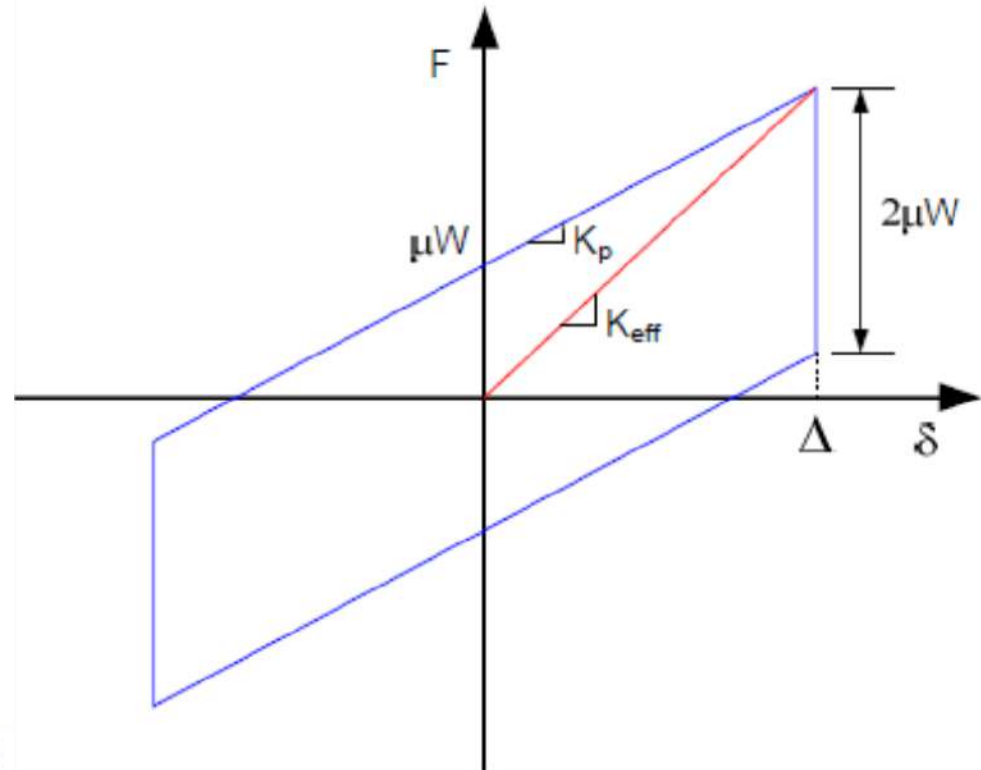
$$T_p = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}}$$

Rigidezza efficace:

$$K_{eff} = W \left( \frac{1}{R} + \frac{\mu}{\Delta} \right)$$

Rigidezza tangente:

$$K_p = \frac{W}{R}$$



Dove:

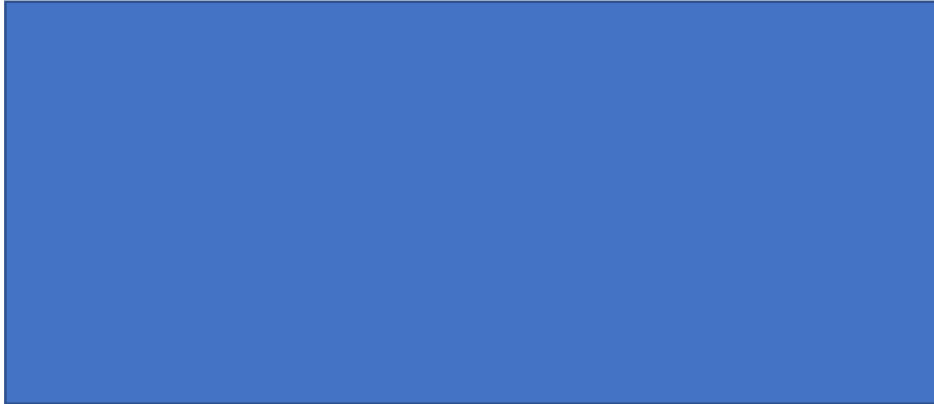
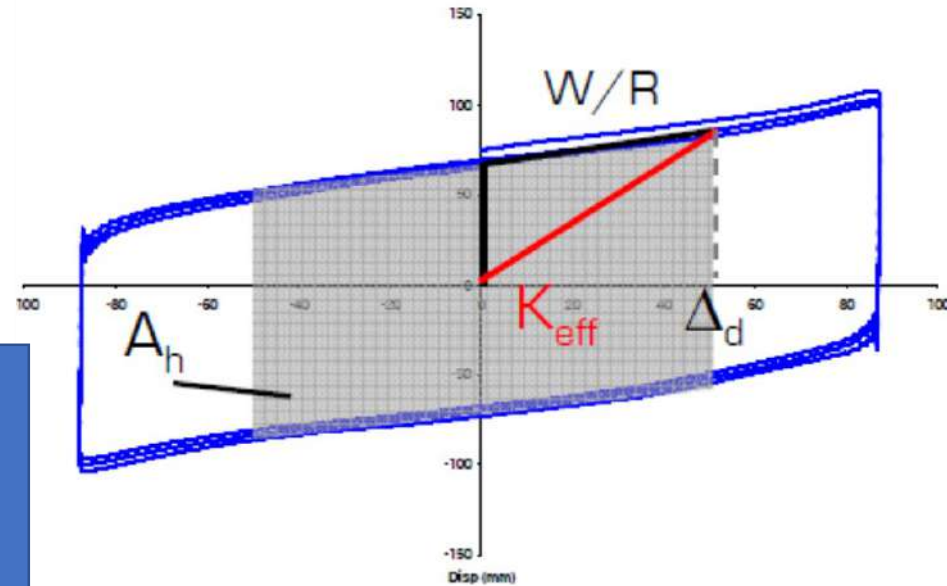
- $W$  è la forza verticale agente sull'isolatore;
- $R$  è il raggio di curvatura dell'isolatore;
- $\mu$  è il coefficiente di attrito ad alte velocità;
- $\Delta$  è lo spostamento orizzontale



# CRITERI DI MODELLAZIONE DISPOSITIVI SISMICI

## ISOLATORI A PENDOLO SCORREVOLE (FPS) – MODELLAZIONE ANALISI LINEARI

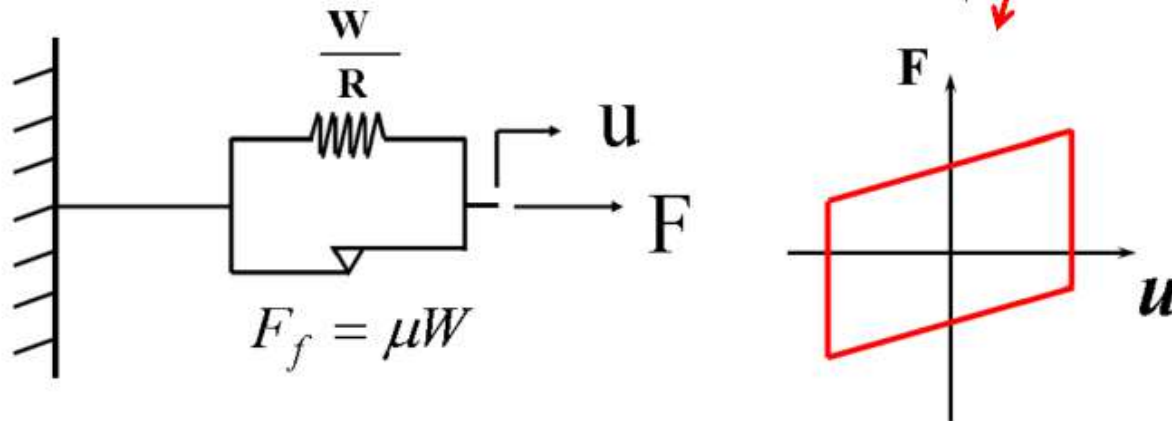
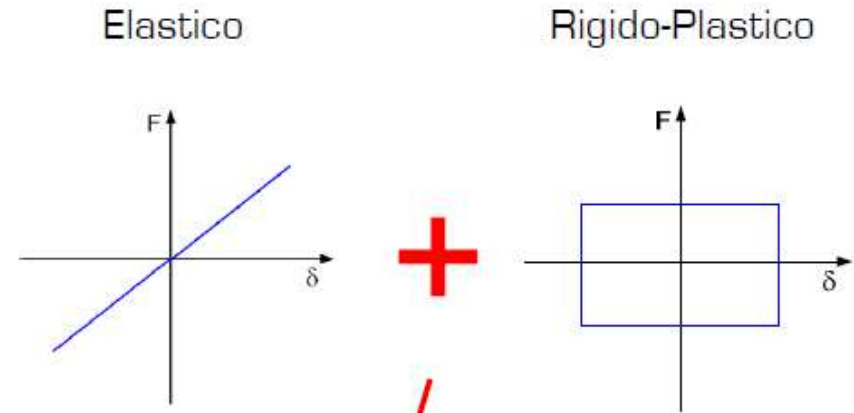
- Modellati con elementi *link* elastici
- Comportamento non-lineare, si stima una rigidezza equivalente  $K_{eq}$  corrispondente allo spostamento di progetto  $\Delta_d$  nel sistema di isolamento → Metodo Iterativo:



# CRITERI DI MODELLAZIONE DISPOSITIVI SISMICI

## ISOLATORI A PENDOLO SCORREVOLE (FPS) – MODELL. ANALISI NON LINEARI

- Comportamento rigido plastico con incrudimento
- Coefficiente di attrito ad alte velocità,  $\mu = \mu_{\max}$



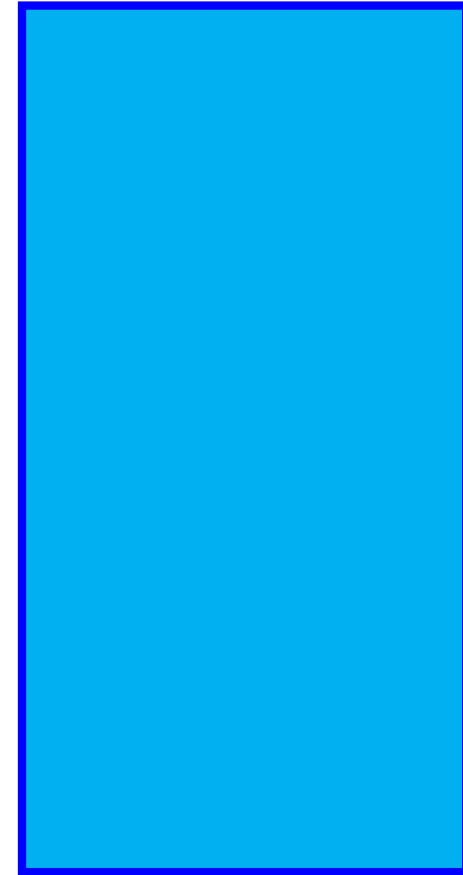
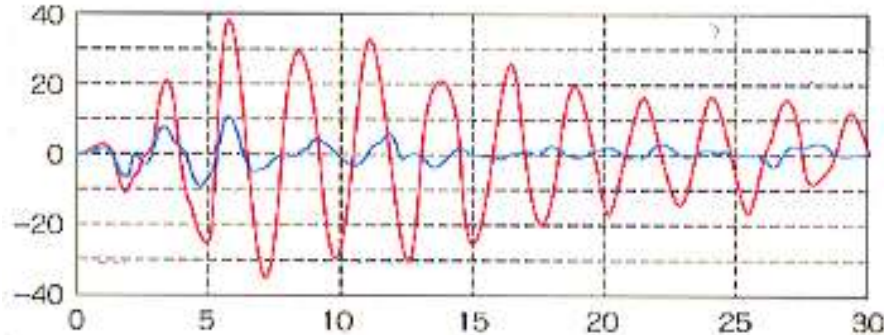
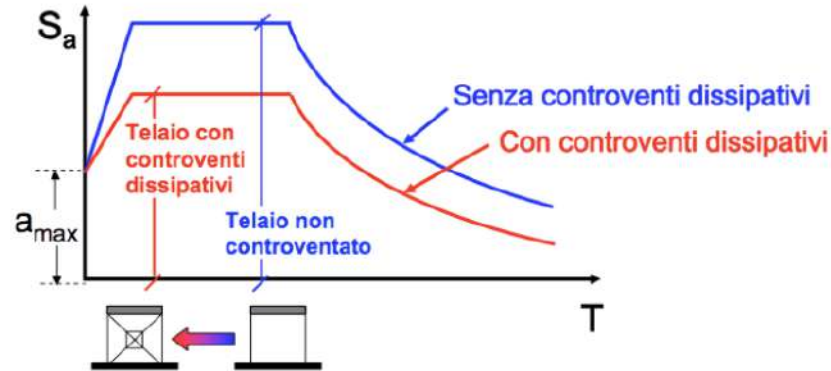
# CRITERI DI MODELLAZIONE DISPOSITIVI SISMICI



	Vantaggi	Svantaggi
LDRB	Basse accelerazioni nella sovrastruttura Basso costo	Grossi spostamenti Basso smorzamento Bassa resistenza ai carichi di servizio Effetti di instabilità
HDRB	Moderate accelerazioni nella sovrastruttura Resistenza ai carichi di servizio Moderato smorzamento	Rigidezza e smorzamento dipendenti dalle deformazioni di taglio Limitata scelta di rigidezza e smorzamento Effetti di instabilità
LRB	Moderate accelerazioni nella sovrastruttura Vasta scelta di rigidezze e smorzamenti	Variazione ciclica delle proprietà Effetti di instabilità
SD	Resistenza ai carichi di servizio Alto smorzamento Stabilità	Proprietà funzione di velocità e carico applicato No ricentraggio
FPS	Resistenza ai carichi di servizio Moderato smorzamento Stabilità Riduzione nella risposta torsionale	Proprietà funzione di velocità e carico applicato

# CRITERI DI MODELLAZIONE DISPOSITIVI SISMICI

## DISPOSITIVI DI CONTROLLO PASSIVO - DISSIPATORI



# CRITERI DI MODELLAZIONE DISPOSITIVI SISMICI

## DISPOSITIVI DI CONTROLLO PASSIVO – DISSIPATORI DIPENDENTI DALLA VELOCITA'

### Dispositivi a comportamento viscoso.

Caratterizzati dalla dipendenza della forza soltanto dalla velocità o da velocità e spostamento contemporaneamente.

Il loro funzionamento è basato sulle forze di reazione causate dal flusso di un fluido viscoso attraverso orifizi o sistemi di valvole.

dispositivi a dissipazione "dipendente dalla velocità"	Viscoso lineare (VL)	$c_d$ Coefficiente di viscosità		
	Elasto-viscoso lineare (VE)	$k_d$ Rigidezza elastica $\eta$ Fattore di perdita "loss factor"		

# CRITERI DI MODELLAZIONE DISPOSITIVI SISMICI

## SMORZATORE VISCOSO – LEGAME FORZA SPOSTAMENTO

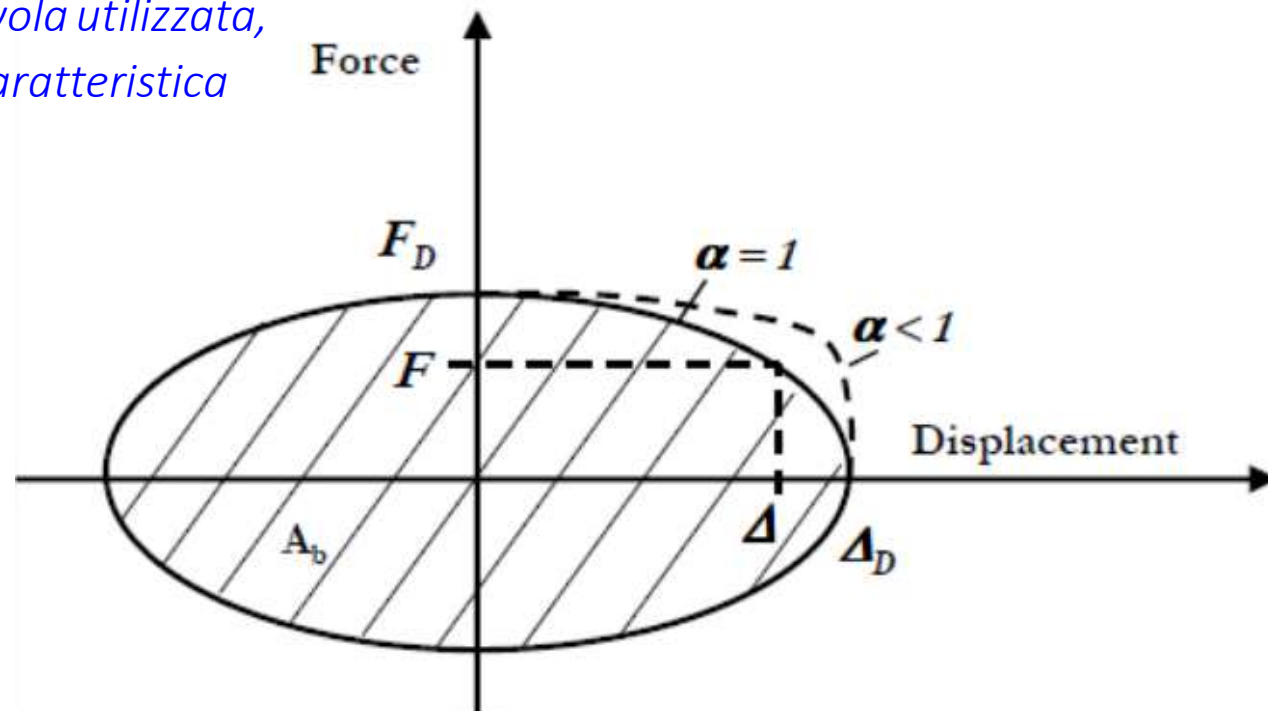
La **forza F** indotta in uno **smorzatore viscoso** è descritta dall'espressione:

$$F = C \times V^\alpha$$

in cui:

- $C$  – costante di smorzamento (caratteristica dello smorzatore)
- $V$  – velocità
- $\alpha$  dipende dal tipo di valvola utilizzata, variabile tra  $0,1$  e  $2,0$  (caratteristica dello smorzatore)

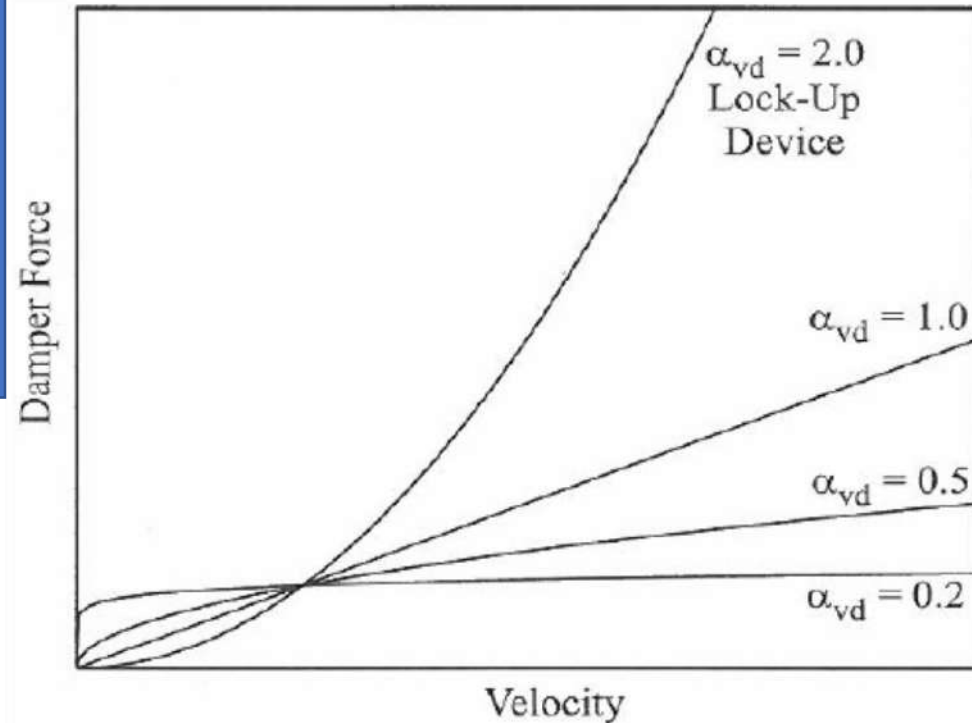
### Legame forza-spostamento





# CRITERI DI MODELLAZIONE DISPOSITIVI SISMICI

## SMORZATORI VISCOSI – TIPOLOGIE



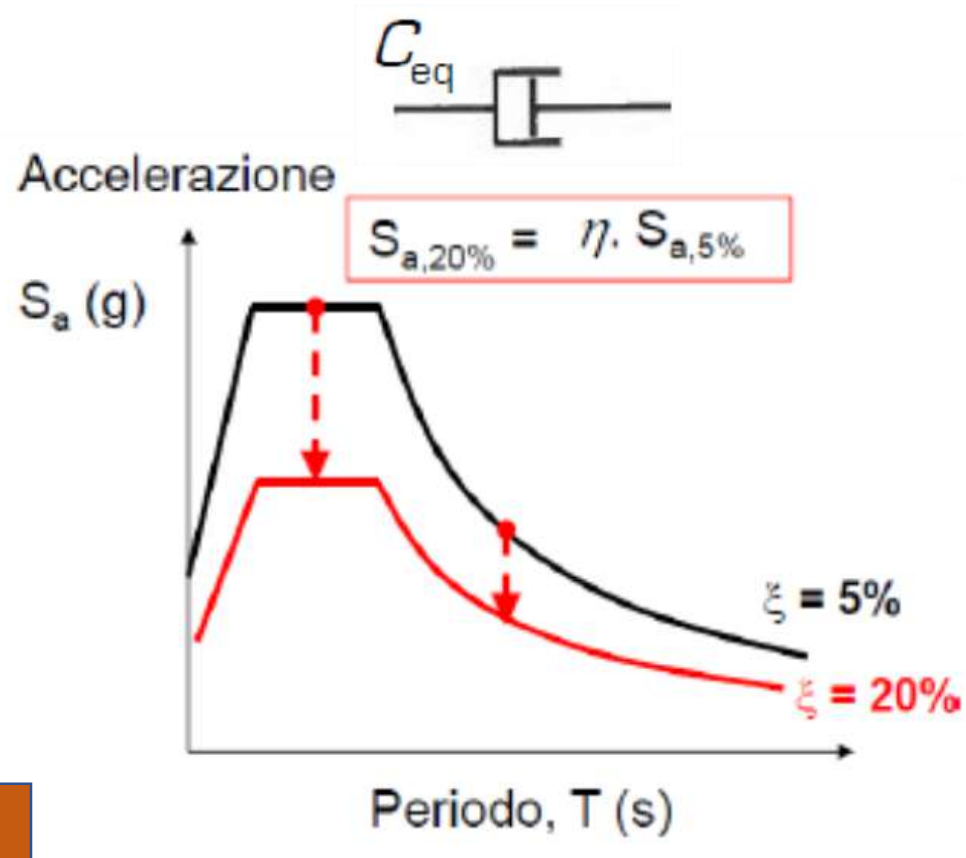
(Da Christopoulos and Filiatrault, 2006)

Spesso si usano smorzatori non-lineari per applicazioni sismiche, perché la massima forza indotta nello smorzatore è ben limitata in un ampio intervallo di velocità



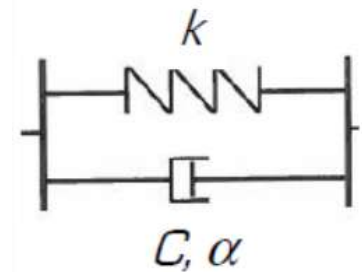
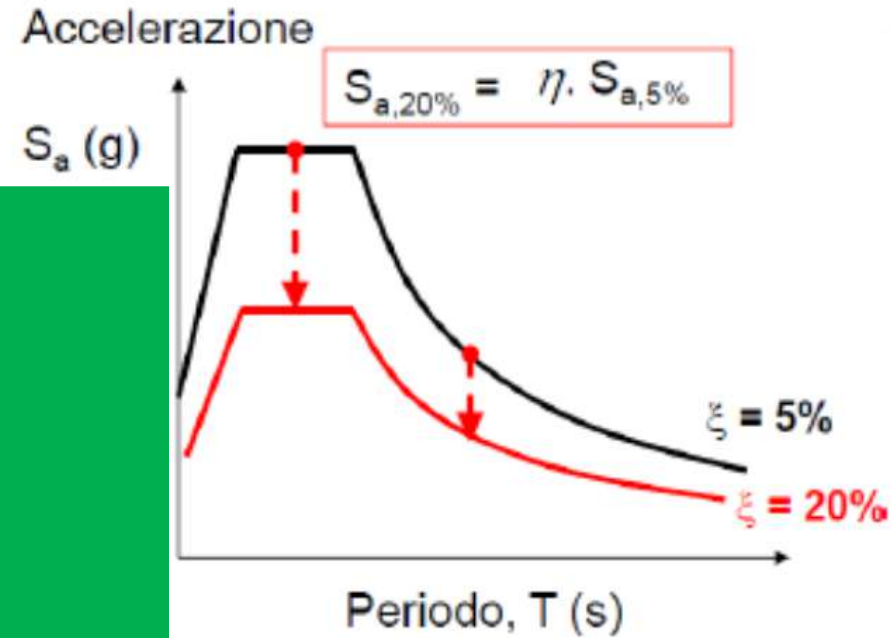
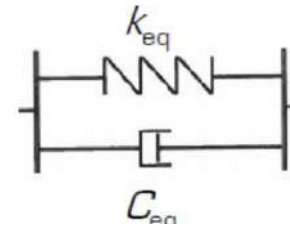
# CRITERI DI MODELLAZIONE DISPOSITIVI SISMICI

## SMORZATORI VISCOSI – MODELLAZIONE



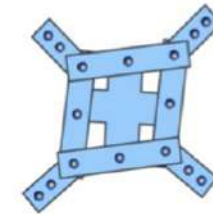
# CRITERI DI MODELLAZIONE DISPOSITIVI SISMICI

## SMORZATORI VISCO-ELASTICI – MODELLAZIONE



# CRITERI DI MODELLAZIONE DISPOSITIVI SISMICI

## DISPOSITIVI DIPENDENTI DALLO SPOSTAMENTO



• **Dispositivi a comportamento lineare:** caratterizzati da un legame forza-spostamento sostanzialmente lineare, fino ad un dato livello di spostamento, con comportamento stabile per il numero di cicli richiesti e sostanzialmente indipendente dalla velocità; nella fase di scarico non devono mostrare spostamenti residui significativi.

• **Dispositivi a comportamento non lineare:** caratterizzati da un legame forza-spostamento non lineare, con comportamento stabile per il numero di cicli richiesti e sostanzialmente indipendente dalla velocità.

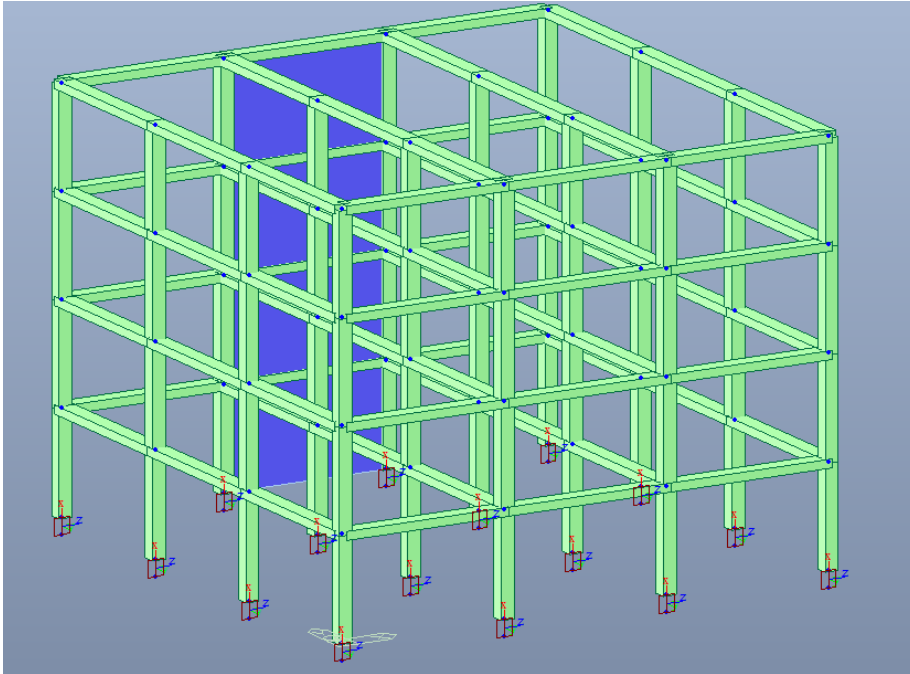
Tipo	Dissipatore	Parametri meccanici	Modello reologico
dispositivi a dissipazione "dipendente dallo spostamento"	Elasto-plastico (EP)	$k_1$ Rigidezza elastica $\alpha$ Fattore d'incrudimento $\mu$ duttilità	
	Attritivo (FR)	$F_s$ Forza di scorrimento	

# **CASO STUDIO**

## **Esempio di analisi dinamica lineare con isolatori elastomerici**

# ANALISI DINAMICA LINEARE CON ISOLATORI ELASTOMERICI

## HDRB RESPONSE SPECTRUM ANALYSIS



Generate Design Spectrum

Design Spectrum : Eurocode-8(2004)  
National Annex : Recommended

Spectrum Type : Horizontal Elastic Spectrum  
Ground Type : B

Spectrum Parameters  
 Type1  Type2  User Defined

Soil Factor (S)	Tb	Tc	Td
1.2	0.15	0.5	2

Ref. Peak Ground Acc. (AgR) : 0.08 g  
Importance Factor (I) : 1  
Viscous Damping Ratio ( $\alpha$ ) : 5 %

Max. Period : 6 (Sec)

OK Cancel

Add/Modify/Show Response Spectrum Functions

Function Name : EURO2004 H-ELASTIC

Spectral Data Type  
 Normalized Accel.  Acceleration

Scaling  
 Scale Factor : 1  
 Maximum Value : 0 g

Period (sec)	Spectral Data (g)
1	0.0960
2	0.1536
3	0.2112
4	0.2400
5	0.2400
6	0.2400
7	0.2400
8	0.2400
9	0.2400
10	0.2400
11	0.2400
12	0.2222
13	0.2000
14	0.1818

Spectral Data vs Period (sec) graph. The y-axis is Spectral Data (g) ranging from 0.00275 to 0.24275. The x-axis is Period (sec) on a logarithmic scale from 0.01 to 6.01. A red curve shows the spectral data, peaking at approximately 0.24 g at a period of 0.15 seconds.

Description : EURO2004 H-ELA: G=8,S=1.20,Tb=0.15,Tc=0.50,Td=2.00,AgR=0.08g,I=1.0,Damping=5.00

OK Cancel Apply

# ANALISI DINAMICA LINEARE CON ISOLATORI ELASTOMERICI

## Scelta dell'isolatore

$$T_{IS} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_{IS}}}$$

$T_{is} = 2.5 \text{ s}$

$M = 930 \text{ kN/g}$

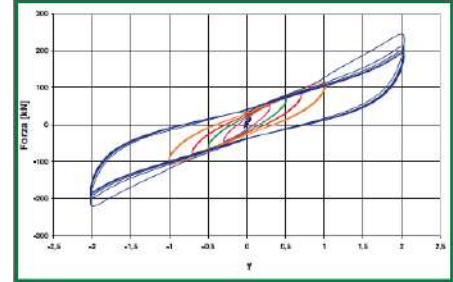
➔  $K_{IS} = 5868.4 \text{ kN/m} \rightarrow K_{ISOLATORE} = 5868.4/16 = 366 \text{ kN/m} = 0.366 \text{ kN/mm}$

### SPOSTAMENTO 150 mm



SI-S	V kN	F <sub>zd</sub> kN	K <sub>e</sub> kN/mm	K <sub>v</sub> kN/mm	D <sub>g</sub> mm	t <sub>e</sub> mm	h mm	H mm	Z mm	W kg
SI-S 300/76	270	1270	0.37	400	300	76	152	202	350	92
SI-S 350/75	490	2000	0.51	519	350	75	143	193	400	118
SI-S 400/75	880	3540	0.67	830	400	75	143	193	450	153
SI-S 450/78	1200	4660	0.82	948	450	78	154	204	500	202
SI-S 500/78	1800	7260	1.01	1358	500	78	154	204	550	247
SI-S 550/77	2190	9380	1.23	1566	550	77	147	197	600	287
SI-S 600/80	2690	10310	1.41	1707	600	80	147	197	650	335
SI-S 650/81	3200	10830	1.64	1898	650	81	145	195	700	384
SI-S 700/80	3710	11370	1.92	2153	700	80	151	211	750	508
SI-S 800/80	5870	14990	2.51	3389	800	80	151	211	850	659
SI-S 900/84	7490	21220	3.03	3798	900	84	158	218	950	848
SI-S 1000/84	9110	22590	3.74	4430	1000	84	164	244	1050	1252
SI-S 1100/84	12470	27480	4.53	6103	1100	84	164	244	1150	1509
SI-S 1200/96	15490	28700	4.71	6020	1200	96	176	256	1250	1807

PROPRIETÀ	MESCOLA		
	MORBIDA (SOFT - S)	NORMALE (NORMAL - N)	DURA (HARD - H)
Durezza (Shore A)	40	60	75
Modulo di elasticità tangenziale G <sub>din</sub> a γ = 1 (MPa)	0.4	0.8	1.4
Coefficiente di smorzamento viscoso equivalente ξ a γ = 1 (%)	10 / 15	10 / 15	10 / 15



Tipico diagramma isterico di un isolatore elastomerico ottenuto in prove dinamiche ad ampiezza crescente.

#### Legenda

V	Carico verticale massimo agente sull'isolatore in presenza di sisma corrispondente allo SLC
F <sub>zd</sub>	Carico verticale massimo agente sull'isolatore in assenza di sisma (SLU), concomitante con rotazione 0 e spostamento orizzontale 10 mm
K <sub>e</sub>	Rigidezza orizzontale equivalente
K <sub>v</sub>	Rigidezza verticale
D <sub>g</sub>	Diametro elastomero
t <sub>e</sub>	Spessore totale gomma
h	Altezza escluse piastre di ancoraggio
H	Altezza totale incluse piastre di ancoraggio
Z	Lato piastre di ancoraggio
W	Peso isolatore escluse zanche

### ELASTOMERI

Le mescole elastomeriche utilizzate per la produzione degli isolatori elastomerici della serie SI sono caratterizzate da un modulo dinamico equivalente a taglio G<sub>din</sub> compreso tra 0.4 MPa e 1.4 MPa e da un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente pari al 10% o al 15%, a scelta del progettista.

In tabella vengono riportate alcune proprietà fisico-meccaniche relative alle tre mescole standard.



# ANALISI DINAMICA LINEARE CON ISOLATORI ELASTOMERICI

Possibilità di modellazione lato **rigidezza**:

1. Point Spring
2. General Link
3. Elastic Link
4. Beam elastici

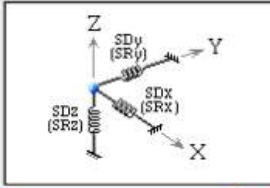
**Point Spring Supports**

Boundary Group Name: Default

Options:  Add  Replace  Delete

Point Spring (Local Direction)

Type: Linear



SDx	0	kN/m
SDy	0	kN/m
SDz	0	kN/m
SRx	0	kN*m/[rad]
SRy	0	kN*m/[rad]
SRz	0	kN*m/[rad]

Fixed:  SDx  SDy  SDz  SRx  SRy  SRz

Damping Constant

Cx	0	kN*sec/m
Cy	0	kN*sec/m
Cz	0	kN*sec/m
CRx	0	kN*m*sec/[rad]
CRy	0	kN*m*sec/[rad]
CRz	0	kN*m*sec/[rad]

Apply Close

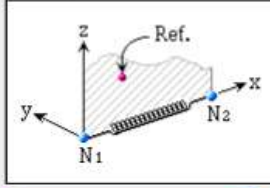
**Elastic Link**

Boundary Group Name: Default

Options:  Add  Delete

Elastic Link Data

Type: General



SDx	0	kN/m
SDy	0	kN/m
SDz	0	kN/m
SRx	0	kN*m/[rad]
SRy	0	kN*m/[rad]
SRz	0	kN*m/[rad]

Shear Spring Location  
Distance Ratio From End I: SDy: 0.5 SDz: 0.5

Beta Angle: 0 [deg]

2 Nodes:

Copy Elastic Link

Node Inc.  Distance

Axis:  x  y  z

Distances:  m  
(Example: 5, 3, 4.5, 3@5.0)

Apply Close

**General Link Properties**

Name:

Description:

Application Type

Element Type 1  Force Type: Boundary Nonlinear Analysis

Property Type:

Element Type 2: Seismic Control Devices

Seismic Control Devices Type:

Seismic Control Devices Properties:

Self Weight

Total Weight: 0 kN  Use Mass

Total Mass: 0 kN/g

Lumped Weight Ratio: I-end : J-end = 0.5 : 0.5

Lumped Mass Ratio: I-end : J-end = 0.5 : 0.5

Linear Properties		Effective Damping		Nonlinear Properties	
DOF	Effective Stiffness	DOF	Effective Damping	DOF	
<input type="checkbox"/> Dx	0 kN/m	<input type="checkbox"/> Dx	0 kN*sec/m	<input type="checkbox"/> Dx	Properties...
<input checked="" type="checkbox"/> Dy	0 kN/m	<input type="checkbox"/> Dy	0 kN*sec/m	<input type="checkbox"/> Dy	Properties...
<input checked="" type="checkbox"/> Dz	0 kN/m	<input type="checkbox"/> Dz	0 kN*sec/m	<input type="checkbox"/> Dz	Properties...
<input type="checkbox"/> Rx	0 kN*m/[rad]	<input type="checkbox"/> Rx	0 kN*m*sec/[rad]	<input type="checkbox"/> Rx	Properties...
<input type="checkbox"/> Ry	0 kN*m/[rad]	<input type="checkbox"/> Ry	0 kN*m*sec/[rad]	<input type="checkbox"/> Ry	Properties...
<input type="checkbox"/> Rz	0 kN*m/[rad]	<input type="checkbox"/> Rz	0 kN*m*sec/[rad]	<input type="checkbox"/> Rz	Properties...

Shear Spring Location:

Distance Ratio From End I: Dy: 0.5 Dz: 0.5

OK Cancel Apply



# ANALISI DINAMICA LINEARE CON ISOLATORI ELASTOMERICI

Possibilità di **modellazione** lato **smorzamento**

1. Riduzione spettro di risposta
2. Damping method nella response spectrum analysis
3. Coefficienti di smorzamento per Point Spring e General Link

Add/Modify/Show Response Spectrum Functions

Function Name:

Spectral Data Type:  Normalized Accel.  Acceleration  Velocity  Displacement

Scaling:  Scale Factor:   Maximum Value:  g

Gravity:  m/sec<sup>2</sup> Damping Ratio:

Graph Options:  X-axis log scale  Y-axis log scale

Period (sec)	Spectral Data (g)
1	0.0000
2	0.0600
3	0.1200
4	0.1500
5	0.1800
6	0.2400
7	0.3000
8	0.3600
9	0.4200
10	0.4800
11	0.5000
12	0.5400
13	0.6000
14	0.6600

Description:

OK Cancel Apply

Point Spring Supports

Boundary Group Name: Default

Options:  Add  Replace  Delete

Point Spring (Local Direction) Type: Linear

SDx:  kN/m  
SDy:  kN/m  
SDz:  kN/m  
SRx:  kN\*m/[rad]  
SRy:  kN\*m/[rad]  
SRz:  kN\*m/[rad]

Fixed:  SDx  SDy  SDz  SRx  SRy  SRz

Damping Constant

Cx:  kN\*sec/m  
Cy:  kN\*sec/m  
Cz:  kN\*sec/m  
CRx:  kN\*m\*sec/[rad]  
CRy:  kN\*m\*sec/[rad]  
CRz:  kN\*m\*sec/[rad]

Apply Close

General Link Properties

Force Type: Boundary Nonlinear Analysis

Property Type: Viscoelastic Damper

Element Type 1:  Force Type: Boundary Nonlinear Analysis

Element Type 2: Seismic Control Devices

Seismic Control Devices Type: Viscous Damper / Oil Damper

Effective Weight: Total Weight:  kN Lumped Weight Ratio: I-end: J-end =  :

Use Mass: Total Mass:  kN/g Lumped Mass Ratio: I-end: J-end =  :

Linear Properties: Effective Stiffness:  Dx  Dy  Dz  Rx  Ry  Rz

Effective Damping:  Dx  Dy  Dz  Rx  Ry  Rz

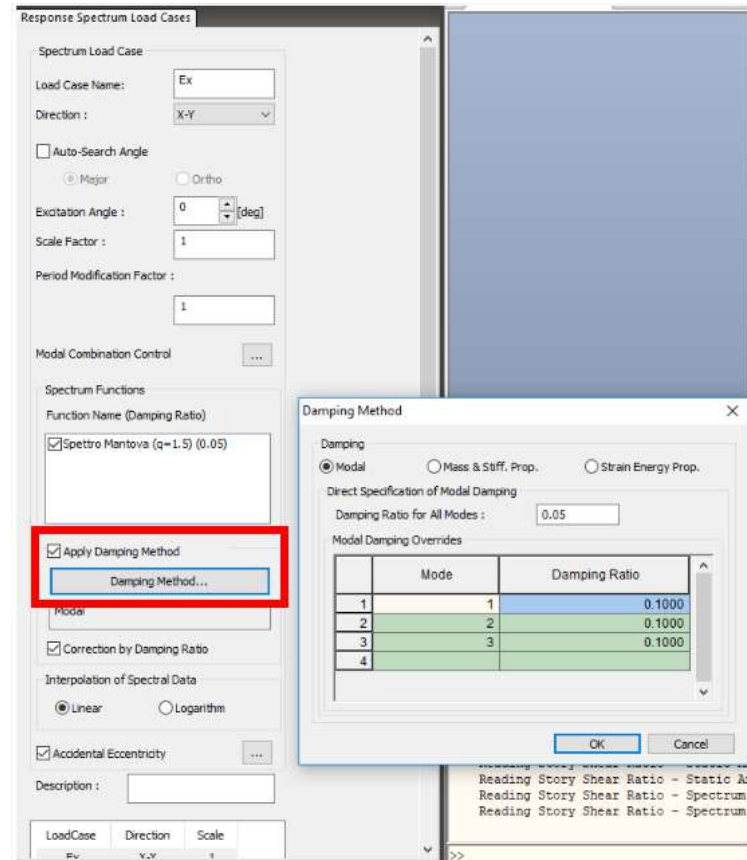
Nonlinear Properties:  Dx  Dy  Dz  Rx  Ry  Rz

Shear Spring Location: Distance Ratio From End I: Dy:  Dz:

OK Cancel Apply

# ANALISI DINAMICA LINEARE CON ISOLATORI ELASTOMERICI

## Damping Method nella Response Spectrum Analysis



### Direct Modal

User defines the damping ratio for each mode, and the modal response will be calculated based on the spectrum function, which is modified by the user defined damping ratio.

### Mass and Stiffness Proportional

Using the dynamic property and the modal damping ratios of two modes, the damping matrix which is proportional to Mass and Stiffness is generated. This damping matrix evaluates the damping ratio for each mode, and the response spectrum analysis is carried out while reflecting the modal damping ratio.

### Strain Energy Prop

User evaluates the modal damping ratio according to the damping ratio user-defined in Group Damping. The result modifies the spectrum function and calculates the response.

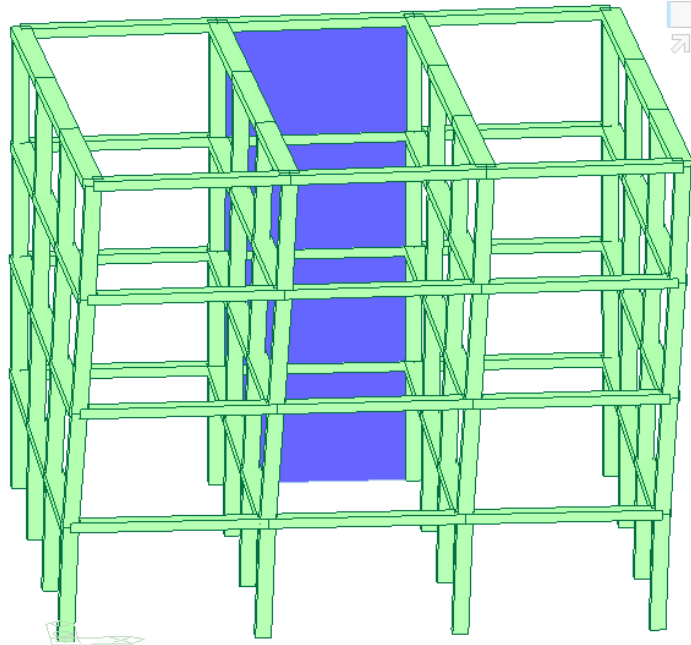
When element damping by members and boundaries defined in Group Damping is used, the damping matrices of most structures become a non-classical damping type, which can not be separated by modes. Therefore, in order to reflect the damping property of each element in dynamic analysis, modal damping ratio is calculated on the basis of the strain energy concept.

**Correction by Damping Ratio** : When a single spectrum is selected, a modifying equation is used to adjust the spectrum to apply to each mode having

$$C_D = \frac{1.5}{40h+1} + 0.5 \quad (h = \text{damping ratio})$$

# ANALISI DINAMICA LINEARE CON ISOLATORI ELASTOMERICI

## Risultati modello a base fissa



midas Gen  
POST-PROCESSOR  
VIBRATION MODE

FREQUENCY  
(CYCLE/SEC)  
1.049527

NATURAL PERIOD  
(SEC)  
0.952811

MPM(%)  
DX= 42.389504  
DY= 0.000000  
DZ= 0.000000  
RX= 0.000000  
RY= 0.000000  
RZ= 36.965476

MODE 1  
MAX : 65  
MIN : 1  
FILE: INCASTRI  
UNIT: kN,m  
DATE: 10/02/2019  
VIEW-DIRECTION  
X: -0.076  
Y: -0.963  
Z: 0.259

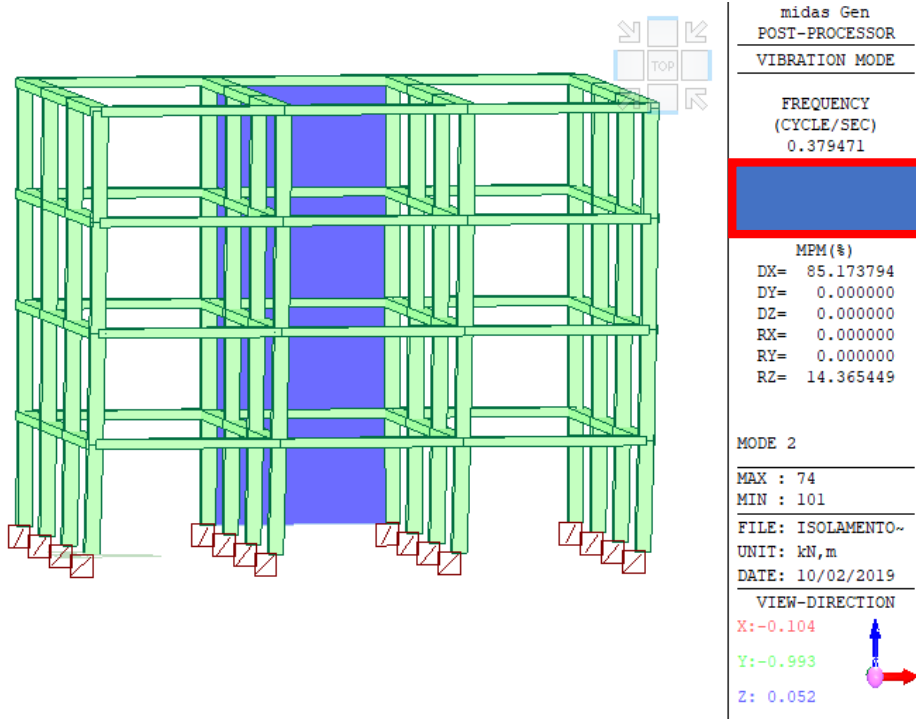
Node	Mode	UX	UY	UZ	RX				
<b>EIGENVALUE ANALYSIS</b>									
	Mode No	Frequency (rad/sec)	Frequency (cycle/sec)	Period (sec)	Tolerance				
	1	6.5944	1.0495	0.9528	9.3234e-029				
	2	6.7572	1.0754	0.9299	9.3234e-029				
	3	23.4913	3.7388	0.2675	9.3234e-029				
	4	23.8061	3.7889	0.2639	9.3234e-029				
	5	33.3819	5.3129	0.1882	9.3234e-029				
	6	49.5297	7.8829	0.1269	9.3234e-029				
	7	49.9491	7.9497	0.1258	9.3234e-029				
	8	77.9802	12.4109	0.0806	9.3234e-029				
	9	79.8093	12.7020	0.0787	9.3234e-029				
	10	139.2008	22.1545	0.0451	9.3234e-029				
	11	272.1105	43.3077	0.0231	9.3234e-029				
	12	361.8946	57.5973	0.0174	9.3234e-029				
<b>MODAL PARTICIPATION MASSES PRINTOUT</b>									
	Mode No	TRAN-X		TRAN-Y		TRAN-Z		ROTN-X	
		MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)
	1	42.3895	42.3895	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	2	0.0000	42.3895	79.9645	79.9645	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	3	5.2914	47.6809	0.0000	79.9645	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	4	0.0000	47.6809	12.8802	92.8447	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	5	36.3083	83.9892	0.0000	92.8447	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	6	0.0000	83.9892	5.3507	98.1954	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

### SUMMATION OF REACTION FORCES PRINTOUT

Load	FY (kN)	FZ (kN)
Ex(RS)	0.000000	0.000000

# ANALISI DINAMICA LINEARE CON ISOLATORI ELASTOMERICI

## Risultati modello ISOLATO VS base fissa



Node	Mode	UX	UY	UZ	RX				
<b>EIGENVALUE ANALYSIS</b>									
	Mode No	Frequency (rad/sec)	Frequency (cycle/sec)	Period (sec)	Tolerance				
	1	2.3117	0.3679	2.7180	7.7140e-083				
	2	2.3843	0.3795	2.6352	1.2326e-082				
	3	2.7558	0.4386	2.2800	6.0090e-082				
	4	13.6903	2.1789	0.4590	6.8424e-062				
	5	13.9645	2.2225	0.4499	4.9940e-061				
	6	33.7510	5.3716	0.1862	4.2301e-050				
	7	33.7966	5.3789	0.1859	1.0591e-050				
	8	61.8298	9.8405	0.1016	6.3130e-046				
	9	63.9678	10.1808	0.0982	3.5325e-044				
	10	66.0378	10.5102	0.0951	4.1490e-045				
	11	93.0760	14.8135	0.0675	2.4847e-043				
	12	101.1747	16.1025	0.0621	7.7180e-044				
<b>MODAL PARTICIPATION MASSES PRINTOUT</b>									
	Mode No	TRAN-X		TRAN-Y		TRAN-Z		ROTN-X	
		MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)
	1	0.0000	0.0000	99.5820	99.5820	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	2	85.1738	85.1738	0.0000	99.5820	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	3	14.5823	99.7561	0.0000	99.5820	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	4	0.2256	99.9817	0.0000	99.5820	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	5	0.0000	99.9817	0.3830	99.9649	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	6	0.0000	99.9817	0.0285	99.9934	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	7	0.0140	99.9957	0.0000	99.9934	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

SUMMATION OF REACTION FORCES PRINTOUT			
Load		FY (kN)	FZ (kN)
Smorzat		-3.432675	0.000000

SUMMATION OF REACTION FORCES PRINTOUT			
Load		FY (kN)	FZ (kN)
Ex(RS)		0.000000	0.000000

Risultati modello ISOLATO

*Riduzione taglio alla base del 78%*

Risultati modello BASE FISSA

# ANALISI DINAMICA LINEARE CON ISOLATORI ELASTOMERICI

## Utilizzo dei coefficienti di smorzamento → TIME HISTORY

Link	Load	Node	Axial (kN)	Shear-y (k)	Shear-z (k)	Torsion (k)	Moment-y	Moment-z (kN*m)	Massa t	c
50	NVerticali	109	-282.77	0	0	0	0	0	28.82467	30.56
		13	-282.77	0	0	0	0	0	28.82467	30.56
51	NVerticali	105	-468.18	0	0	0	0	0	47.72477	39.32
		7	-468.18	0	0	0	0	0	47.72477	39.32
52	NVerticali	104	-468.2	0	0	0	0	0	47.72681	39.32
		4	-468.2	0	0	0	0	0	47.72681	39.32
53	NVerticali	101	-287.2	0	0	0	0	0	29.27625	30.80
		1	-287.2	0	0	0	0	0	29.27625	30.80
54	NVerticali	102	-491.88	0	0	0	0	0	50.14067	40.31
		2	-491.88	0	0	0	0	0	50.14067	40.31
55	NVerticali	113	-825.52	0	0	0	0	0	84.15087	52.22
		81	-825.52	0	0	0	0	0	84.15087	52.22
56	NVerticali	114	-819.38	0	0	0	0	0	83.52497	52.02
		83	-819.38	0	0	0	0	0	83.52497	52.02
57	NVerticali	110	-648.36	0	0	0	0	0	66.09174	46.27
		14	-648.36	0	0	0	0	0	66.09174	46.27
58	NVerticali	111	-648.36	0	0	0	0	0	66.09174	46.27
		15	-648.36	0	0	0	0	0	66.09174	46.27
59	NVerticali	116	-819.38	0	0	0	0	0	83.52497	52.02
		93	-819.38	0	0	0	0	0	83.52497	52.02
60	NVerticali	115	-825.52	0	0	0	0	0	84.15087	52.22
		91	-825.52	0	0	0	0	0	84.15087	52.22
61	NVerticali	103	-491.88	0	0	0	0	0	50.14067	40.31
		3	-491.88	0	0	0	0	0	50.14067	40.31
62	NVerticali	106	-287.2	0	0	0	0	0	29.27625	30.80
		10	-287.2	0	0	0	0	0	29.27625	30.80
63	NVerticali	107	-468.2	0	0	0	0	0	47.72681	39.32
		11	-468.2	0	0	0	0	0	47.72681	39.32
64	NVerticali	108	-468.18	0	0	0	0	0	47.72477	39.32
		12	-468.18	0	0	0	0	0	47.72477	39.32
65	NVerticali	112	-282.77	0	0	0	0	0	28.82467	30.56
		16	-282.77	0	0	0	0	0	28.82467	30.56

$$c = 2\xi\sqrt{m k_{is}}$$

Linear Properties

DOF	Stiffness	Damping
<input checked="" type="checkbox"/> Dx	10000000 kN/m	10000000 kN*sec/m
<input checked="" type="checkbox"/> Dy	360 kN/m	31 kN*sec/m
<input checked="" type="checkbox"/> Dz	360 kN/m	31 kN*sec/m
<input type="checkbox"/> Rx	0 kN*m/[rad]	0 kN*m*sec/[rad]
<input type="checkbox"/> Ry	0 kN*m/[rad]	0 kN*m*sec/[rad]
<input type="checkbox"/> Rz	0 kN*m/[rad]	0 kN*m*sec/[rad]

Description Coupled

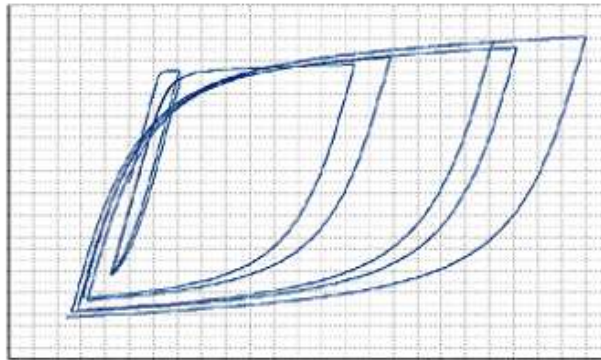
**ANALISI DINAMICA TIME HISTORY E  
GESTIONE DELLO SMORZAMENTO**



# ANALISI DINAMICA TIME HISTORY E GESTIONE DELLO SMORZAMENTO

## Applicazione dell'Analisi Time History (DNLA).

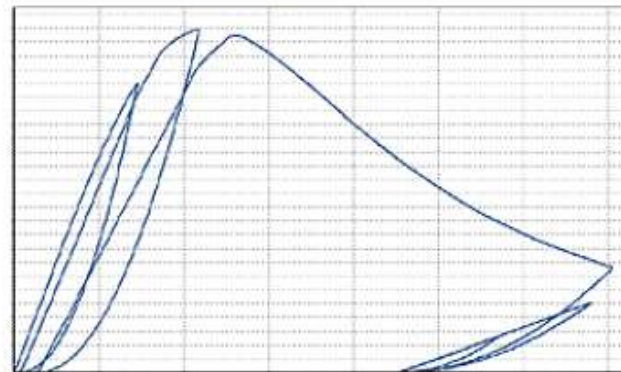
- Cogliere il degrado del materiale col progredire del danneggiamento.
- Cogliere il comportamento isteretico dei materiali.
- Simulare l'input sismico in modo realistico: utilizzo di accelerogrammi.
- Simulare l'effetto di sistemi di isolamento sismico.
- In generale simulare carichi dinamici: macchine vibranti, esplosioni, ecc...



- Comportamento ciclico con dissipazione

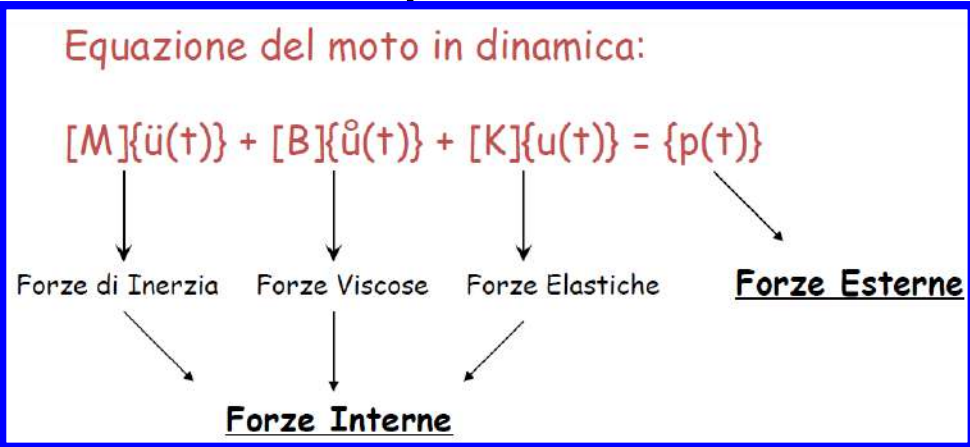
- Dipendenza da storia precedente

- Fessurazione con accumulo di danno



# ANALISI DINAMICA TIME HISTORY E GESTIONE DELLO SMORZAMENTO

## Risoluzione dell'equazione del moto



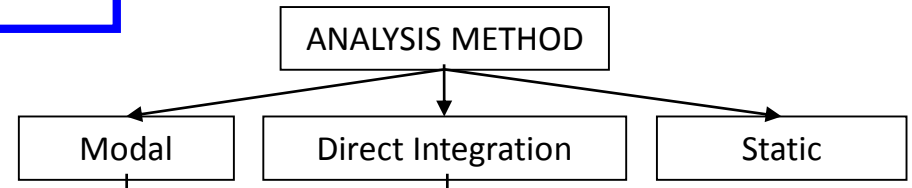
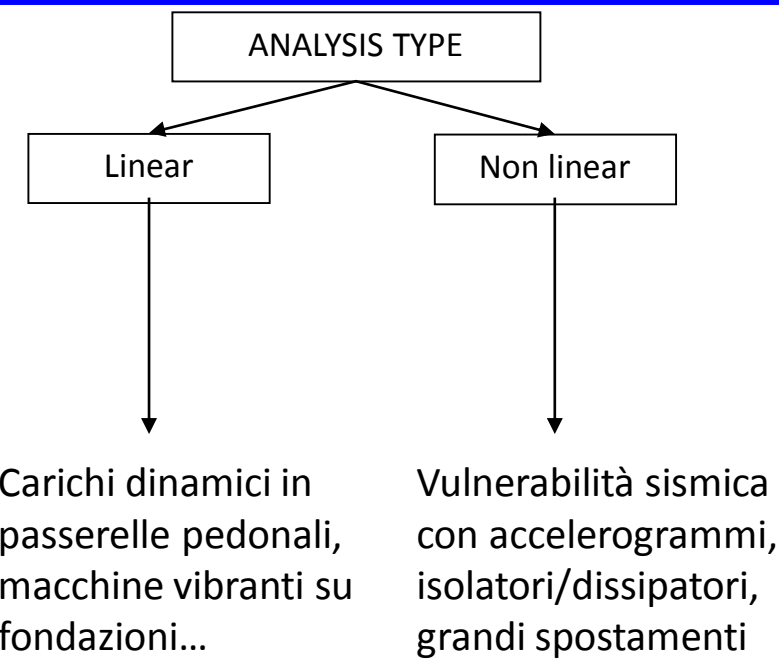
$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [B]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{0\} \quad \text{vibrazioni libere}$$

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{0\} \quad \text{vibrazioni libere non smorzate}$$

Soluzione dell'equazione: **funzione armonica**

$$\{u(t)\} = \{\Phi\} \text{sen} \omega t$$

Autovettore o Forma modale      Autovalore o Frequenza naturale



Per non linearità in forze (link) o materiali elastici.

$$u(t) = \sum_{i=1}^m \Phi_i q_i(t)$$

$$\Phi^T M \Phi \ddot{q}(t) + \Phi^T C \Phi \dot{q}(t) + \Phi^T K \Phi q(t) = \Phi^T F(t)$$

$$m_i \ddot{q}_i(t) + c_i \dot{q}_i(t) + k_i q_i(t) = P_i(t) \quad (i=1,2,3,\dots,m)$$

Per non linearità di materiale. Newmark.

$$u(t + \Delta t) = u(t + \Delta t) + \delta u$$

$$\dot{u}(t + \Delta t) = \dot{u}(t + \Delta t) + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \delta u$$

$$\ddot{u}(t + \Delta t) = \ddot{u}(t + \Delta t) + \frac{1}{\beta \Delta t^2} \delta u$$

Dynamic of structures, A.K. Chopra, § 5.4

## Modal Superposition

Gli spostamenti sono quindi determinati mediante somma dei prodotti dei modi di vibrare per le soluzioni delle equazioni modali.

$$u(t) = \sum_{i=1}^m \Phi_i q_i(t)$$

**La precisione del metodo dipende dal numero di modi utilizzati** ed è molto efficace e, di conseguenza, ampiamente utilizzato in analisi dinamiche lineari per grandi strutture.

Tuttavia, questo metodo è **sconsigliato per analisi dinamiche non lineari** o nei casi in cui vengono utilizzati **dispositivi di smorzamento in rigidità** per i quali si avrebbe una **matrice di smorzamento** non ortogonale agli **autovettori modali**.

## DIRECT INTEGRATION

Add/Modify Time History Load Cases

×

Il **metodo di Newmark** appartiene alla famiglia dei metodi alle differenze finite.

Tale metodo prevede la discretizzazione dell'intervallo temporale di analisi in passi temporali  $\Delta t$  uguali fra loro.

Conoscendo la configurazione del sistema all'istante iniziale, questo metodo permette di ricavare la soluzione all'istante temporale successivo.

Tale soluzione diviene la condizione iniziale per il successivo step di calcolo.

Metodo	Tipo	$\beta$	$\gamma$	Stabilità	Ordine di accuratezza
Newmark (differenze centrali)	esplicito	0	1/2	$\Delta t \leq \frac{T_{min}}{\pi}$	2°
Newmark (accelerazione lineare)	implicito	1/6	1/2	$\Delta t \leq \frac{1.7 \cdot T_{min}}{\pi}$	2°
Newmark (accelerazione costante)	implicito	1/4	1/2	Incond.	2°
Hilber - Hughes - Taylor*	implicito	$1/4(1-\alpha)^2$	$1/2-\alpha$	Incond.	2°

\*essendo  $-1/3 \leq \alpha \leq 0$

algoritmo di Newmark

## GESTIONE DELLO SMORZAMENTO

La funzione dello smorzamento è quella di dissipare energia, limitando l'ampiezza delle vibrazioni forzate in una struttura.

La capacità di smorzamento può essere definita come la percentuale dell'energia totale di vibrazione persa in un ciclo.

In una struttura possono coesistere diverse **fonti di smorzamento**, classificate come:

1. **Smorzamento intrinseco** al materiale strutturale (si assume proporzionale alla rigidità)
2. **Smorzamento viscoso**, proporzionale alla velocità del moto oscillatorio
3. **Smorzamento attritivo**, dovuto all'attrito nei nodi strutturali e tra elementi strutturali e non
4. Energia dissipata nel **terreno di fondazione** (si assume proporzionale alla rigidità)
5. **Smorzamento aerodinamico**, energia dissipata a causa della presenza di un fluido (proporzionale alla massa)
6. Smorzamento dovuto ai **dispositivi di dissipazione attivi e passivi** (dissipatori, isolatori)

Possiamo anche aggiungere lo **smorzamento isteretico**, legato al comportamento anelastico del sistema.

Un rapporto di smorzamento equivalente può essere ottenuto a partire dall'area all'interno di un ciclo di isteresi.

# ANALISI DINAMICA TIME HISTORY E GESTIONE DELLO SMORZAMENTO

## GESTIONE DELLO SMORZAMENTO

I sistemi dinamici reali mostrano, in generale, una **combinazione di meccanismi di smorzamento lineari** (per i quali, cioè, lo **smorzamento è indipendente dall'ampiezza del moto**) e **non lineari** (per i quali, invece, lo **smorzamento dipende dall'ampiezza del moto**).

Di conseguenza, non esiste un unico modo per descrivere matematicamente tutte le strutture vibranti.

Nella pratica ingegneristica, a causa della difficoltà di definire le reali caratteristiche dello smorzamento di sistemi strutturali tipici, lo **smorzamento** è solitamente **modellato** come **viscoso**, anche perché tale modello conduce a equazioni del moto lineari. Anche se in realtà una data struttura non è soggetta a smorzamento viscoso, **solitamente si assume un modello di smorzamento viscoso equivalente**.

$$M\ddot{U} + \underbrace{C\dot{U}} + F(U) = -MR\ddot{x}_g$$

**SMORZAMENTO VISCOSO** → costante durante tutta l'analisi



## GESTIONE DELLO SMORZAMENTO TIPOLOGIE DI RAPPRESENTAZIONE

Tra tutti i modi di descrivere il fenomeno dello smorzamento, il *modal damping* è quello usato più di frequente nelle analisi strutturali e consiste nel **calcolare lo smorzamento associato a ciascun modo proprio di vibrare**.

Il **modal damping** può essere classificato in proporzionale (classico) e non-proporzionale, a seconda che la **matrice di smorzamento** sia **ortogonale** o meno agli **autovettori modali**.

Alcuni software sono in grado di gestire lo **smorzamento classico** implementando il *modello di Rayleigh*, mentre per quanto riguarda quello **non classico**, che si riscontra quando la struttura include materiali ed elementi con differenti proprietà di smorzamento, la matrice di smorzamento dovrebbe essere valutata separatamente.

Tuttavia, nelle strutture reali i meccanismi di smorzamento sono complessi e diventa problematica la sua determinazione.

Viene applicato pertanto un approccio che si basa su i *Gruppi di Damping* sull'energia di deformazione (*Strain Energy*) per ottenere i **modal damping ratio**.

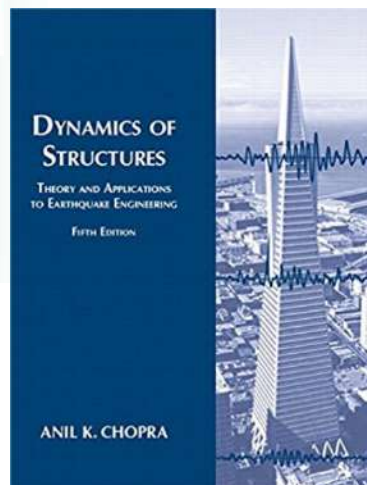
# ANALISI DINAMICA TIME HISTORY E GESTIONE DELLO SMORZAMENTO

Le normative per la progettazione strutturale spesso assegnano il valore dello smorzamento da adottare sulla base del materiale da costruzione. Ad esempio, le nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici 2008) forniscono uno spettro calcolato sulla base di un valore dello smorzamento del 5% e suggeriscono poi una formulazione per modificare lo spettro quando lo smorzamento effettivo assume valori differenti. Tuttavia, la norma non riporta alcun metodo per definire l'effettivo valore dello smorzamento, ma si limita ad affermare che la sua valutazione deve essere basata sui materiali da costruzione, sulla tipologia strutturale e sul tipo di suolo di fondazione. Per la progettazione delle strutture rispetto alle azioni da vento, la relativa norma ISO (ISO 4354:1997) suggerisce l'adozione di rapporti di smorzamento pari all'1% e all'1.5% per strutture in acciaio e in cemento armato, rispettivamente.

Veniamo adesso alcuni valori dello smorzamento per tipologie strutturali e livello di sforzo. L'immagine che segue è tratta dal testo "*Dynamics Of Structures*" di Anil K. Chopra, di cui consiglio caldamente l'acquisto:

**TABLE 11.2.1 RECOMMENDED DAMPING VALUES**

	Type and Condition of Structure	Damping Ratio (%)
Working stress, no more than about $\frac{1}{2}$ yield point	Welded steel, prestressed concrete, well-reinforced concrete (only slight cracking)	2-3
	Reinforced concrete with considerable cracking	3-5
At or just below yield point	Bolted and/or riveted steel, wood structures with nailed or bolted joints	5-7
	Welded steel, prestressed concrete (without complete loss in prestress)	5-7
	Prestressed concrete with no prestress left	7-10
	Reinforced concrete	7-10
	Bolted and/or riveted steel, wood structures with bolted joints	10-15
	Wood structures with nailed joints	15-20



# ANALISI DINAMICA TIME HISTORY E GESTIONE DELLO SMORZAMENTO

## Modal Damping

Campi di utilizzo:

- Strutture miste
- Differenziazione direzione sisma
- Caratteristiche geometriche
- Ecc...

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

Dividendo il tutto per la massa:

$$\ddot{u} + \frac{c}{m} \dot{u} + \frac{k}{m} u = 0$$

E poniamo:  $2 \xi \omega = \frac{c}{m}$

Dove:  $\xi = \frac{c}{2\sqrt{k m}}$

In definitiva:

$$\ddot{u} + 2 \xi \omega \dot{u} + \omega^2 u = 0$$

[Sconsigliato per analisi con integrazioni diretta: la matrice piena C aumenta i tempi di calcolo](#)



# ANALISI DINAMICA TIME HISTORY E GESTIONE DELLO SMORZAMENTO

## Modal Damping – Esempio di applicazione

I valori di smorzamento identificati attraverso le diverse tecniche nel dominio del tempo e nel dominio della frequenza risultano in buon accordo tra loro ed evidenziano un valore più elevato dello smorzamento per il secondo modo rispetto agli altri: il motivo va ricercato nella particolare configurazione della struttura (Figura 2d), che risulta completamente tamponata nella direzione del secondo modo, mentre risulta completamente aperta nella direzione ortogonale. Il valore più elevato di smorzamento nella direzione tamponata può, pertanto, essere ricondotto a meccanismi di dissipazione di tipo attritivo.



## Rayleigh Damping

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + F(U) = -MR\ddot{x}_g$$

Classico approccio: "Rayleigh damping" con 5% di smorzamento nei modi principali.  $C = a_0M + a_1K$

i parametri  $a_1$  e  $a_2$  sono tipicamente scelti per ottenere un corretto ordine di grandezza dello smorzamento in tutti i modi che contribuiscono significativamente alla risposta della struttura. Possono quindi essere calcolati nel seguente modo:

$$a_0 = \zeta \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j}$$

$$a_0 = 4\pi\zeta \frac{1}{T_i + T_j}$$

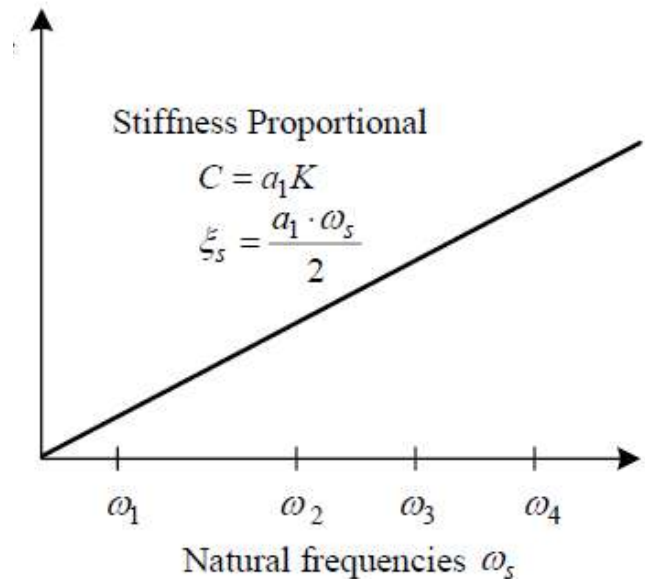
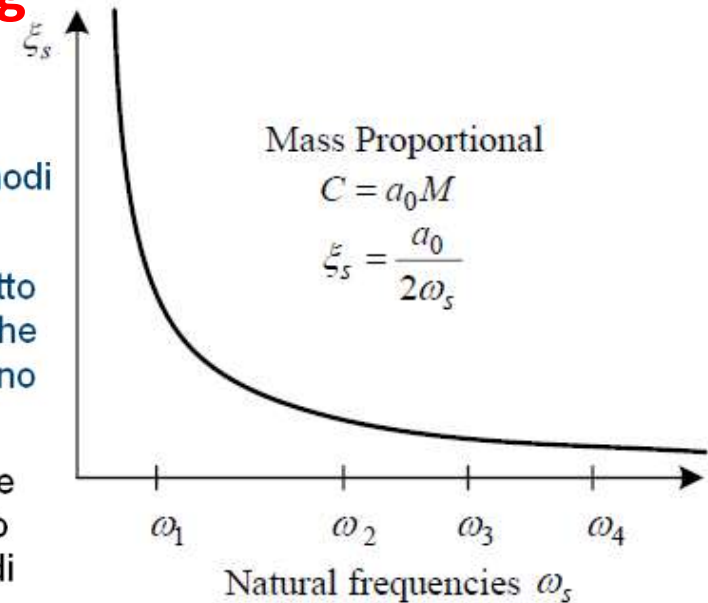
$$a_1 = \zeta \frac{2}{\omega_i + \omega_j}$$

$$a_1 = \frac{\zeta}{\pi} \frac{T_i T_j}{T_i + T_j}$$

dove  $\omega_i$  e  $\omega_j$  sono le frequenze non smorzate che definiscono l'intervallo di modi di vibrare di interesse.

Lo smorzamento dell'n-esimo modo sarà pari a:

$$\zeta_n = \frac{a_0}{2\omega_n} + \frac{a_1}{2}\omega_n$$



## Rayleigh Damping

Tuttavia, nessuna delle due matrici di smorzamento

$$\mathbf{C} = a_0 \mathbf{M}$$

$$\mathbf{C} = a_1 \mathbf{K}$$

è adeguata per l'analisi dinamica di sistemi strutturali comuni. Per entrambe, infatti, la variazione dei rapporti di smorzamento modali con le frequenze naturali non è coerente con i risultati sperimentali, che indicano approssimativamente lo stesso valore di  $\xi$  per diversi modi naturali di vibrazione.

Una matrice di smorzamento coerente con i dati sperimentali, rispetto a cui i modi naturali di vibrazione sono ortogonali, può essere ottenuta attraverso la formulazione dovuta a Lord Rayleigh<sup>(1)</sup>, in cui la matrice di smorzamento si ottiene attraverso una combinazione lineare delle matrici di massa e di rigidità, cioè

$$\mathbf{C} = a_0 \mathbf{M} + a_1 \mathbf{K}$$

Per il generico modo si può quindi scrivere

$$C_n = a_0 M_n + a_1 K_n$$

da cui, dividendo per  $M_n$ , si ottiene

$$2\xi_n \omega_n = a_0 + a_1 \omega_n^2$$

<sup>(1)</sup> Theory of Sound, Vol. 1, Dover Publications, New York, 1945



## Rayleigh Damping

...

$$2\xi_n \omega_n = a_0 + a_1 \omega_n^2$$

Le costanti  $a_0$  e  $a_1$  possono essere determinate fissando i rapporti di smorzamento  $\xi_i$  e  $\xi_j$  per l' $i$ -esimo ed il  $j$ -esimo modo. Si ha

$$\begin{cases} 2\xi_i \omega_i = a_0 + a_1 \omega_i^2 \\ 2\xi_j \omega_j = a_0 + a_1 \omega_j^2 \end{cases}$$

che in forma matriciale si scrive

$$\begin{bmatrix} 1 & \omega_i^2 \\ 1 & \omega_j^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = 2 \begin{bmatrix} \xi_i \omega_i \\ \xi_j \omega_j \end{bmatrix}$$

Risolvendo il sistema si ottiene

$$a_0 = \frac{2\omega_i \omega_j (\xi_i \omega_j - \xi_j \omega_i)}{(\omega_j^2 - \omega_i^2)}$$

$$a_1 = \frac{2(\xi_i \omega_i - \xi_j \omega_j)}{(\omega_j^2 - \omega_i^2)}$$

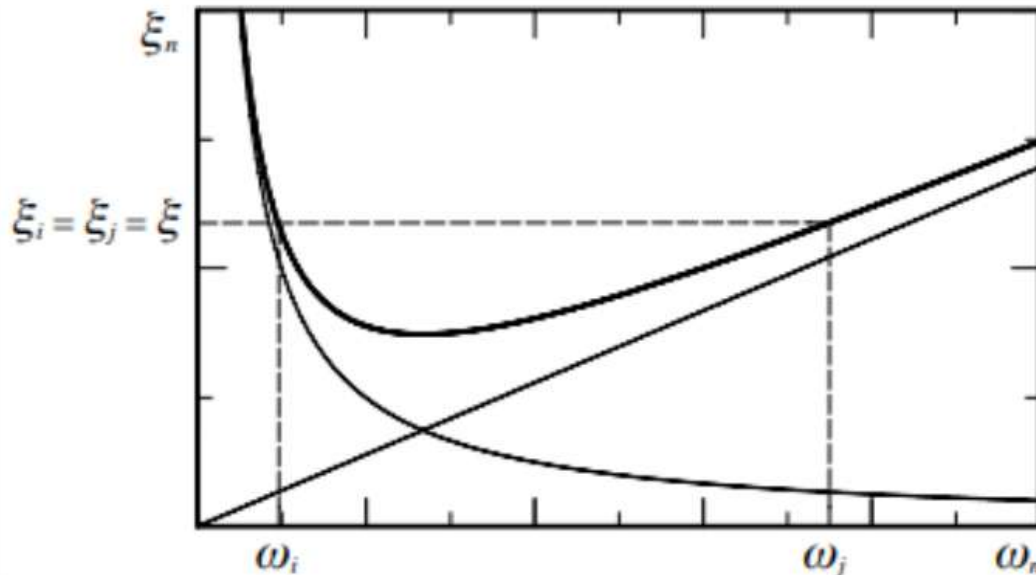
## Rayleigh Damping

Se si assume che entrambi i modi considerati hanno lo stesso rapporto di smorzamento, cioè  $\xi_i = \xi_j = \xi$ , il che è ragionevole con riferimento ai dati sperimentali, le relazioni precedenti si semplificano e assumono la forma

$$a_0 = \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j} \xi \qquad a_1 = \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \xi$$

Calcolati i valori di  $a_0$  e  $a_1$ , i rapporti di smorzamento modali per tutti i modi si ottengono dalla relazione

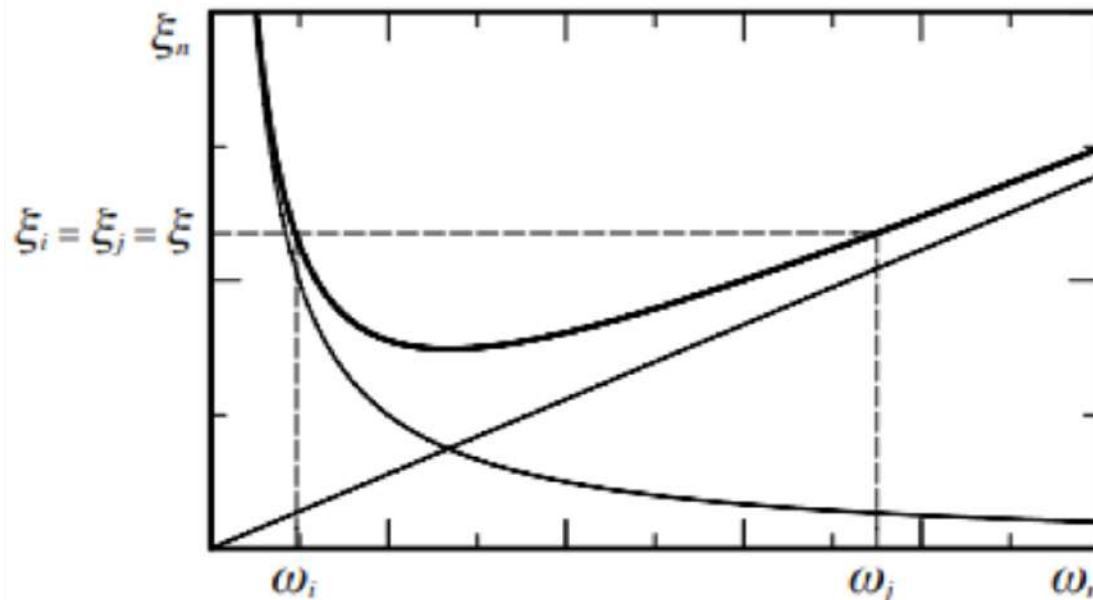
$$\xi_n = \frac{a_0}{2} \frac{1}{\omega_n} + \frac{a_1}{2} \omega_n$$



## Rayleigh Damping

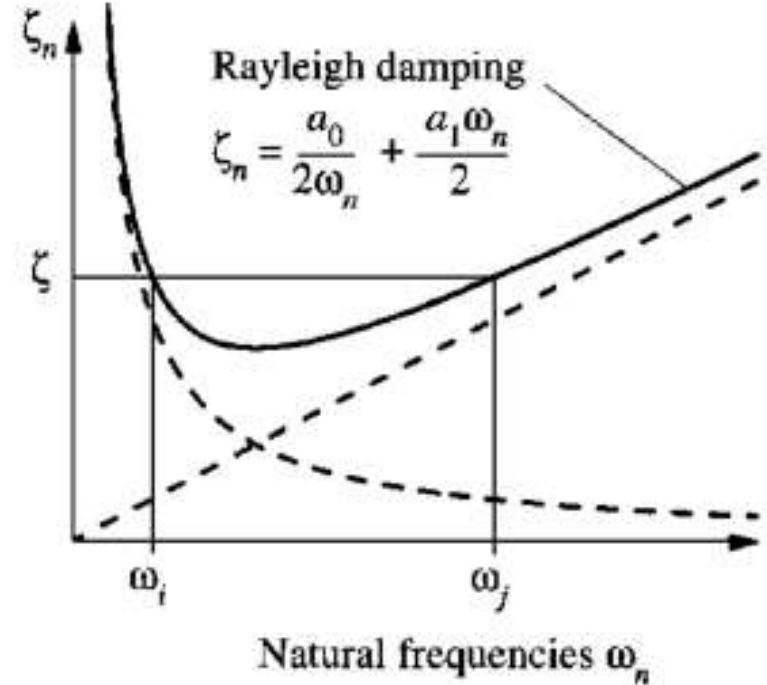
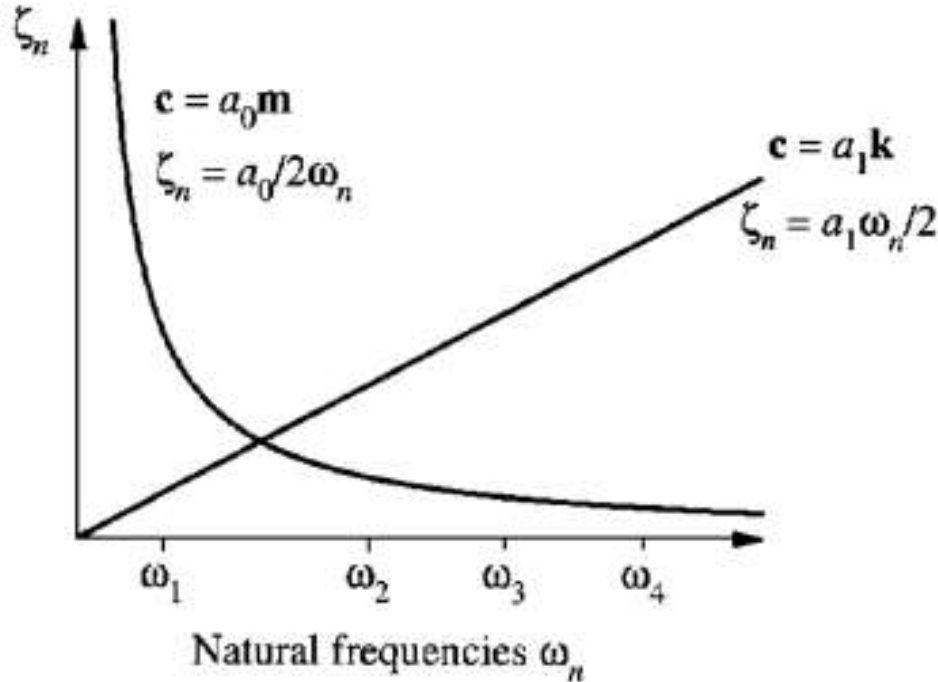
Nell'applicare questo procedimento ai casi pratici, i modi  $i$  e  $j$  per cui si specifica  $\xi$  devono essere scelti in maniera che tutti i modi che forniscono un contributo significativo alla risposta dinamica abbiano valori ragionevoli dei loro rapporti di smorzamento.

Per esempio, se si assume che cinque modi devono essere inclusi nell'analisi della risposta dinamica e che il loro rapporto di smorzamento debba essere circa uguale per tutti,  $\xi$  dovrebbe essere specificato per il primo e per il quarto modo. L'andamento riportato in figura, infatti, suggerisce che il secondo e il terzo modo avranno un rapporto di smorzamento un po' più piccolo, mentre il quinto un po' più grande. Tutti gli altri modi saranno maggiormente smorzati e le corrispondenti risposte modali saranno sempre più influenti.



$$\xi_n = \frac{a_0}{2} \frac{1}{\omega_n} + \frac{a_1}{2} \omega_n$$

## Rayleigh Damping



Una volta determinati  $a_0$  ed  $a_1$  la matrice di smorzamento  $C$  è definita completamente, così come i damping ratio per ogni modo

Attenzione alla scelta dello smorzamento dei due modi che definiscono completamente la matrice.



## Strain Energy Proportional

The damping ratio of a single degree of vibration system having viscous damping can be defined by a ratio of dissipated energy in a harmonic motion to the strain energy of the structure.

$$\xi = \frac{E_D}{4\pi E_S}$$

where,

$E_D$  : Dissipated energy

$E_S$  : Strain energy

Ipotesi per il calcolo:

1. La deformazione della struttura è assunta proporzionale alla deformata modale.
2. Il damping dell'elemento n-esimo è assunto viscoso e proporzionale alla sua rigidità:

$$\mathbf{C}_n = \frac{2h_n}{\omega_i} \mathbf{K}_n$$

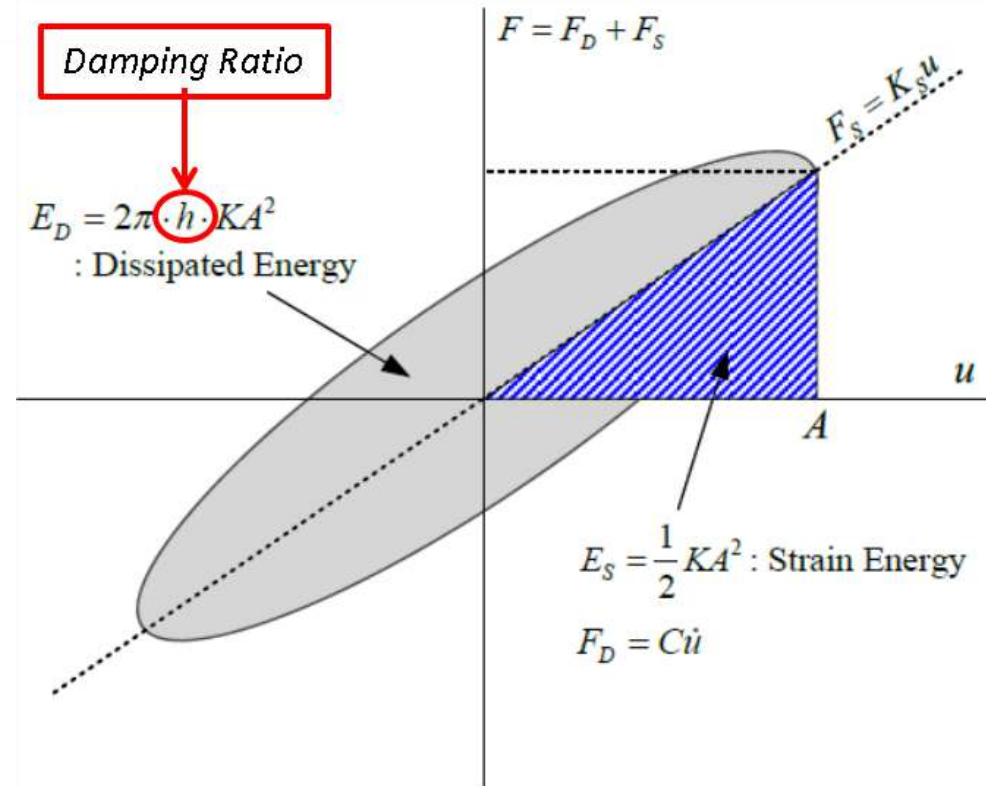


Figure 2.4.3 Dissipated Energy and Strain Energy

# ANALISI DINAMICA TIME HISTORY E GESTIONE DELLO SMORZAMENTO

The damping ratio of the  $i$ -th mode for the entire structure can be calculated by summing the energy for all the elements corresponding to the  $i$ -th mode.

$$\zeta_{Si} = \frac{\sum_{n=1}^N E_D(i,n)}{4\pi \cdot \sum_{n=1}^N E_S(i,n)} = \frac{\sum_{n=1}^N h_n \phi_{n,i}^T \mathbf{K}_n \phi_{n,i}}{\sum_{n=1}^N \phi_{n,i}^T \mathbf{K}_n \phi_{n,i}}$$

**Group Damping : Strain Energy Proportional**

Default Values for Unspecified Elements and Boundaries  
Damping Ratio : 0,05 (0,00 ~ 1,00)

Damping Ratio for Specified Elements and Boundaries  
Type:  Material  Structure  Boundary  
Name of Material / Group : Cross beam  
 Use Material Data  Direct Define  
Damping Ratio : 0,05 (0,00 ~ 1,00)

Name	Type	Damping Ratio
SM490	Material	0,02
SM400	Material	0,02
C27	Material	0,05
Cross beam	Structure	0,05
Sirt Group 2	Structure	0,05

Calculate Only When Used

Damping Ratio Select Option

(a) Defining Damping Ratios Element and Boundary Groups

**Modal Damping Ratio based on Group Damping**

Damping Ratio vs Frequency (Hz) plot showing values between 0.02 and 0.03.

Mode No.	Frequency (Hz)	Period (sec)	M.P.M. X (%)	M.P.M. Y (%)	M.P.M. Z (%)	Modal Damping Ratio
1	1.516833	0.659269	0.421441	62.893271	0.000006	0.038782
2	1.947404	0.513504	53.51830	2.460253	0.088640	0.03136
3	2.131171	0.468226	0.095391	0.006675	0.001492	0.029911
4	2.489797	0.401639	15.04319	2.228820	0.790667	0.026394
5	2.652879	0.376949	0.421531	3.149565	1.368275	0.026245
6	3.192462	0.313238	13.47370	0.213074	0.103475	0.026844
7	3.720825	0.268758	0.064054	0.016115	58.53938	0.021697

Calculation of Mass and Stiffness Coefficients  
Damping Option:  Mass Proportional  Stiffness Proportional

Mode No.	Frequency(Hz)	Damping Ratio	Calc.	C=Alpha+M + Beta+K
Mode 1	Mode 1	1.51683	0.0387819	Alpha 0,0
Mode 2	Mode 1	1.51683	0.0387819	Beta 0,0

(b) Calculation of Damping Ratio for Each Mode based for on strain Energy

Nelle **analisi modal superposition**, le equazioni del moto della struttura sono decomposte in un set di equazioni modali, le quali sono risolte utilizzando i **modal damping ratio** calcolati in questo modo.

Nelle **analisi time history con integrazione diretta**, la matrice di smorzamento è costruita in modo più complicato.



## Implementazione numerica

Lo smorzamento ha differenti metodi di rappresentazione a seconda se il metodo di analisi è la sovrapposizione modale o l'integrazione diretta.

L'**equazione del moto** può esprimersi come:  $\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_g$

### 1. Damping nei metodi di integrazione diretta

Utilizzando il metodo di Newmark, si fa uso della matrice di smorzamento  $\mathbf{C}$  all'interno dell'**equazione del moto riscritta**:

$$\left( \frac{1}{\beta\Delta t^2} \mathbf{M} + \frac{\gamma}{\beta\Delta t} \mathbf{C} + \mathbf{K} \right) \mathbf{u}_{t+\Delta t} \\ = \mathbf{R}_{t+\Delta t} + \mathbf{M} \left( \frac{1}{\beta\Delta t} \dot{\mathbf{u}}_t + \frac{1}{2\beta} \ddot{\mathbf{u}}_t \right) + \mathbf{C} \left\{ \frac{\gamma}{\beta} \dot{\mathbf{u}}_t + \left( \frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \Delta t \ddot{\mathbf{u}}_t \right\}$$

E' importante la modalità di generazione della matrice di smorzamento  $\mathbf{C}$   
Il metodo di Rayleigh è quello più immediato.

## Implementazione numerica

### 2. Damping nei metodi di sovrapposizione modale

Tale metodo fornisce la risposta strutturale decomponendo le equazioni del moto per ogni modo ed eseguendo una combinazione lineare.

Si può scrivere l'equazione nel seguente modo:

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

$$\frac{\mathbf{C}}{\mathbf{M}} = 2h\omega, \quad \frac{\mathbf{K}}{\mathbf{M}} = \omega^2,$$

$$\ddot{\mathbf{u}} + 2h\omega \dot{\mathbf{u}} + \omega^2 \mathbf{u} = -\ddot{\mathbf{u}}_g$$

$h$  : damping constant (damping ratio)

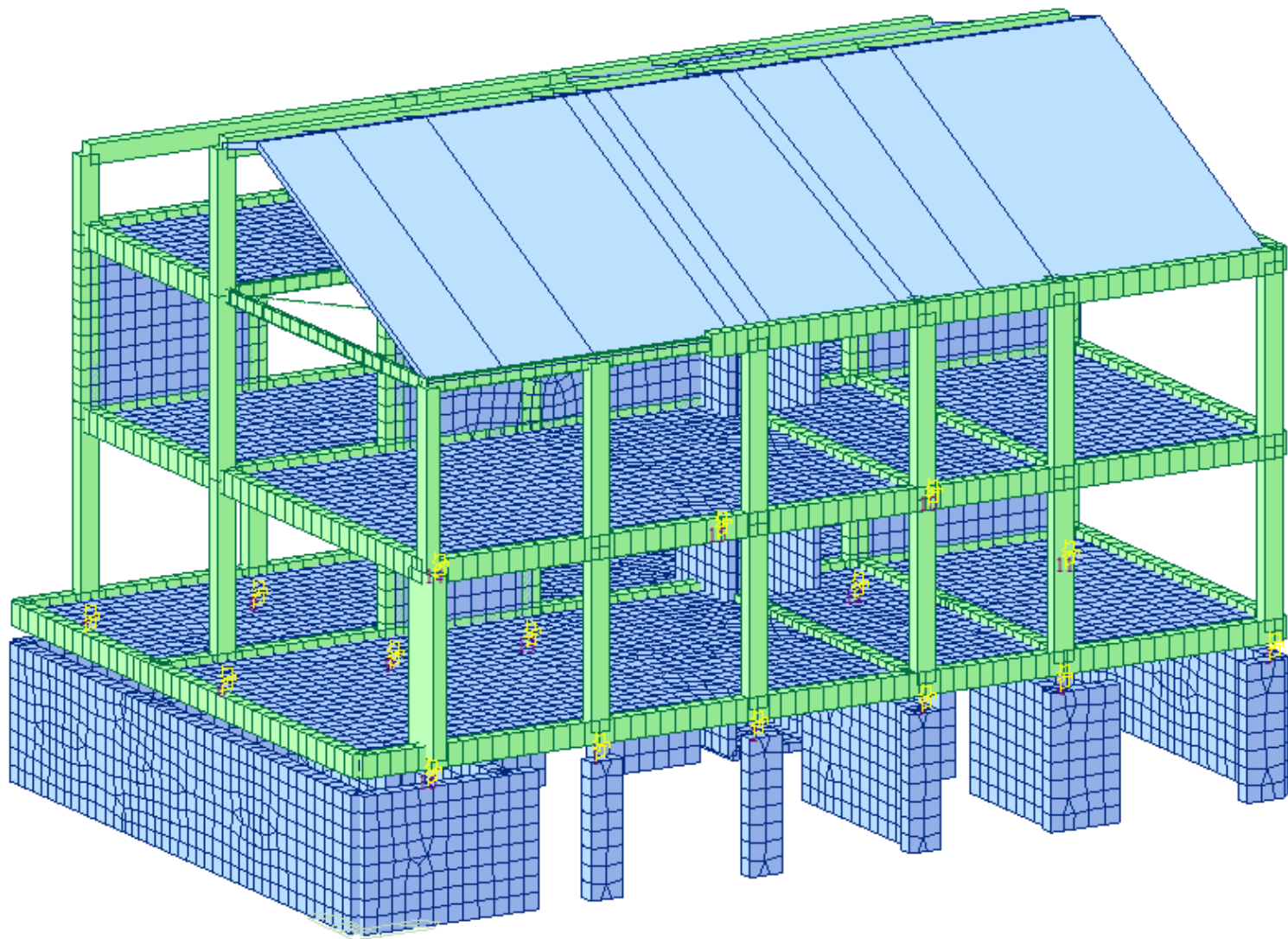
$\omega$  : Natural frequency (rad/sec)

Pertanto, nel caso di un'analisi con sovrapposizione modale è importante settare il **damping ratio**

# **Esempio 1**

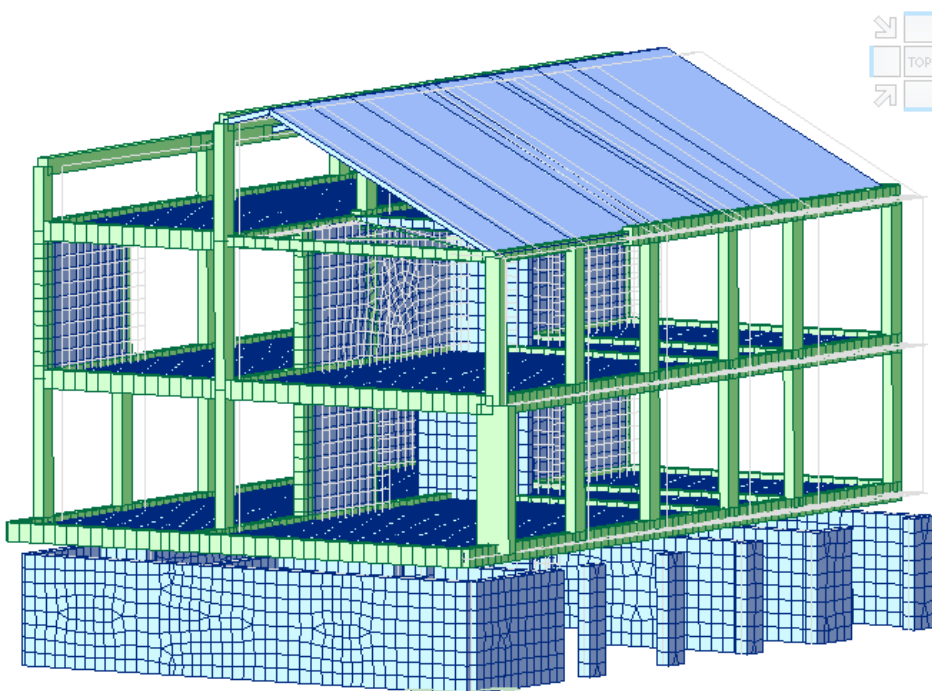
## **Isolamento alla base con friction pendulum di una struttura civile**

## Isolamento alla base con **friction pendulum**



# ANALISI DINAMICA TIME HISTORY E GESTIONE DELLO SMORZAMENTO

## Isolamento alla base con **friction pendulum**



midas Gen  
POST-PROCESSOR  
VIBRATION MODE

FREQUENCY  
(CYCLE/SEC)  
0.369163  
NATURAL PERIOD  
(SEC)  
2.708834  
MPM(%)  
DX= 4.681825  
DY= 70.458199  
DZ= 0.000000  
RX= 10.827183  
RY= 0.840877  
RZ= 12.464511

MODE 1

Mode	UX	UY	UZ			
<b>EIGENVALUE ANA</b>						
Mode No	Frequency		Period			
	(rad/sec)	(cycle/sec)	(sec)			
1	2.3195	0.3692	2.7088			
2	2.3983	0.3817	2.6198			
3	2.7442	0.4368	2.2896			
4	10.8494	1.7267	0.5791			
5	23.1980	3.6921	0.2709			
6	33.7788	5.3761	0.1860			
7	49.8988	7.9416	0.1259			
8	118.0354	18.7859	0.0532			
9	264.1162	42.0354	0.0238			
10	284.5723	45.2911	0.0221			
<b>MODAL PARTICIPATION MASS</b>						
Mode No	TRAN-X		TRAN-Y		TRAN-Z	
	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)
1	4.6818	4.6818	70.4582	70.4582	0.0000	0.0000
2	80.6593	85.3411	5.7895	76.2477	0.0000	0.0000
3	1.1585	86.4996	10.2469	86.4945	0.0000	0.0000
4	0.0016	86.5012	0.0000	86.4946	0.0000	0.0000
5	0.0002	86.5015	0.0149	86.5095	0.0000	0.0000
6	0.0007	86.5022	0.0002	86.5097	0.0000	0.0000
7	0.0001	86.5023	0.0002	86.5099	0.0000	0.0000
8	0.0099	86.5122	0.0092	86.5191	0.0000	0.0000
9	0.5013	87.0135	2.8199	89.3390	0.0000	0.0000
10	4.8132	91.8267	0.3454	89.6844	0.0000	0.0000

# ANALISI DINAMICA TIME HISTORY E GESTIONE DELLO SMORZAMENTO

## BIS con friction pendulum

$F_0 = \mu \cdot N_{Sd}$  ➔ friction force developed by the isolator

$F_{max} = F_0 + K_r \cdot d = \mu \cdot N_{Sd} + \frac{N_{Sd}}{R} \cdot d$  ➔ maximum horizontal force

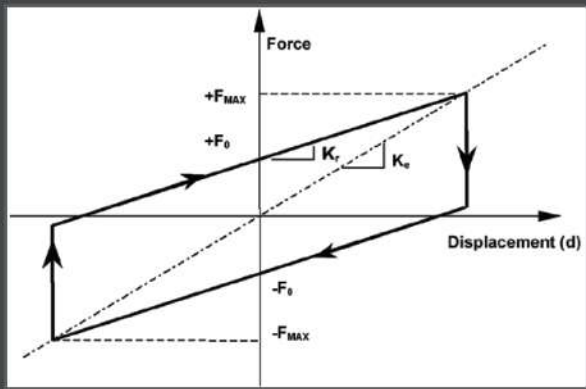
$K_r = \frac{N_{Sd}}{R}$  ➔ restoring stiffness

$\mu$  ➔ friction coefficient

$N_{Sd}$  ➔ vertical load acting on the isolator

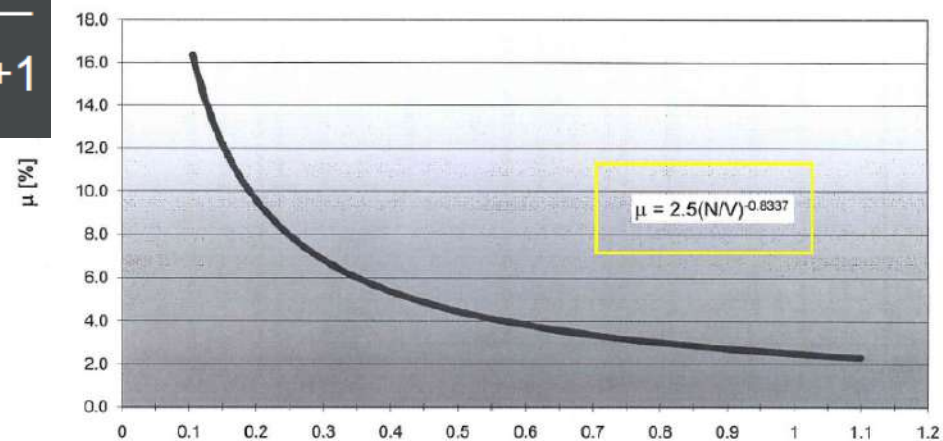
$R$  ➔ equivalent radius of curvature

$d$  ➔ displacement



Attrito Vs Carico Verticale

(N=carico verticale quasi-permanente agente sul singolo isolatore;  
V=carico verticale massimo in presenza di sisma che puo' essere sopportato dal tipo di isolatore utilizzato)



$$K_e = N_{Sd} \cdot \left( \frac{1}{R} + \frac{\mu}{d} \right) \quad \zeta_e = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{\frac{d}{\mu \cdot R} + 1}$$

$$T_e = 2\pi \sqrt{\frac{1}{g \cdot \left( \frac{1}{R} + \frac{\mu}{d} \right)}}$$

I valori di carico N e V da considerare nel calcolo dei parametri, sono rispettivamente il carico verticale "quasi-permanente" (SLE) ed il carico verticale massimo di progetto del dispositivo  $N_{Ed}$ .



# ANALISI DINAMICA TIME HISTORY E GESTIONE DELLO SMORZAMENTO

## Isolamento alla base con **friction pendulum** - Impostazione del LINK

Add/Modify General Link Properties

Name : FIP D M 1400-200

Description :

Application Type

Element Type 1 :  Force Type : Boundary Nonlinear Analysis

Property Type : Friction Pendulum System Isolator

Element Type 2 : Seismic Control Devices

Seismic Control Devices Type : Viscous Damper / Oil Damper

Self Weight

Total Weight : 0 kN

Lumped Weight Ratio: I-end : J-end = 0.5 : 0.5

Linear Properties

DOF	Effective Stiffness
<input checked="" type="checkbox"/> Dx	10000 kN/mm
<input checked="" type="checkbox"/> Dy	2.697 kN/mm
<input checked="" type="checkbox"/> Dz	2.697 kN/mm
<input type="checkbox"/> Rx	0 kN*mm/[rad]
<input type="checkbox"/> Ry	0 kN*mm/[rad]
<input type="checkbox"/> Rz	0 kN*mm/[rad]

Effective Damping

DOF	Effective Damping
<input type="checkbox"/> Dx	0 kN*sec/mm
<input type="checkbox"/> Dy	0 kN*sec/mm
<input type="checkbox"/> Dz	0 kN*sec/mm
<input type="checkbox"/> Rx	0 kN*mm*sec/[rad]
<input type="checkbox"/> Ry	0 kN*mm*sec/[rad]
<input type="checkbox"/> Rz	0 kN*mm*sec/[rad]

Nonlinear Properties

DOF

Dx Properties...

Dy Properties...

Dz Properties...

Rx Properties...

Ry Properties...

Rz Properties...

Shear Spring Location

Distance Ratio From End I Dy : 0.5 Dz : 0.5

Shear Spring in Friction Pendulum System Isolator

Nonlinear Properties

Stiffness (k) : 123 kN/mm

Frictional Coefficient, Slow (us) : 0.0516

Frictional Coefficient, Fast (uf) : 0.0646

Rate Parameter (r) : 0.05 sec/mm

Radius of Sliding Surface (R) : 2500 mm

Hysteretic Loop Parameter (a) : 0.5

Hysteretic Loop Parameter (b) : 0.5

a : alpha b : beta |a| + |b| = 1.0

Forza verticale N = 1910 kN

Capacità vertic. N<sub>rd</sub> = 5.960 kN

$$u_f = 2,5 (N / V)^{-0.8337} = 0.0646$$

$$u_s = 0,02 / 0.025 * u_f = 0.0516$$

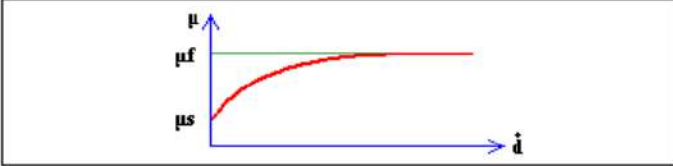
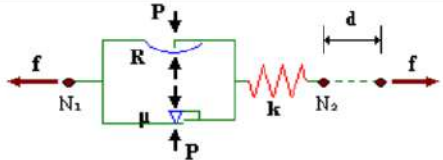
$$f = -\frac{P}{R}d - P \cdot \mu \cdot z$$

$$\dot{z} = \frac{k}{|P| \cdot \mu} [1 - |z|^2 \{ \alpha \cdot \text{sign}(\dot{d} \cdot z) + \beta \}] \dot{d}$$

$$\mu = \mu_f - (\mu_f - \mu_s) \exp^{-rv}; \quad v = |\dot{d}|$$

Rigidezza:  $\mu_f \cdot N / 1\text{mm} =$

**123 kN/mm**



# ANALISI DINAMICA TIME HISTORY E GESTIONE DELLO SMORZAMENTO

## Isolamento alla base con **friction pendulum** - Impostazione CARICO VERTIC.

Add/Modify Time History Load Cases

General

Name : Verticali Description :

Analysis Type  
 Linear  
 Nonlinear

Analysis Method  
 Modal  
 Direct Integration  
 Static

Time History Type  
 Transient  
 Periodic

End Time : 1 sec Time Increment : 0.01 sec

Step Number Increment for Output : 1

Add/Modify/Show Time History Functions

Function Name: Rampa

Time Function Data Type  
 Normalized Accel.  Acceleration  Force  Moment  Normal

Scale Factor  
 Scale Factor: 1  
 Maximum Value: 0

Gravity: 9.806 m/sec<sup>2</sup>

Graph Options  
 X-axis log scale  
 Y-axis log scale  
 F.F.T

	Time (sec)	Function
1	0.0000	0.0000
2	1.0000	1.0000
3		

Description:

Generate Earthquake Response Spectrum...

OK Cancel Apply

# ANALISI DINAMICA TIME HISTORY E GESTIONE DELLO SMORZAMENTO

## Isolamento alla base con **friction pendulum** - Impostazione ACCELEROGRAMMA

Add/Modify/Show Time History Functions

Function Name:

Time Function Data Type:  Normalized Accel.  Acceleration  Force  Moment  Normal

Scale Factor:  Scale Factor  Maximum Value

Gravity:  m/sec<sup>2</sup>

Graph Options:  X-axis log scale  Y-axis log scale  F.F.T

	Time (sec)	Function (m/sec <sup>2</sup> )
1	0.0000	0.0000
2	0.0100	-0.0099
3	0.0200	-0.0270
4	0.0300	-0.0383
5	0.0400	-0.0364
6	0.0500	-0.0358
7	0.0600	-0.0424
8	0.0700	-0.0423
9	0.0800	-0.0241
10	0.0900	-0.0099
11	0.1000	-0.0253
12	0.1100	-0.0495
13	0.1200	-0.0417
14	0.1300	-0.0030

Time History Data

Amplitude value

Description:

Generate Earthquake Response Spectrum...

Spectrum...

# ANALISI DINAMICA TIME HISTORY E GESTIONE DELLO SMORZAMENTO

## Isolamento alla base con **friction pendulum** - Impostazione TH SISMICA

Add/Modify Time History Load Cases

General

Name :  Description :

Analysis Type  
 Linear  
 Nonlinear

Analysis Method  
 Modal  
 Direct Integration  
 Static

Time History Type  
 Transient  
 Periodic

End Time :  sec

Time Increment :  sec

Step Number Increment for Output :

Order in Sequential Loading

Subsequent to  Load Case TH : Verticali

Initial Element Forces(Table)  
 Initial Forces for Geometric Stiffness

Cumulate D/N/A Results  Keep Final Step Loads Constant

Geometric Nonlinearity Type  
 None  Large Displacements

Damping  
Damping Method :

### Group Damping : Element Mass & Stiffness Proportional

Unspecified Nodes, Elements and Boundaries

Damping Type :  Mass Proportional  Stiffness Proportional

Direct Specification :

Calculate from Modal Damping :

Coefficients Calculation

	Mode 1	Mode 2
<input type="radio"/> Frequency [Hz] :	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
<input checked="" type="radio"/> Period [sec] :	<input type="text" value="1.45"/>	<input type="text" value="1.9"/>
Damping Ratio : (0.00 ~ 1.00)	<input type="text" value="0.02"/>	<input type="text" value="0.02"/>

Specified Nodes, Elements And Boundaries

Material Data / Group

Type:  Material  Structure  Boundary

Name of Material / Group :

Coefficients Calculation

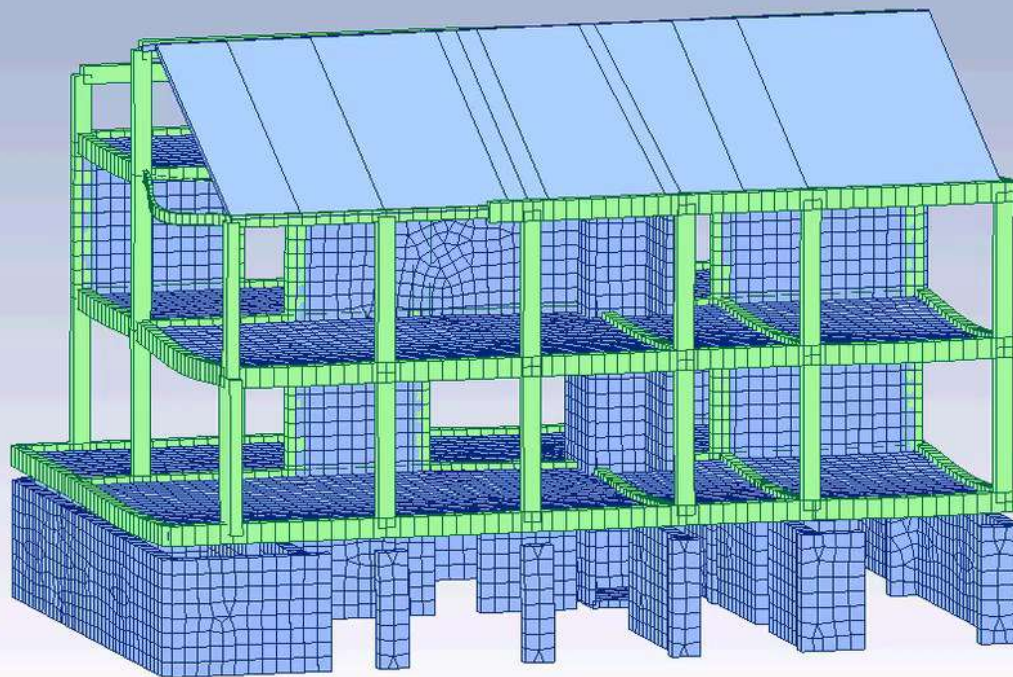
Damping Type :  Mass Proportional  Stiffness Proportional

Direct Specification :

Calculate from Modal Damping :

# ANALISI DINAMICA TIME HISTORY E GESTIONE DELLO SMORZAMENTO

## Isolamento alla base con **friction pendulum** - Impostazione TH SISMICA

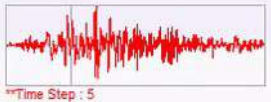


```
midas Gen
POST-PROCESSOR
TH-DISPL/VEL/ACCEL
RESULTANT
X-DIR= -2.098E-002
NODE= 12517
Y-DIR= 4.291E-003
NODE= 740
Z-DIR= -8.519E-003
NODE= 12517
COMB.= 2.259E-002
NODE= 12517
SCALEFACTOR=
3.918E+001

TH: ACC1
Time Step : 5
MAX : 12517
MIN : 1

FILE: ACC1
UNIT: m
DATE: 10/03/2019

VIEW-DIRECTION
X: -0.264
Y: -0.953
Z: 0.148
```



# **Esempio 2**

## **Isolamento con dissipatori a scorrimento di un capannone esistente**



# Isolamento con dissipatori a scorrimento

## Un approccio per la dissipazione degli «effetti dell'azione sismica»

L'obiettivo è **creare connessioni dissipative**, in particolare in corrispondenza del **nodo trave-pilastro** tramite il montaggio di **dispositivi in acciaio e fibra di carbonio** in grado di concentrare il danneggiamento in punti prestabiliti e ridurre gli effetti dell'azione sismica sugli elementi strutturali esistenti.

Applicazione semplice, con costi ed invasività accettabile, realizzabile in edifici industriali, dove esistono molte interferenze con le attività produttive.

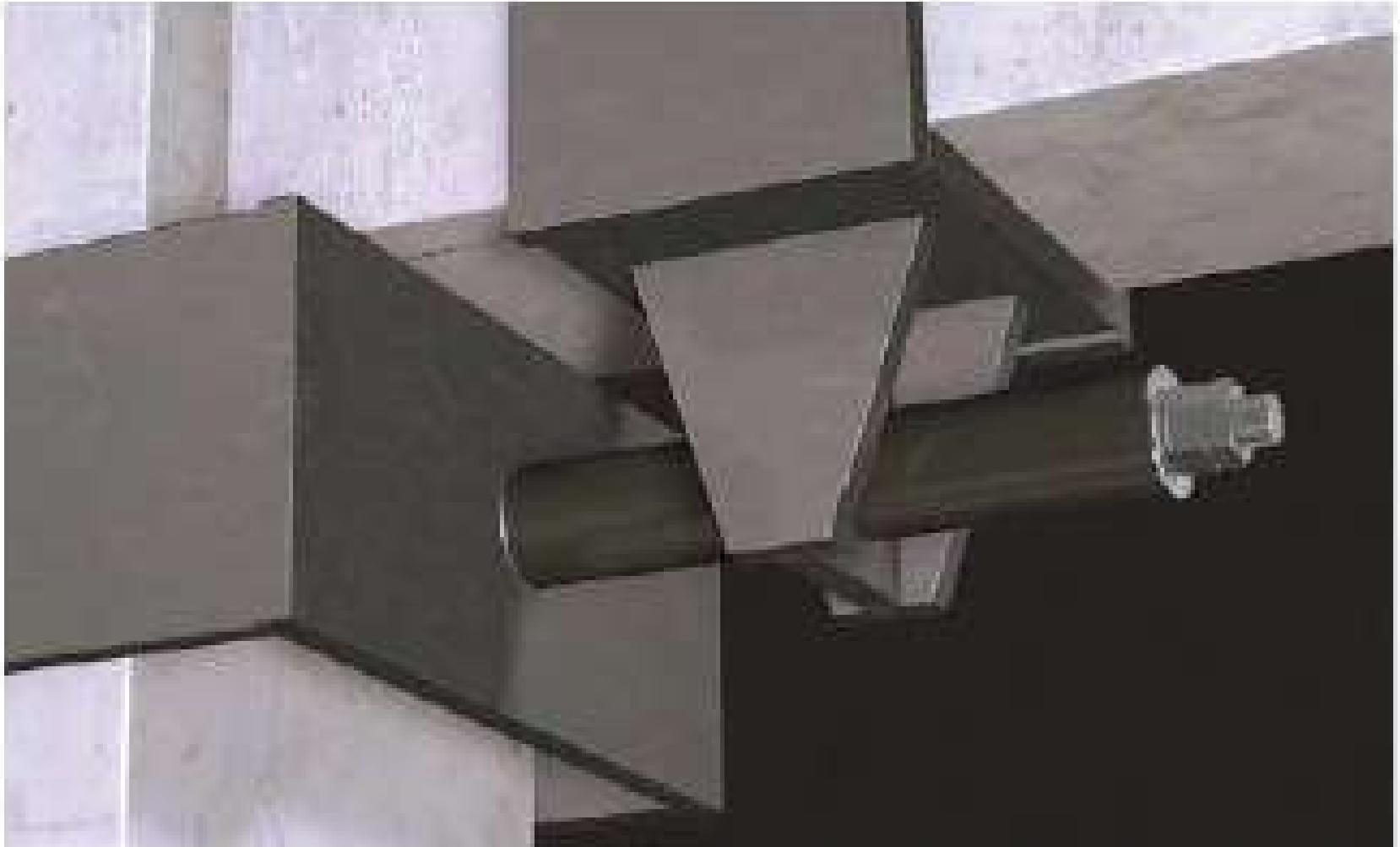
Il sistema prevede, nel caso di travi di copertura semplicemente appoggiate sui pilastri, la realizzazione di una connessione con un comportamento di vincolo a fusibile in grado di dissipare energia per effetto della deformazione plastica dei dispositivi.

Il sistema coniuga l'esigenza di collegare tra loro gli elementi strutturali e quella di mantenere valori di sollecitazione contenuti sul pilastro

**Effetto di fusibile del dispositivo:** tagliare l'effetto dei principali picchi dell'accelerazione sismica, riducendo gli effetti del sisma sulla struttura.

## Isolamento con dissipatori a scorrimento

Un approccio per la dissipazione degli «effetti dell'azione sismica»



# Isolamento con dissipatori a scorrimento

Un approccio per la dissipazione degli «effetti dell'azione sismica»

**Rispetto** alla realizzazione di un **collegamento rigido**, consente di:

- avere alla **base del pilastro sollecitazioni** di entità **inferiori**
- **concentrare il danneggiamento** nei **dispositivi** prima di ricorrere alle risorse plastiche della struttura.

L'introduzione dei dispositivi in strutture realizzate senza dettagli antisismici:

1. **non incrementa** in modo significativo la **rigidezza del nodo esistente**;
2. **non modifica** significativamente lo **schema statico originario** della struttura;
3. permette di **assicurare un collegamento**, limitando allo stesso tempo il valore degli sforzi trasferiti al resto della struttura, grazie all'assorbimento di energia dato dalla combinazione acciaio-fibra di carbonio;
4. **impedisce i movimenti** relativi tra gli elementi collegati fino al raggiungimento di una determinata **soglia di forza**. Al superamento di tale forza per effetto di un evento sismico, entrano in funzione i dispositivi, dissipando energia per effetto della loro deformazione plastica

L'impiego dei dispositivi in corrispondenza di connessioni basate sull'attrito permette di limitare lo spostamento relativo trave-pilastro a valori tali da evitare fenomeni di perdita d'appoggio.

Lo **spostamento** avviene in corrispondenza di un **valore di forza controllato**.

# Isolamento con dissipatori a scorrimento

## Un approccio per la dissipazione degli «effetti dell'azione sismica»

Funzionamento del dispositivo e dei suoi effetti sul comportamento della connessione

**Fase 1** - L'azione orizzontale cresce fino al raggiungimento della forza di plasticizzazione del dispositivo. Forza trasferita al vincolo a cerniera, al pilastro.

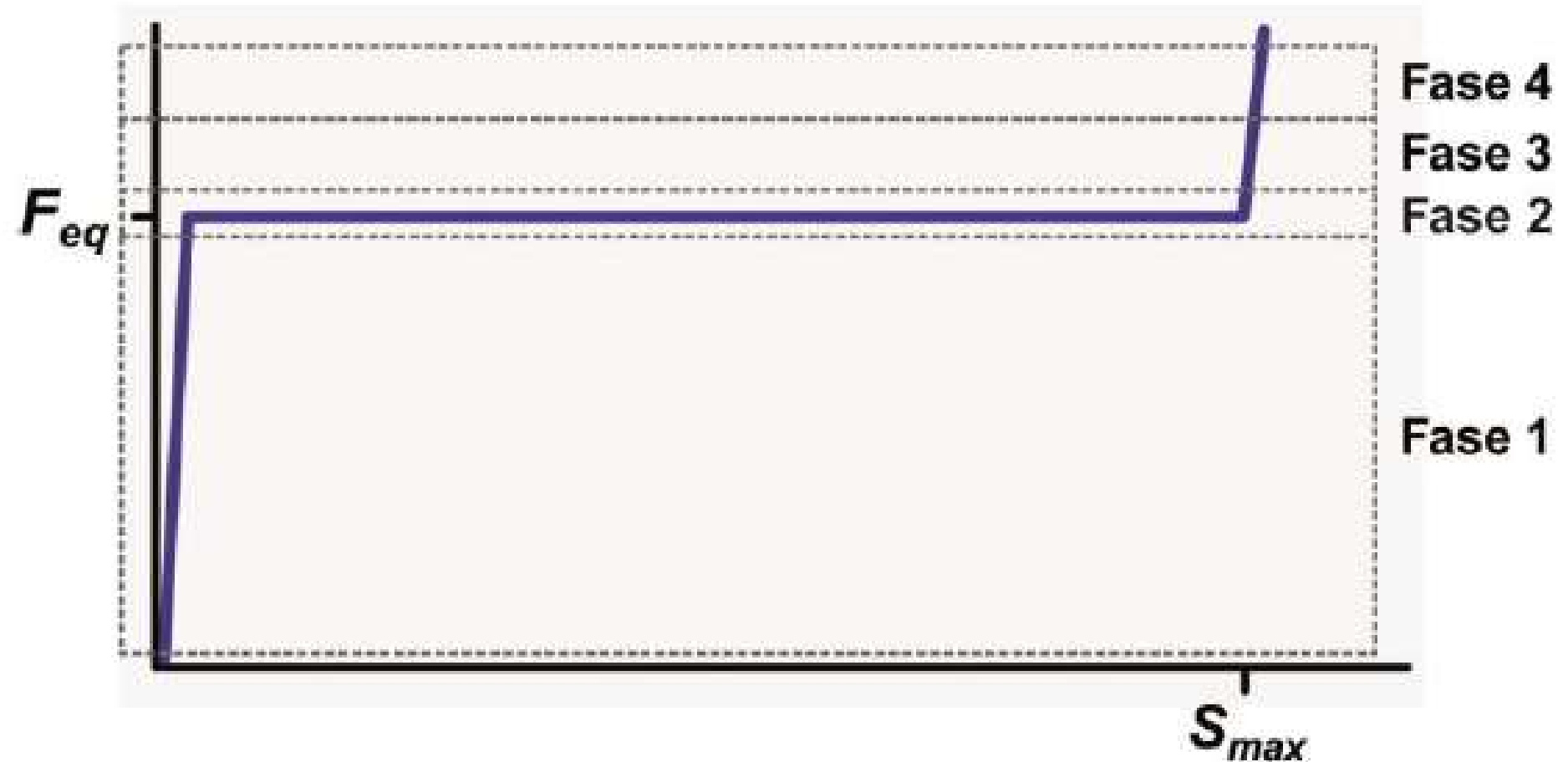
**Fase 2** - Limite di forza di plasticizzazione. I dispositivi iniziano a deformarsi progressivamente dissipando energia. L'azione è trasferita agli elementi di collegamento e quindi al pilastro è pressoché costante intorno al valore di forza di plasticizzazione fino al valore limite di deformazione dei dispositivi.

**Fase 3** - Il dispositivo raggiunge il limite massimo di deformazione e le sue capacità dissipative sono esaurite. Se vengono richiesti valori di spostamento relativo trave-pilastro superiori al valore limite di deformazione dei dispositivi, si comporta di nuovo come un vincolo a cerniera. Si ristabilisce la situazione della Fase 1 in cui la forza in corrispondenza della connessione si trasferisce totalmente al pilastro.

**Fase 4** - Viene raggiunto il limite elastico della capacità resistente alla base del pilastro. Se la forza applicata in sommità del pilastro continua a crescere si raggiunge il momento di plasticizzazione alla base del pilastro e si genera una zona di cerniera plastica.

# Isolamento con dissipatori a scorrimento

Un approccio per la dissipazione degli «effetti dell'azione sismica»





# Isolamento con dissipatori a scorrimento

## Un approccio per la dissipazione degli «effetti dell'azione sismica»

Il progetto della connessione dissipativa deve essere eseguito verificando che i dispositivi non raggiungano la deformazione limite per effetto dell'azione sismica associata allo stato limite considerato.

Le configurazioni previste nelle Fasi 3 e 4, in cui gli spostamenti relativi sono impediti, devono essere considerate una sicurezza aggiuntiva con l'obiettivo di evitare la perdita d'appoggio della trave.

In termini di forze, la connessione deve essere progettata in modo che i dispositivi abbiano una forza di plasticizzazione inferiore alla sollecitazione di progetto in corrispondenza del nodo per lo stato limite considerato, in modo tale da permetterne la plasticizzazione e poterne sfruttare i benefici.

La forza trasmessa dal dispositivo al resto della struttura attraverso la connessione sia sopportabile dagli elementi strutturali esistenti e in particolare sia inferiore alla capacità resistente del pilastro.

In termini di spostamento, per verificare che il dispositivo non esaurisca la sua capacità dissipativa per l'azione sismica di progetto, si può utilizzare lo spettro in spostamento e verificare che la domanda di spostamento sia inferiore alla capacità di deformazione massima del dispositivo.

# Isolamento con dissipatori a scorrimento

Un approccio per la dissipazione degli «effetti dell'azione sismica»

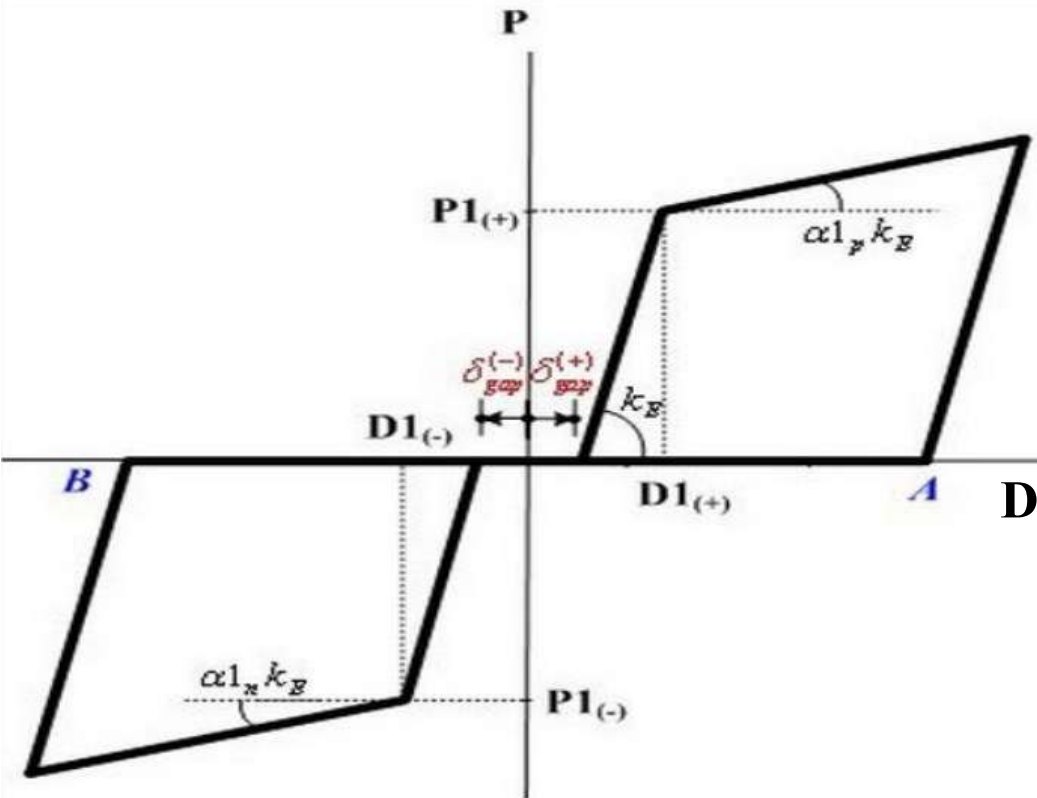
## Sequenza progettuale:

1. **Taratura** dell'elemento «**fusibile**» rispetto ai **dati del produttore**
2. Definizione elementi «**speciali**» per simulazione dissipatori
3. Inserimento nel **modello di calcolo**
4. Validazione del **modello 3D globale**
5. Impostazione **analisi statica NL**
6. Impostazione **analisi dinamica NL**
7. Analisi dei **risultati**

# Isolamento con dissipatori a scorrimento

## MODELLAZIONE DISSIPATORE

### Slip Bilinear Type hysteresis model



- At initial loading, response points move along the bilinear skeleton curve.
- When  $|D1| < |D|$ , the member is unloaded along the slope of elastic stiffness up to point A (a point where the restoring force is 0). Once the response points reach a reversal point A during unloading, they move along the X-axis up to point B.
- Once response points go beyond point B, the member is reloaded along the slope of elastic stiffness until the response points reach the skeleton curve. Then the member is unloaded with the slope of elastic stiffness until the restoring force becomes 0. From a reversal point, the response points move along the Displacement Axis (X-axis). This process is repeated.
- In the Slip Bilinear type hysteresis model, an initial Gap can be set.

# Isolamento con dissipatori a scorrimento

## MODELLAZIONE DISSIPATORE



**Add/Modify/Show Time History Functions**

Function Name:

Time Function Data Type:  
 Normalized Accel.  Acceleration  Force  Moment  Normal

Scale Factor:  
 Scale Factor   
 Maximum Value

Gravity:  mm/sec<sup>2</sup>

Graph Options:  
 X-axis log scale  
 Y-axis log scale  
 F.F.T

Sinusoidal Function  
$$F(t) = (A+C*t)e^{-(D*t)} * \text{SIN}(2*PI*f*t+PA*PI/180)$$
  
where  $f$  = Frequency (cps)  
 $D$  = Damping Factor

A :  1/sec  
C :  [cps]  
f :  [cps]  
D :   
PA :  [deg]

Graph Drawing  
 Using Calculated Parameter  
Time Increment :   
Drawing Time(sec):   
Redraw Graph

Time History Data

The graph shows a sinusoidal wave oscillating between -1.1 and 1.1 over a time period of 100 seconds. The x-axis is labeled 'Time (sec)' and ranges from 0 to 100. The y-axis is labeled 'Time History Data' and ranges from -1.1 to 1.1. The wave has a period of approximately 10 seconds.

# Isolamento con dissipatori a scorrimento

## MODELLAZIONE DISSIPATORE

Directional Hinge Properties : SLIP Bilinear

Type

Symmetric     Asymmetric

Yield Properties

Input Method

User Input     Auto-Calculation

Input Type

Strength - Stiffness Reduction Ratio

Strength - Yield Displacement

Yield Strength

	(t)	(c)	
P1	30	30	kN
P2	30	30	kN

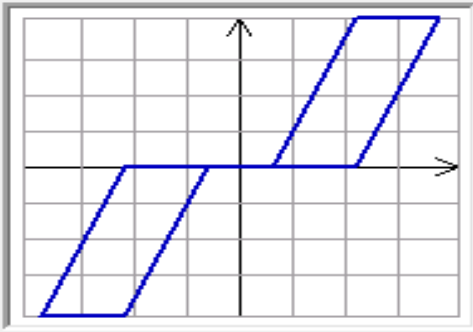
Yield Displacement

	(t)	(c)	
D1	5	5	mm
D2	75	75	mm

Initial Gap

	(t)	(c)	
	5	5	mm

Primary Curve



Deformation Indices

Ductility Factor :  D/D1     D/D2

Hinge Status

Level	(t)	(c)
1	0.5	0.5
2	1	1
3	2	2
4	4	4
5	8	8

Initial Stiffness

6EI/L     3EI/L     2EI/L

User:  kN/mm

Elastic Stiffness

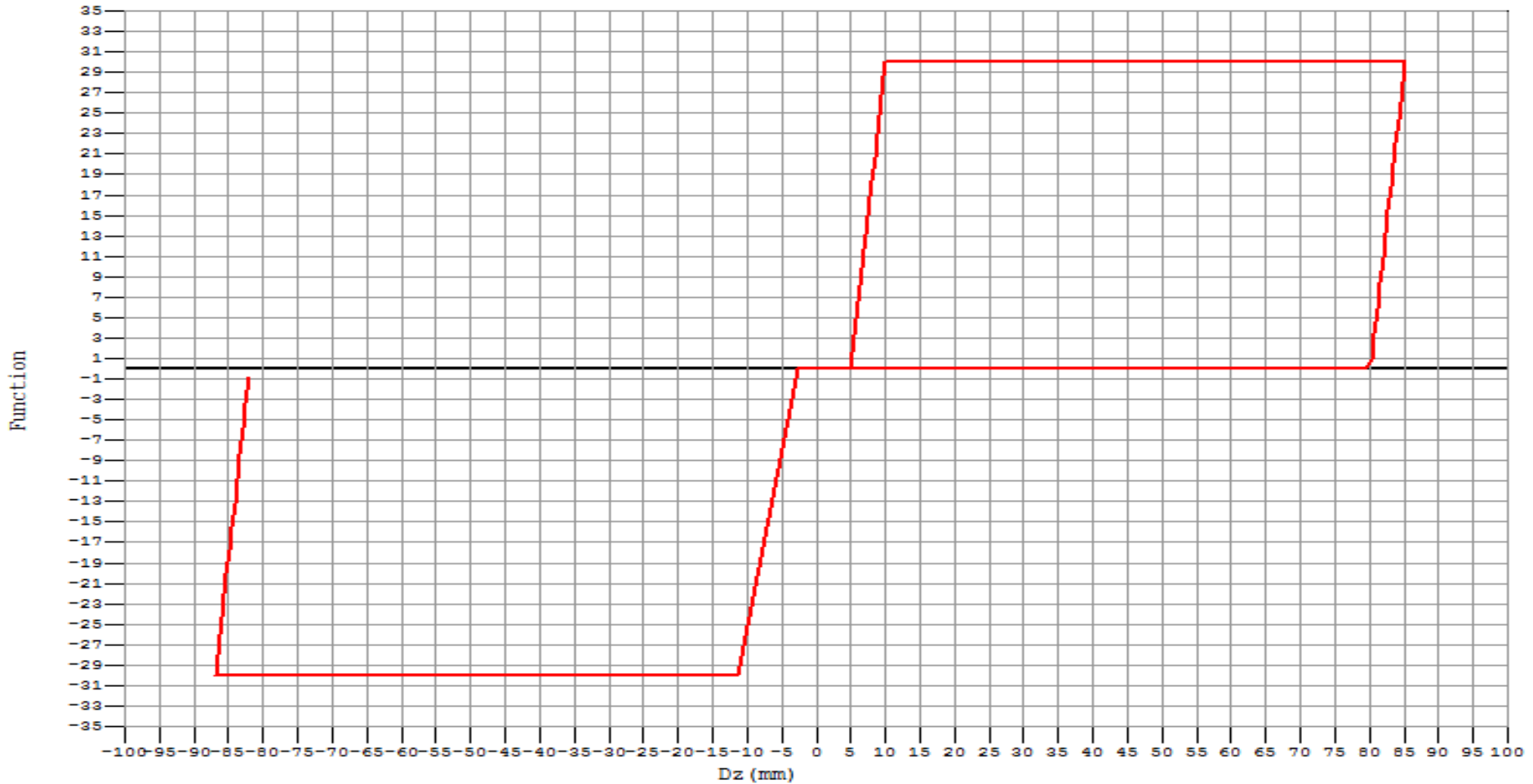
Skeleton Curve



# Isolamento con dissipatori a scorrimento

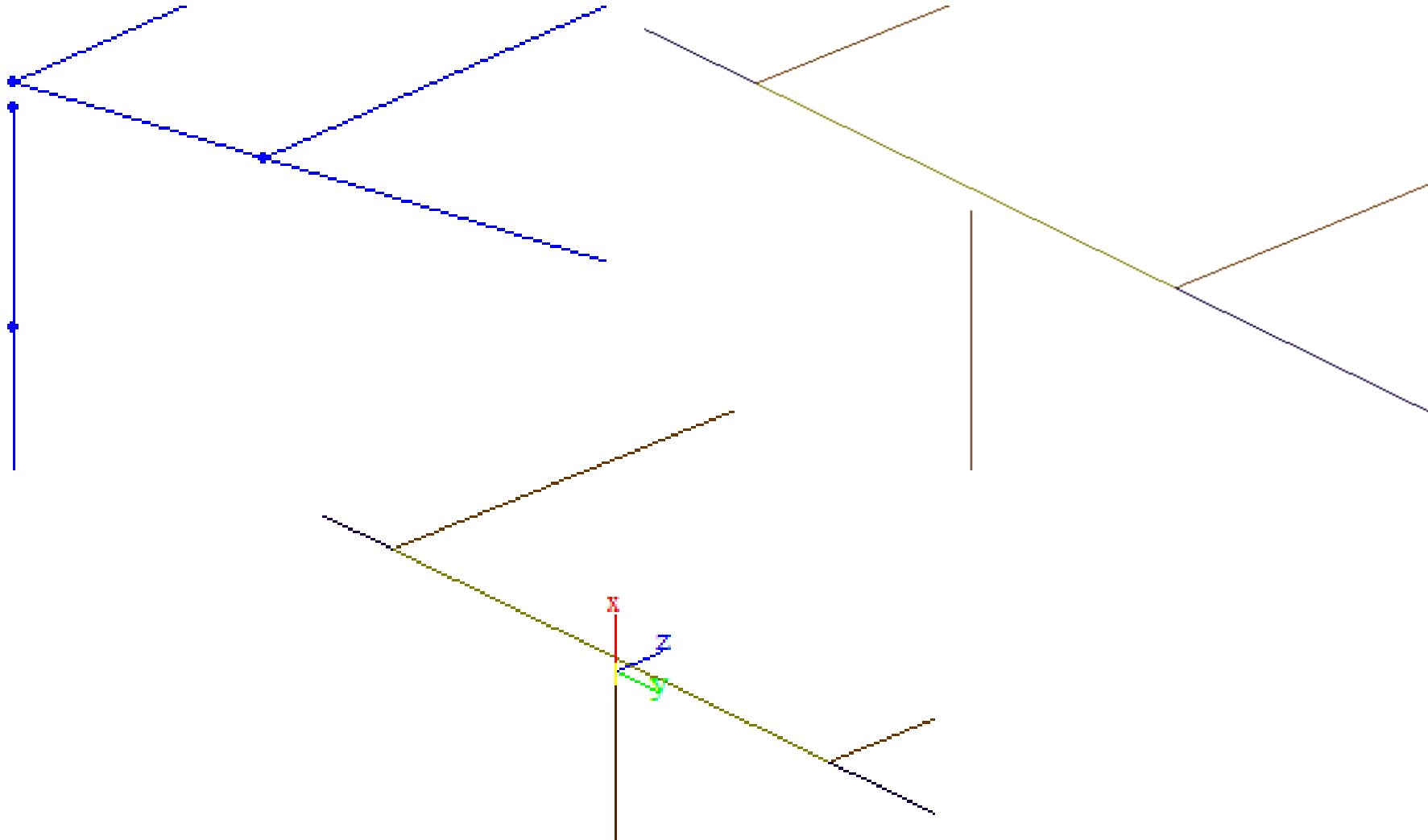
Un approccio per la dissipazione degli «effetti dell'azione sismica»

## MODELLAZIONE DISSIPATORE



# Isolamento con dissipatori a scorrimento

## MODELLAZ. DISSIPATORE - Schema di modellazione elementi di dissipazione



# Isolamento con dissipatori a scorrimento

## MODELLAZIONE DISSIPATORE

E' essenziale operare un confronto in termini di analisi modale tra il modello originale ed il modello con dissipatori.

Il modello con dissipatori, per ogni coppia di nodi rappresentativi del dissipatore stesso, deve ripristinare il trasferimento delle rigidzze che avevamo nel modello originale.

Add/Modify General Link Properties

Name :

Description :

Application Type

Element Type 1  Force Type : Boundary Nonlinear Analysis

Property Type :

Element Type 2 : Seismic Control Devices

Seismic Control Devices Type :

Seismic Control Devices Properties :

Self Weight

Use Mass

Total Weight :  kN

Total Mass :  kN/g

Lumped Weight Ratio:

I-end : J-end =  :

Lumped Mass Ratio:

I-end : J-end =  :

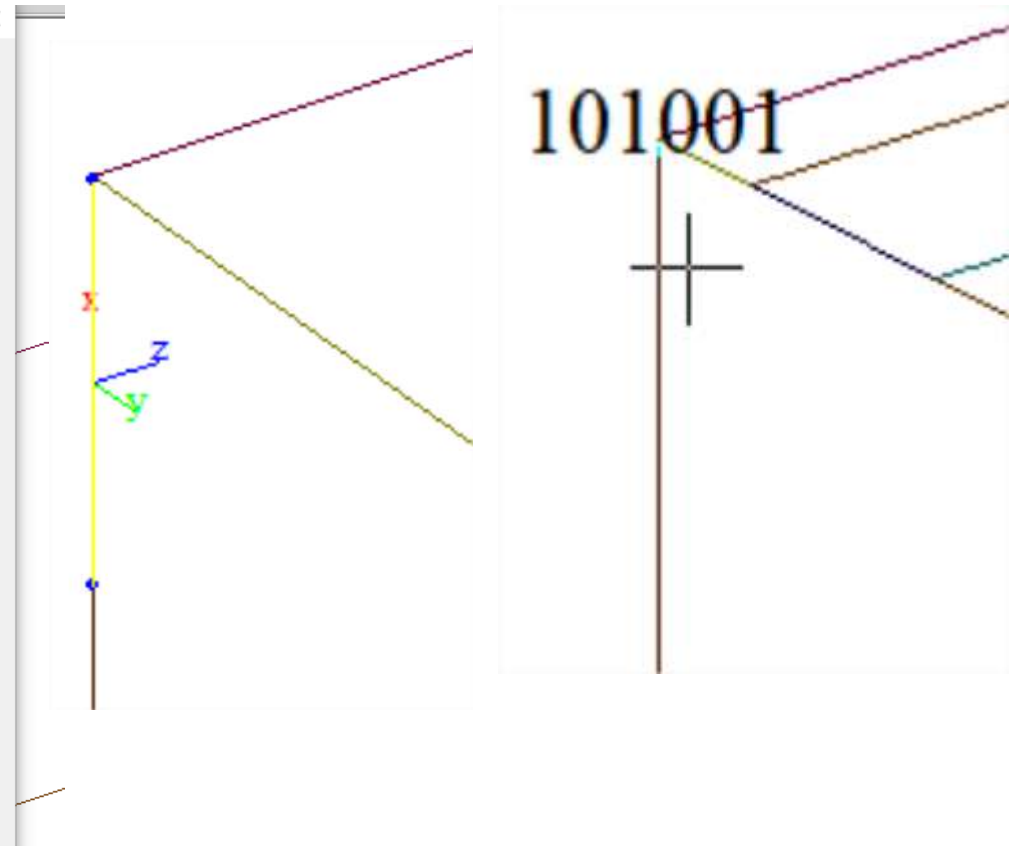
Linear Properties

DOF	Stiffness	Damping
<input type="checkbox"/> Dx	999999 kN/m	0 kN*sec/m
<input checked="" type="checkbox"/> Dy	841042.8 kN/m	0 kN*sec/m
<input type="checkbox"/> Dz	217912.3 kN/m	0 kN*sec/m
<input type="checkbox"/> Rx	999999 kN*m/[rad]	0 kN*m*sec/[rad]
<input type="checkbox"/> Ry	17432.99 kN*m/[rad]	0 kN*m*sec/[rad]
<input type="checkbox"/> Rz	67283.43 kN*m/[rad]	0 kN*m*sec/[rad]

Description Coupled

Nonlinear Properties

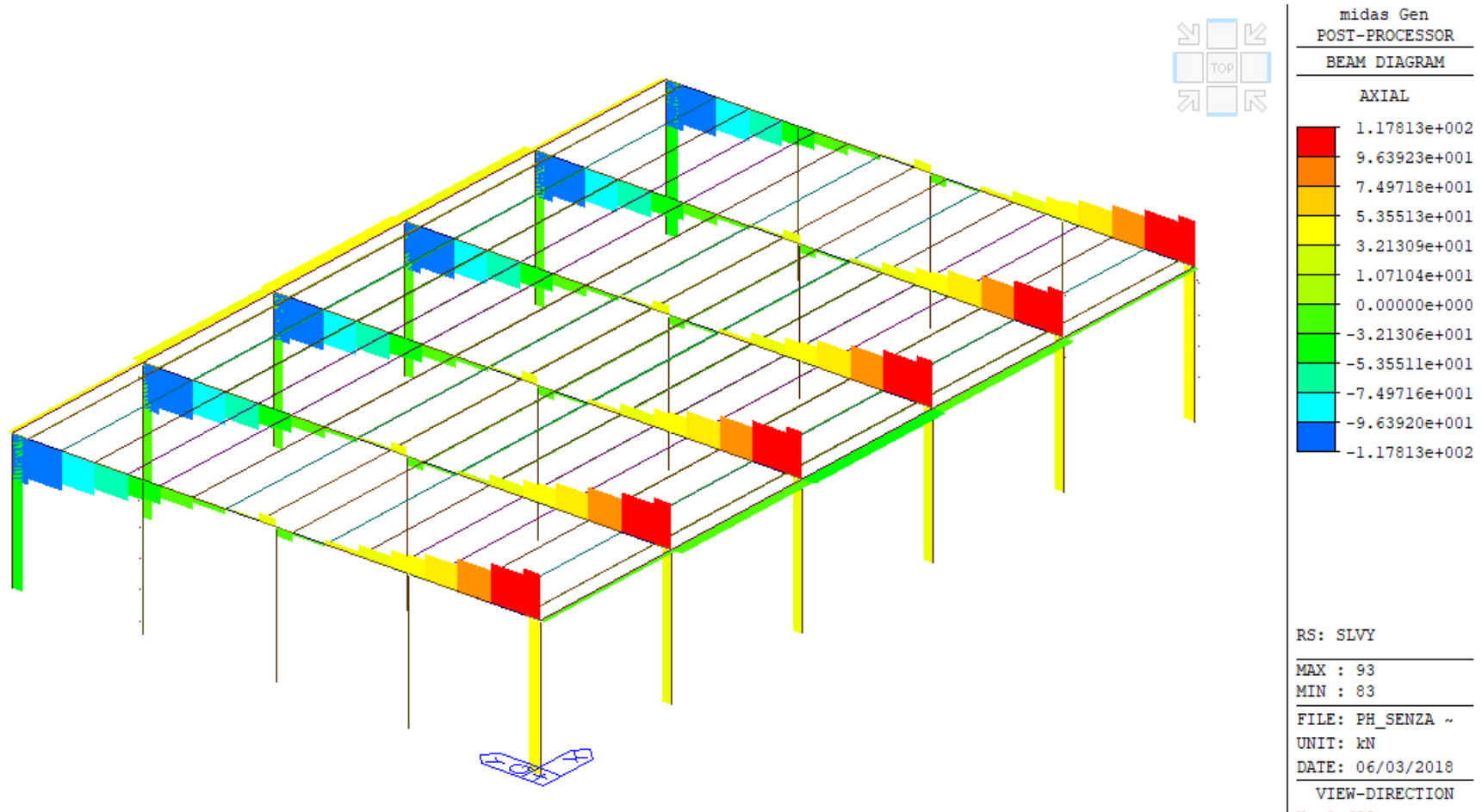
DOF	Properties...
<input type="checkbox"/> Dx	Properties...
<input type="checkbox"/> Dy	Properties...
<input type="checkbox"/> Dz	Properties...
<input type="checkbox"/> Rx	Properties...
<input type="checkbox"/> Ry	Properties...
<input type="checkbox"/> Rz	Properties...



# Isolamento con dissipatori a scorrimento

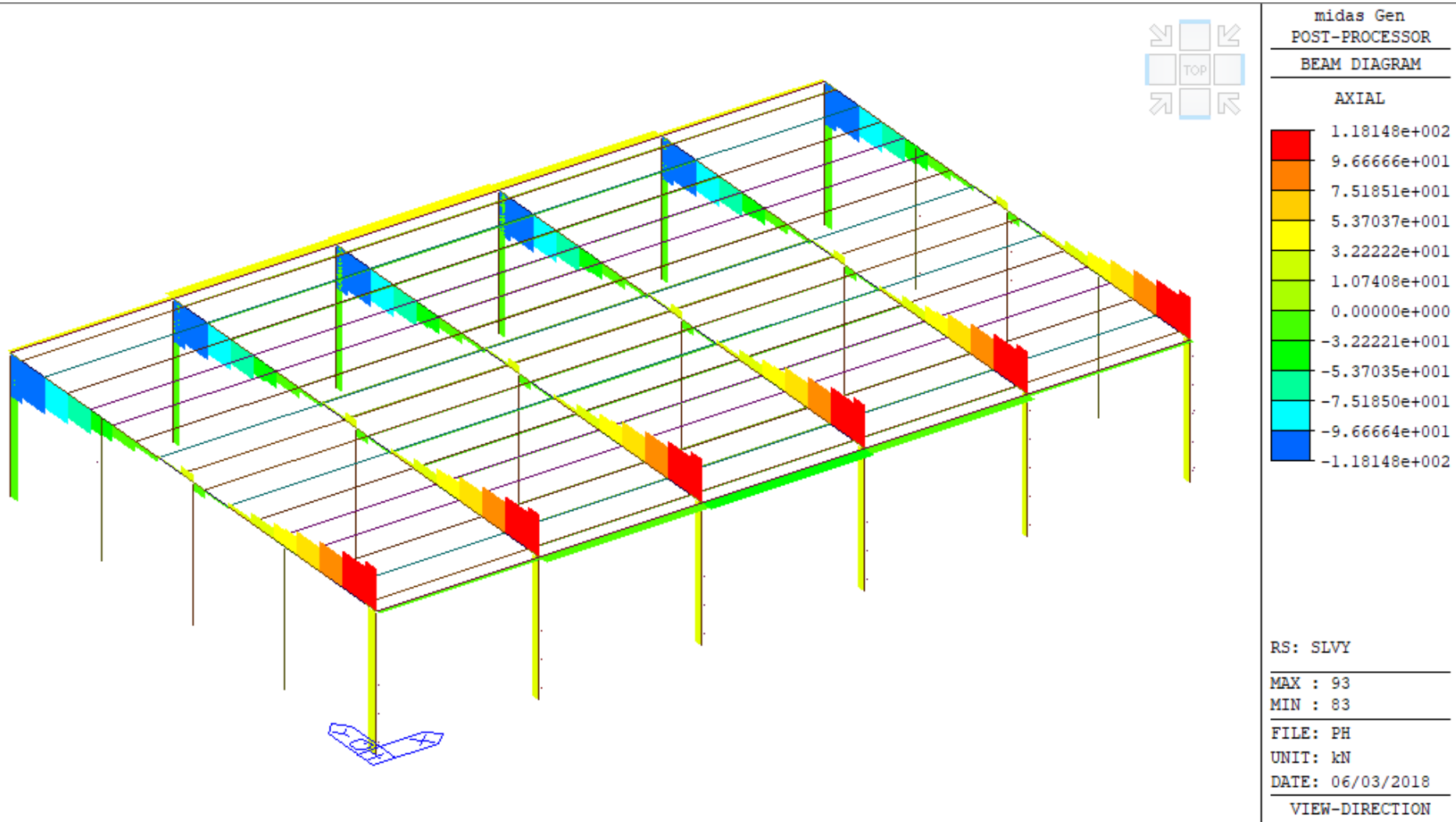
## MODELLO SENZA DISSIPATORI

La rigidezza in direzione  $D_y$  viene calcolata considerando un azione unitaria agente in direzione Y nel modello originale. Si valuta lo spostamento relativo tra ogni coppia di nodi dove verranno inseriti i dissipatori ( $RIG = F / \Delta_{y,rel}$ )



# Isolamento con dissipatori a scorrimento

## MODELLO CON DISSIPATORI



# Isolamento con dissipatori a scorrimento

Un approccio per la dissipazione degli «effetti dell'azione sismica»

## MODELLAZIONE DISSIPATORE

### Definizione elemento «fusibile» per analisi dinamica non lineare

Add/Modify General Link Properties

Name :

Description :

Application Type  
 Element  Force

Property Type :

Self Weight  
Total Weight :  kN  
Lumped Weight Ratio:  
I-end : J-end =  :

Use Mass  
Total Mass :  kN/g  
Lumped Mass Ratio:  
I-end : J-end =  :

Linear Properties

DOF	Stiffness	Damping
<input checked="" type="checkbox"/> Dx	<input type="text" value="99999999"/> kN/m	<input type="text" value="0"/> kN*sec/m
<input checked="" type="checkbox"/> Dy	<input type="text" value="9999"/> kN/m	<input type="text" value="0"/> kN*sec/m
<input checked="" type="checkbox"/> Dz	<input type="text" value="9999"/> kN/m	<input type="text" value="0"/> kN*sec/m
<input checked="" type="checkbox"/> Rx	<input type="text" value="9999"/> kN*m/[rad]	<input type="text" value="0"/> kN*m*sec/[rad]
<input checked="" type="checkbox"/> Ry	<input type="text" value="99"/> kN*m/[rad]	<input type="text" value="0"/> kN*m*sec/[rad]
<input checked="" type="checkbox"/> Rz	<input type="text" value="9999"/> kN*m/[rad]	<input type="text" value="0"/> kN*m*sec/[rad]

Shear Spring Location  
Distance Ratio From End I    Dy :     Dz :

Add/Modify Inelastic Hinge Properties

Name :

Description :

Element Type  
 Beam-Column  Wall (CRB)  Truss  General Link

Material Type  
 RC/SRC(encased)  Steel/SRC(filled)

Wall Type  
 Membrane  Plate

Definition  
 Moment - Rotation (M-Theta)  Moment - Curvature (M-Phi Distributed)

Reference Location for Calc. of Strength  
Beam :  I-End  Center  J-End

Hinge Type  
 Skeleton  Fiber

Section Name :

Interaction Type  
 None  P-M in Strength Calculation  P-M-M in Status Determination

Component Properties

Component	Hysteresis Model
<input type="checkbox"/> Fx	<input type="text" value="Kinematic Hardening"/> <input type="button" value="Properties..."/>
<input checked="" type="checkbox"/> Fy	<input type="text" value="SLIP Bilinear"/> <input type="button" value="Properties..."/>
<input type="checkbox"/> Fz	<input type="text" value="Kinematic Hardening"/> <input type="button" value="Properties..."/>
<input type="checkbox"/> Mx	<input type="text" value="Kinematic Hardening"/> <input type="button" value="Properties..."/>
<input type="checkbox"/> My	<input type="text" value="Kinematic Hardening"/> <input type="button" value="Properties..."/>
<input type="checkbox"/> Mz	<input type="text" value="Kinematic Hardening"/> <input type="button" value="Properties..."/>

Fiber Name :



# Isolamento con dissipatori a scorrimento

## MODELLAZIONE DISSIPATORE - Elemento «fusibile»

Directional Hinge Properties : SLIP Bilinear



Input Method  
 User Input  Auto-Calculation

Input Type  
 Strength - Stiffness Reduction Ratio  
 Strength - Yield Displacement

Properties |  
Type  
 Symmetric  Asymmetric

Yield Strength

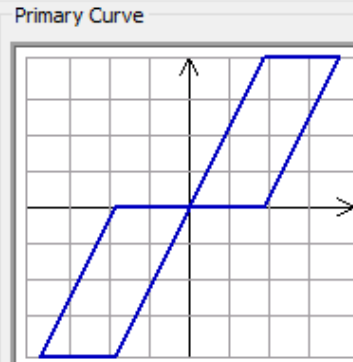
	(+)	(-)	
P1	30	30	kN
P2	30	30	kN

Yield Displacement

	(+)	(-)	
D1	0.005	0.005	m
D2	0.075	0.075	m

Initial Gap

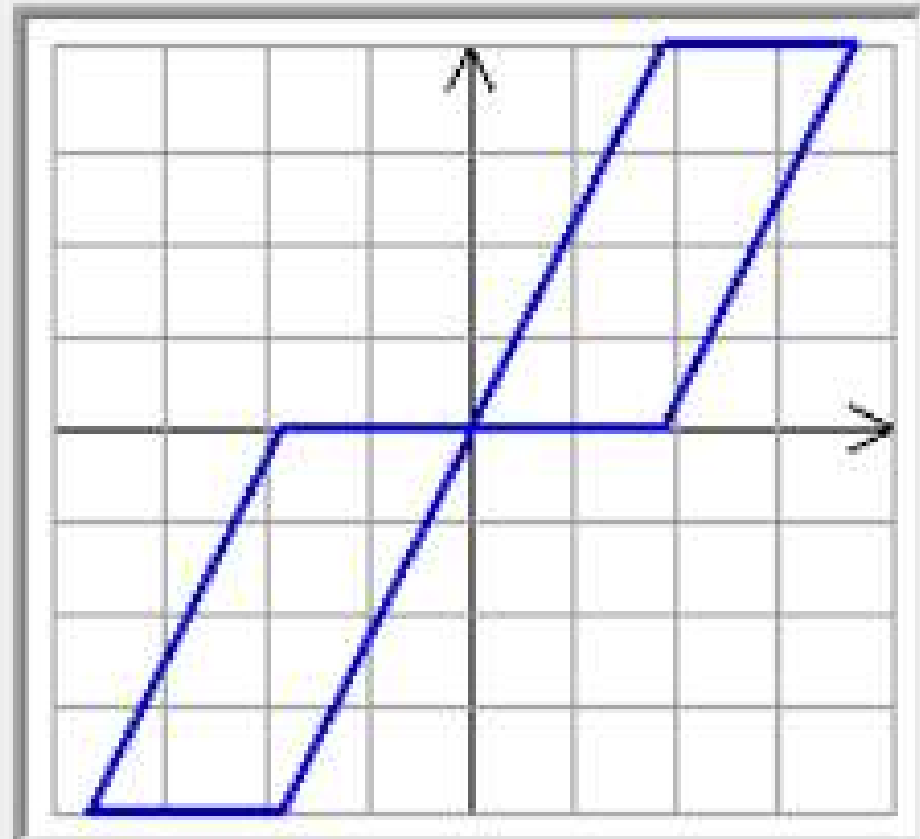
(t)	(c)	
0	0	m



Deformation Indexes

Initial Stiffness  
  $6EI/L$    $3EI/L$    $2EI/L$   
 User  kN/m  
 Elastic Stiffness  
 Skeleton Curve

### Primary Curve



# Isolamento con dissipatori a scorrimento

## MODELLAZIONE DISSIPATORE – ANALISI DINAMICA NON LINEARE

### Parametri per analisi TH

Per l'i-esimo accelerogramma spettro compatibile:

1. la TH agisce a partire dal caricamento verticale (PP)

2. il damping è auto-calcolato con il metodo Rayleigh

3. la TH è del tipo DIRECT

Add/Modify Time History Load Cases

General

Name : TH Description :

Analysis Type  
 Linear  
 Nonlinear

Analysis Method  
 Modal  
 Direct Integration  
 Static

Time History Type  
 Transient  
 Periodic

Geometric Nonlinearity Type  
 None  
 Large Displacements

End Time : 20 sec Time Increment : 0.01 sec  
Step Number Increment for Output : 1

Order in Sequential Loading

Subsequent to  Load Case ST : PP  
 Initial Element Forces(Table)  
 Initial Forces for Geometric Stiffness

Cumulate D/V/A Results  Keep Final Step Loads Constant

Damping

Damping Method : Mass & Stiffness Proportional

Mass and Stiffness Coefficients

Damping Type :  Mass Proportional  Stiffness Proportional

Direct Specification : 0 0  
 Calculate from Modal Damping : 0.08432695926 0.00418828804

Coefficients Calculation

	Mode 1	Mode 2
<input checked="" type="radio"/> Frequency [Hz] :	0.5	1.02
<input type="radio"/> Period [sec] :	0	0
Damping Ratio :	0.02	0.02

# Isolamento con dissipatori a scorrimento

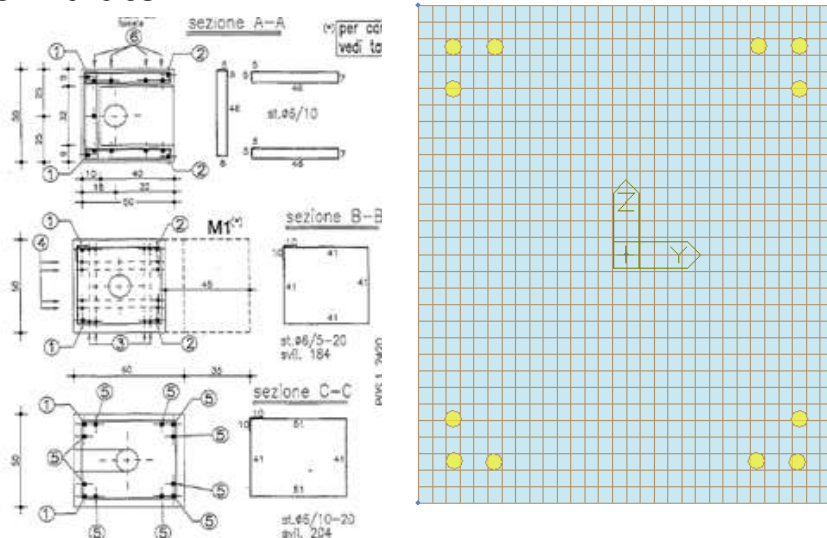
## MODELLAZIONE DISSIPATORE – ANALISI DINAMICA NON LINEARE

Per completare il modello, è opportuno definire anche un comportamento non lineare per le colonne in CA.

Si può adottare:

- modello a fibre
- modello del tipo «legge scheletro»

Si tiene conto ovviamente delle armature presenti effettivamente nelle colonne o si ipotizza la loro presenza con il cd progetto simulato



Add/Modify Inelastic Hinge Properties

Name : 50x60

Description :

Element Type:  Beam-Column  Wall (CRB)  Truss  General Link

Material Type:  RC/SRC(encased)  Steel/SRC(filled)

Wall Type:  Membrane  Plate

Definition:  Moment - Rotation(M-Theta)  Moment - Curvature (M-Phi Distributed)

Hinge Type:  Skeleton  Fiber

Reference Location for Calc. of Strength: Beam :  I-End  Center  J-End

Section: 1 : gronde

Interaction Type:  None  P-M in Strength Calculation  P-M-M in Status Determination

Component	No. of Sections	Hysteresis Model	Properties...
<input checked="" type="checkbox"/> Fx	2	Kinematic Hardening	Properties...
<input type="checkbox"/> Fy	3	Kinematic Hardening	Properties...
<input type="checkbox"/> Fz	3	Kinematic Hardening	Properties...
<input type="checkbox"/> Mx	3	Kinematic Hardening	Properties...
<input checked="" type="checkbox"/> My	2	Kinematic Hardening	Properties...
<input checked="" type="checkbox"/> Mz	2	Kinematic Hardening	Properties...

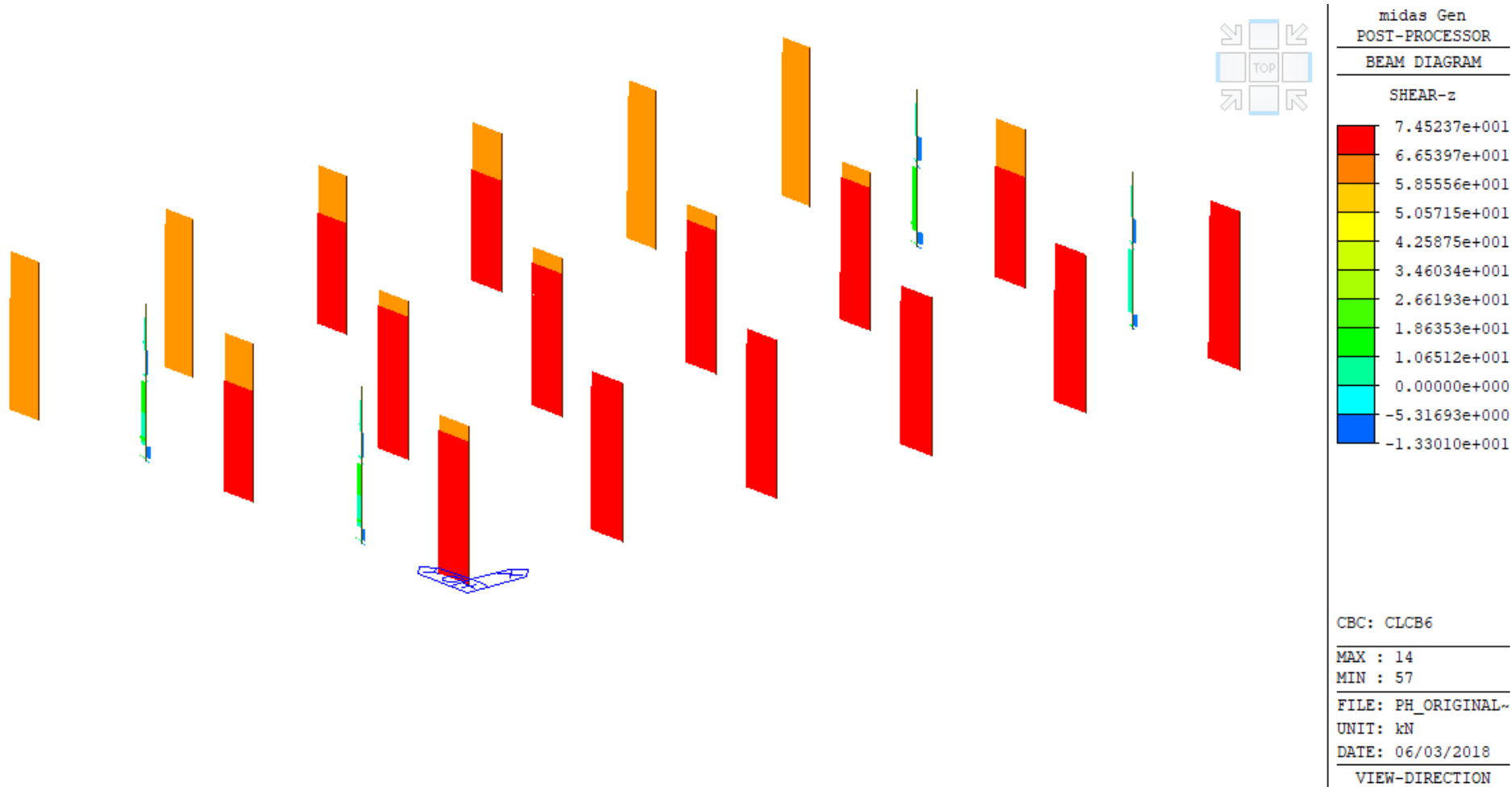
Yield Surface Properties... Fiber Name : fibre50x60

OK Cancel Apply

# Isolamento con dissipatori a scorrimento

## Diagramma Fz colonne

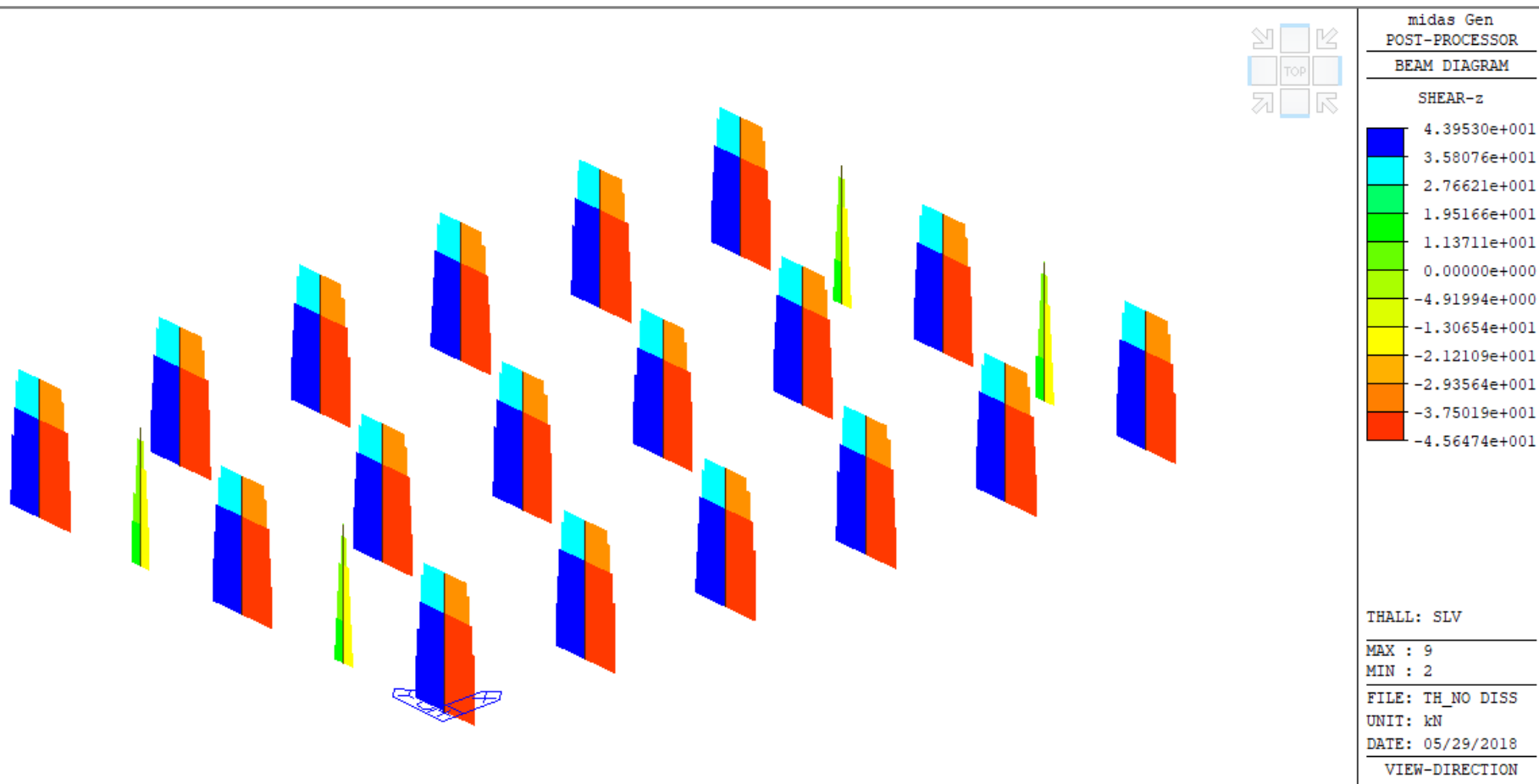
- **Diagramma Fz colonne** nel modello senza e con DISSIPATORI.
- Il modello evidenzia azioni sulle colonne che rispettano i valori limite (30 kN) in testa alla colonna fissati per il dissipatore.



# Isolamento con dissipatori a scorrimento

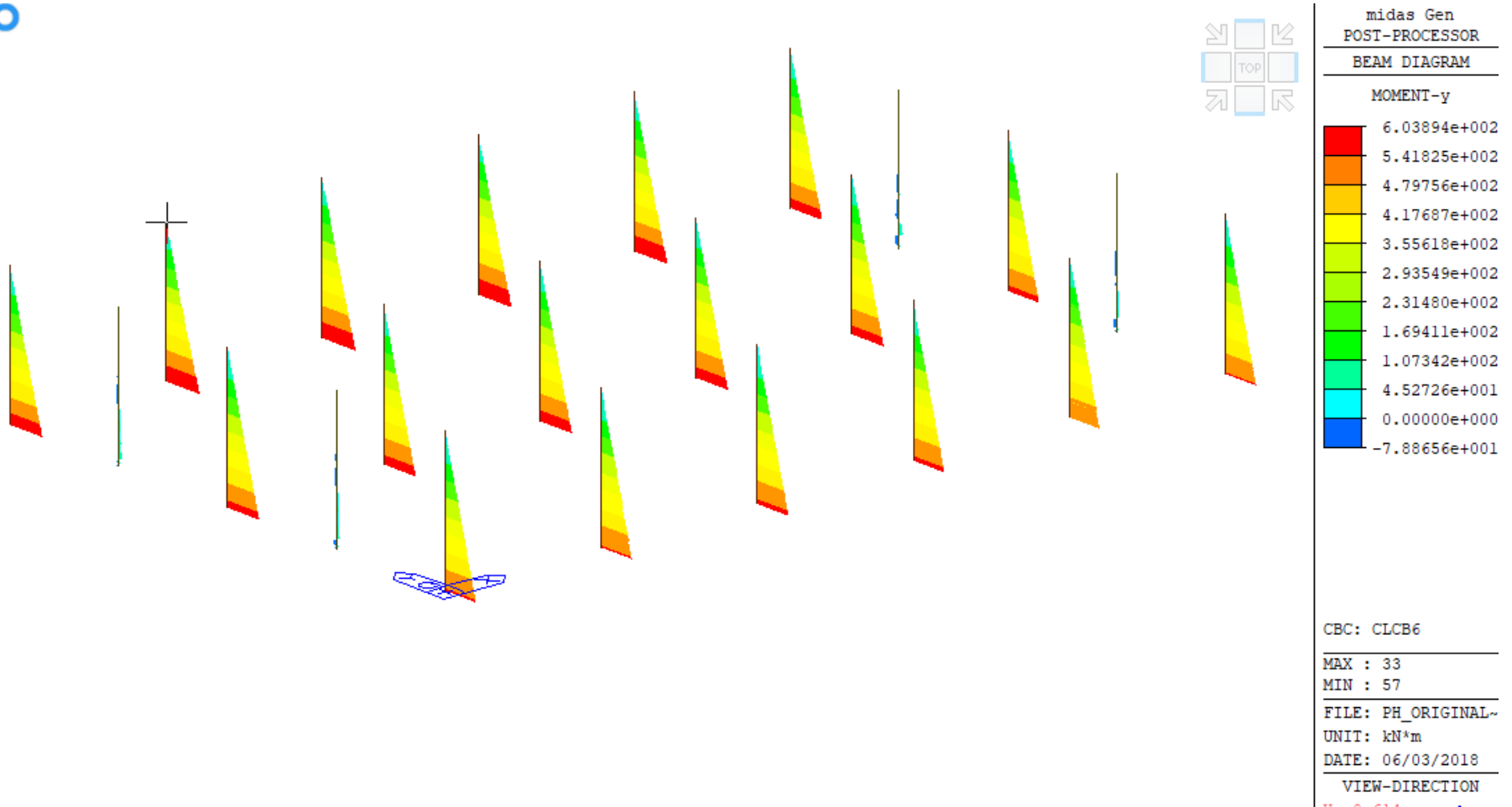
## Diagramma Fz colonne

- **Diagramma Fz colonne** nel modello senza e con DISSIPATORI.
- Il modello evidenzia azioni sulle colonne che rispettano i valori limite (30 kN) in testa alla colonna fissati per il dissipatore.



# Isolamento con dissipatori a scorrimento

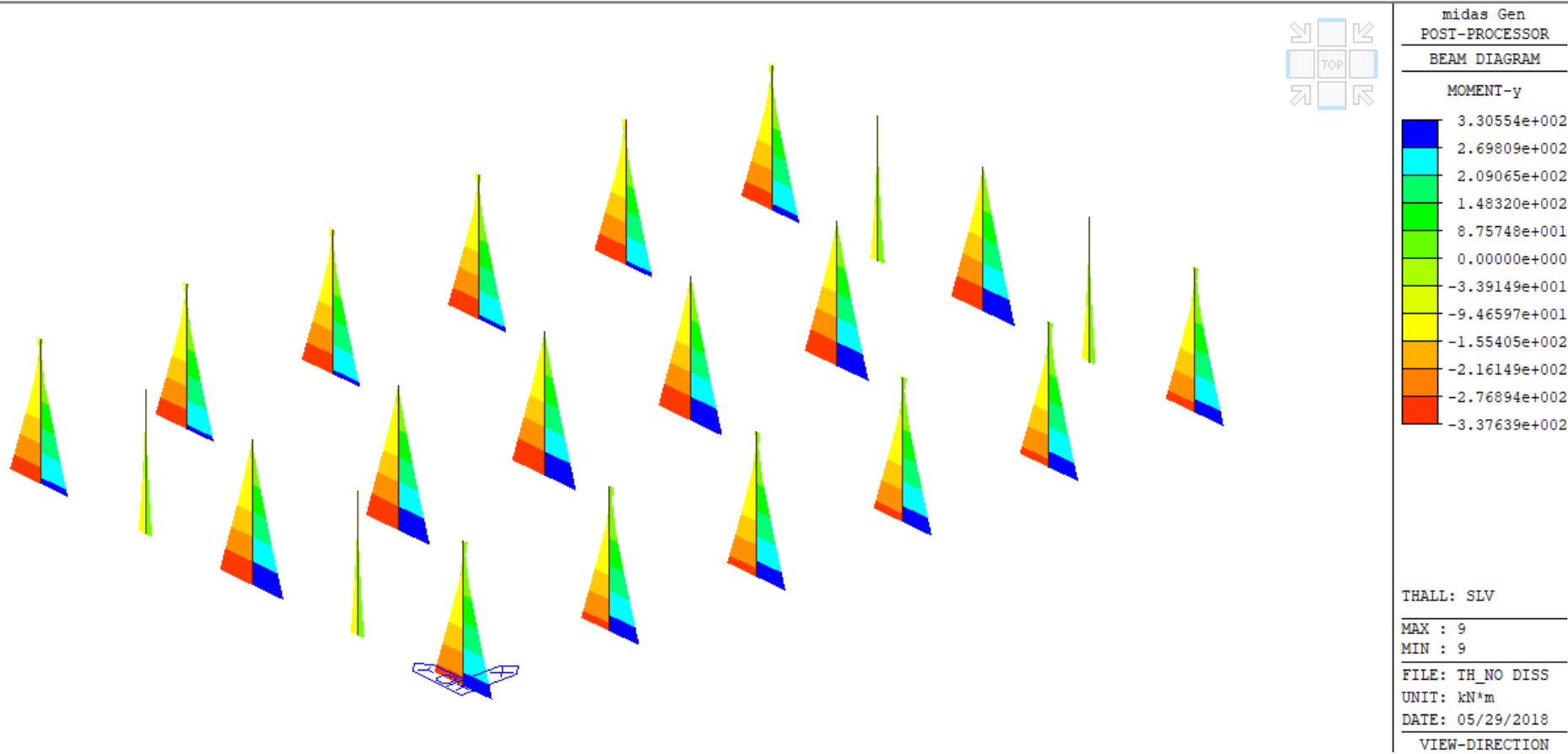
## Diagramma My colonne senza e con dissipatori





# Isolamento con dissipatori a scorrimento

## Diagramma My colonne senza e con dissipatori



# Isolamento con dissipatori a scorrimento

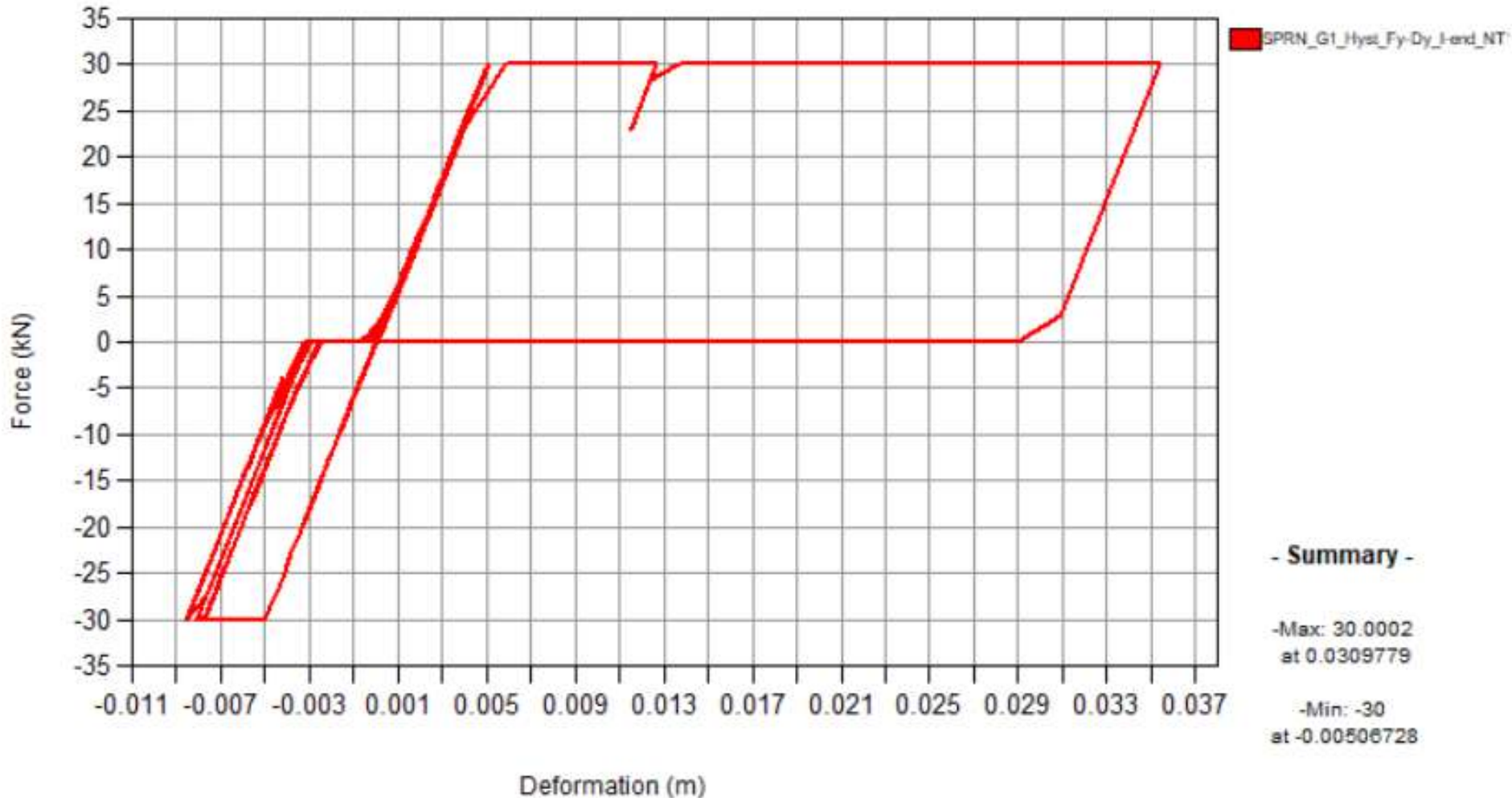
## Verifica in rotazione e taglio

Elem	Location	Seismic El	Load	Verify Ductile Mechanism						Verify Brittle Mechanism							
				My			Mz			Fy			Fz				
				Demand	Capacity	Remark	Demand	Capacity	Remark	Demand	Capacity	Remark	Demand	Capacity	Remark		
Step for Demand = SLV (Step 9), Confidence factor = 1.00																	
Press right mouse button and click 'Set Safety Parameters' menu to change step or loadcase																	
				PUH	TH								PUH	TH			
1	I-end	Primary	massa_y	0.0045	0.000127	0.0204	OK	0	0.0217	OK	0.0291	187.076	OK	43.912	43.26	183.398	OK
2	I-end	Primary	massa_y	0.0047	0.000125	0.0202	OK	0	0.0215	OK	0.0306	204.76	OK	46.2294	43.5	201.374	OK
3	I-end	Primary	massa_y	0.0047	0.000125	0.0202	OK	0	0.0215	OK	0.0308	204.76	OK	46.2294	43.52	201.374	OK
4	I-end	Primary	massa_y	0.0052	0.000125	0.0202	OK	0	0.0215	OK	0.0312	204.944	OK	55.4993	43.47	201.561	OK
5	I-end	Primary	massa_y	0.0051	0.000128	0.0204	OK	0	0.0217	OK	0.0324	187.058	OK	51.9011	43.43	183.38	OK
7	I-end	Primary	massa_y	0.006	0.000147	0.0199	OK	0	0.0212	OK	0.0056	221.782	OK	60.2331	43.75	218.676	OK
8	I-end	Primary	massa_y	0.0059	0.000147	0.0193	OK	0	0.0206	OK	0.0001	261.583	OK	56.4972	43.89	259.134	OK
9	I-end	Primary	massa_y	0.0059	0.000147	0.0193	OK	0	0.0206	OK	0.0001	261.752	OK	56.489	43.95	259.306	OK
10	I-end	Primary	massa_y	0.0059	0.000147	0.0193	OK	0	0.0206	OK	0.0001	261.752	OK	56.4809	43.95	259.306	OK
11	I-end	Primary	massa_y	0.0059	0.000147	0.0193	OK	0	0.0206	OK	0.0001	261.583	OK	56.4727	43.85	259.133	OK
12	I-end	Primary	massa_y	0.0059	0.000146	0.0199	OK	0	0.0212	OK	0.0052	221.583	OK	56.2042	43.67	218.475	OK
13	I-end	Primary	massa_y	0.0046	0.000135	0.0204	OK	0	0.0217	OK	0.0324	187.712	OK	43.912	43.34	184.045	OK
14	I-end	Primary	massa_y	0.0052	0.000138	0.0202	OK	0	0.0215	OK	0.0312	204.944	OK	53.1818	43.53	201.561	OK
15	I-end	Primary	massa_y	0.0049	0.000138	0.0202	OK	0	0.0215	OK	0.0308	204.76	OK	46.2294	43.59	201.374	OK
16	I-end	Primary	massa_y	0.0049	0.000138	0.0202	OK	0	0.0215	OK	0.0306	204.76	OK	46.2294	43.59	201.374	OK
18	I-end	Primary	massa_y	0.0052	0.000135	0.0204	OK	0	0.0217	OK	0.029	187.058	OK	51.9011	43.44	183.381	OK
33	I-end	Primary	massa_y	0.005	0.000125	0.0202	OK	0	0.0215	OK	0.0302	204.942	OK	53.1818	43.43	201.559	OK
39	I-end	Primary	massa_y	0.0054	0.000138	0.0202	OK	0	0.0215	OK	0.0302	204.944	OK	55.4993	43.57	201.561	OK

# Isolamento con dissipatori a scorrimento

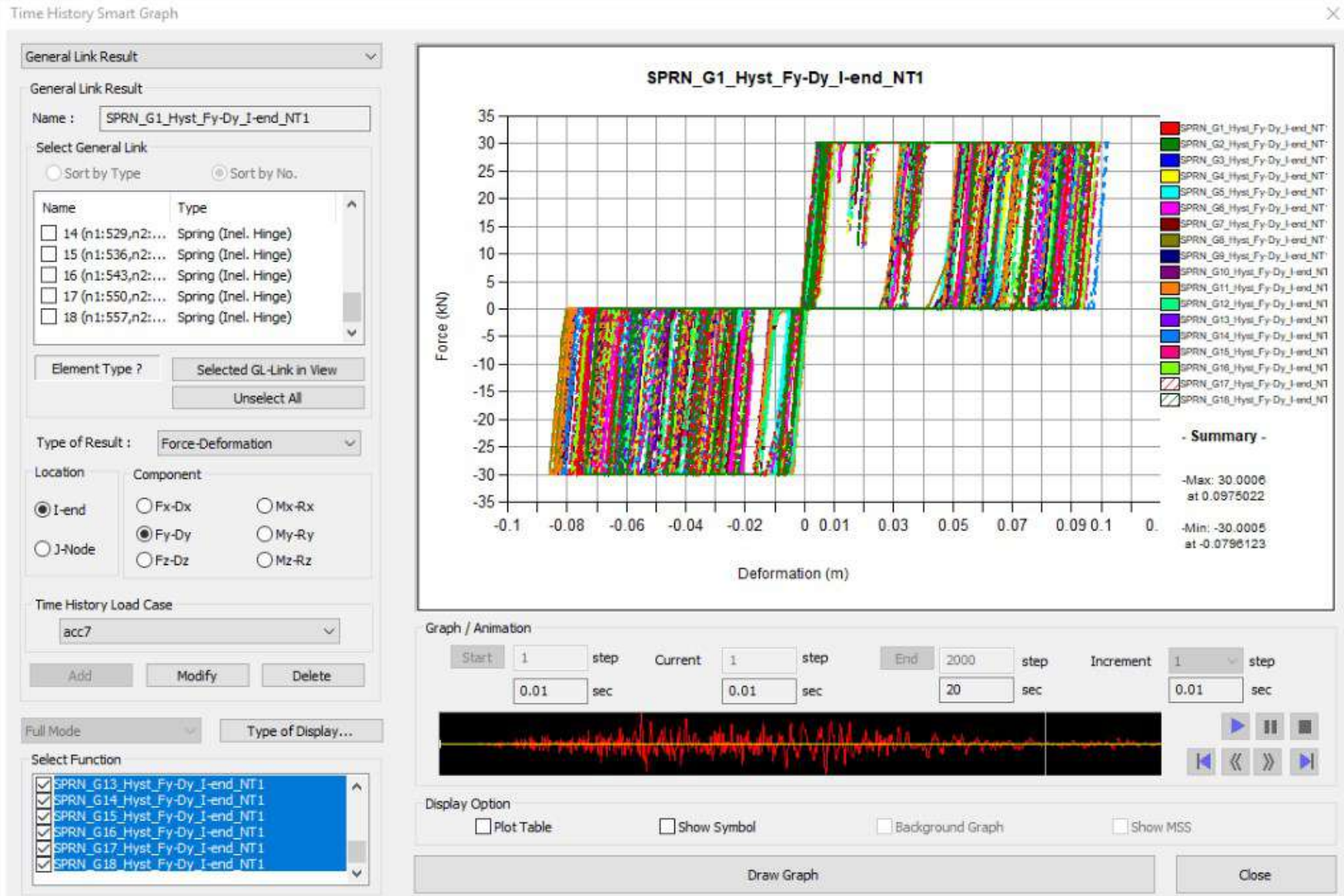
## Analisi Dinamica Non lineare – Isteresi GL

SPRN\_G1\_Hyst\_Fy-Dy\_I-end\_NT1



# Isolamento con dissipatori a scorrimento

## Analisi Dinamica Non lineare – Isteresi GL

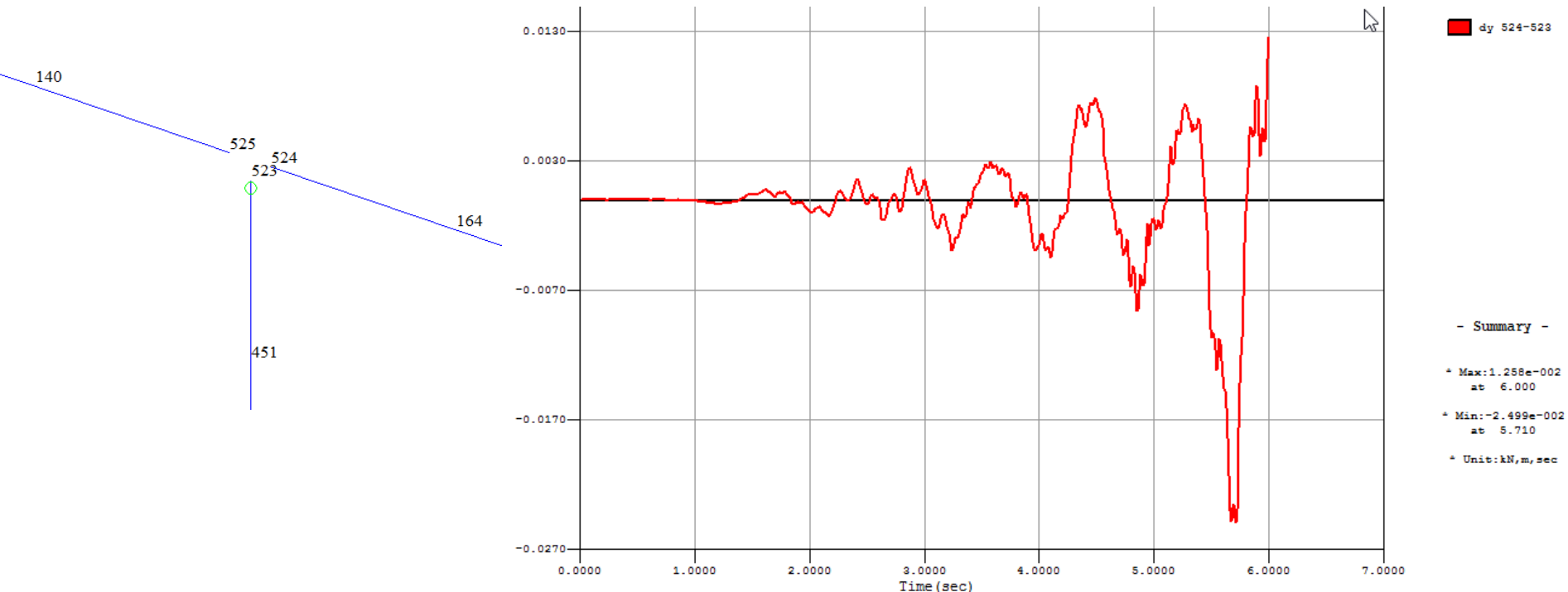


# Isolamento con dissipatori a scorrimento

## Analisi Dinamica Non lineare

Dettaglio colonna centrale. Si verifica lo spostamento relativo nodo colonna nodo fusibile. Lo spostamento max NON deve superare:

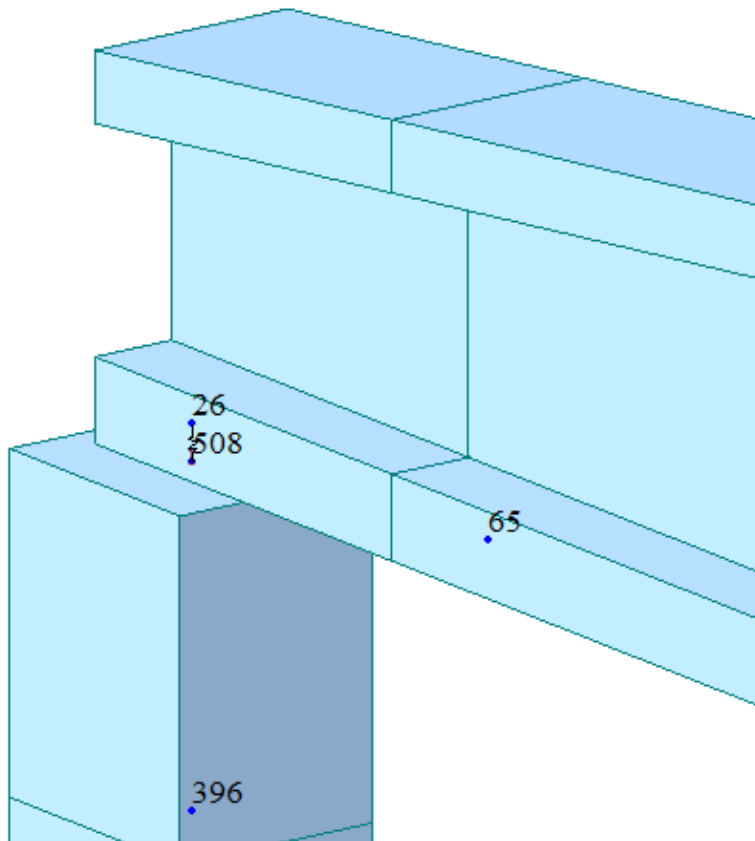
1. la domanda in spostamento
2. la distanza utile di scorrimento.



# Isolamento con dissipatori a scorrimento

## Analisi Dinamica Non lineare

Dettaglio nodo trave colonna di bordo:  
si verifica lo spostamento relativo nodo colonna nodo fusibile.



Time History Result Function

Displ/Vel/Accel

Name: 26-508

Node Number: 26

Type of Result

Displ.  Vel.  Accel.

Reference Point

Ground

Add Ground Motion

Another Node 508

Components: DY

Time History Load Case

TH

Included Mode Number

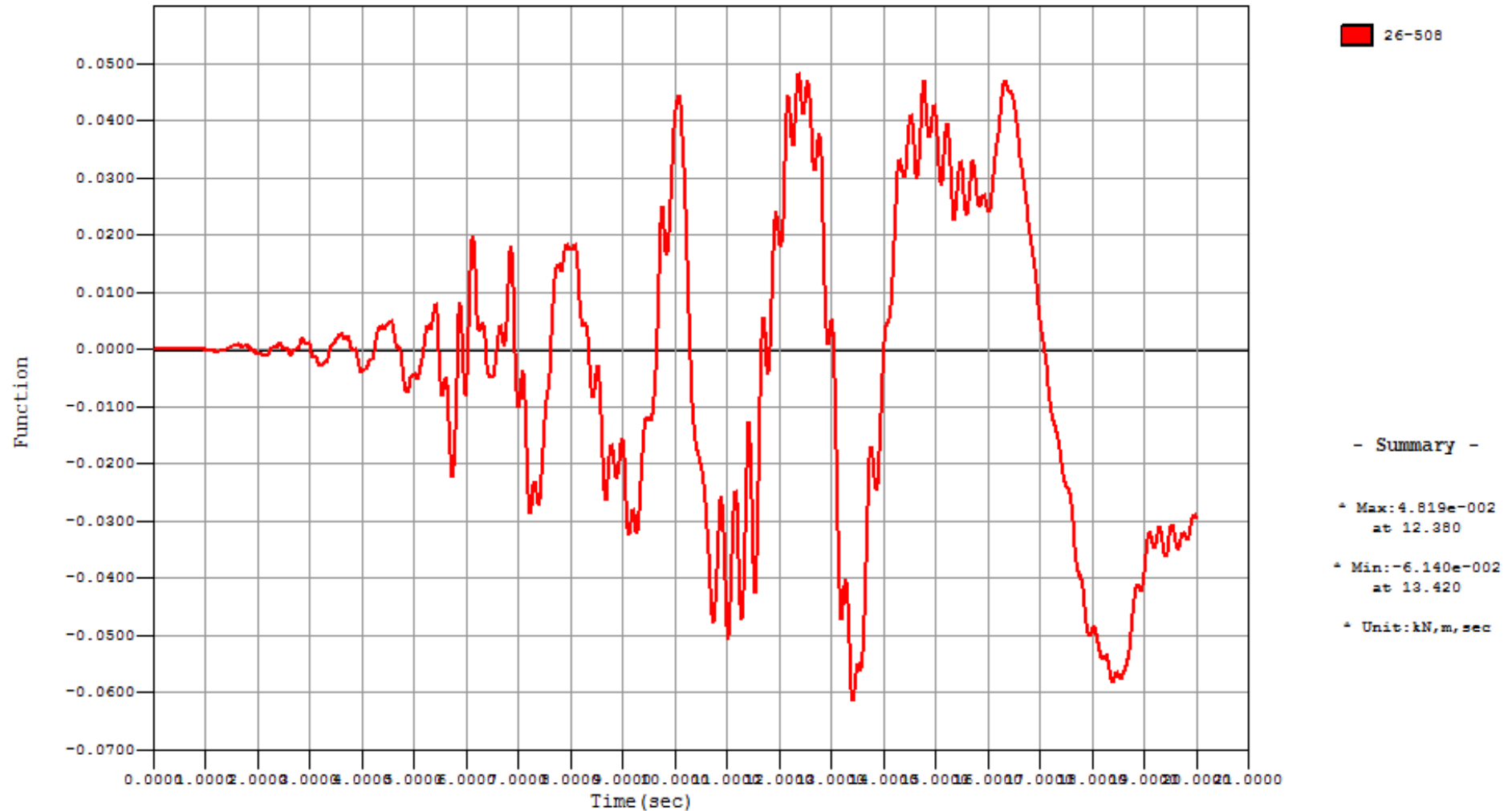
All  One Mode 1

OK Cancel Apply



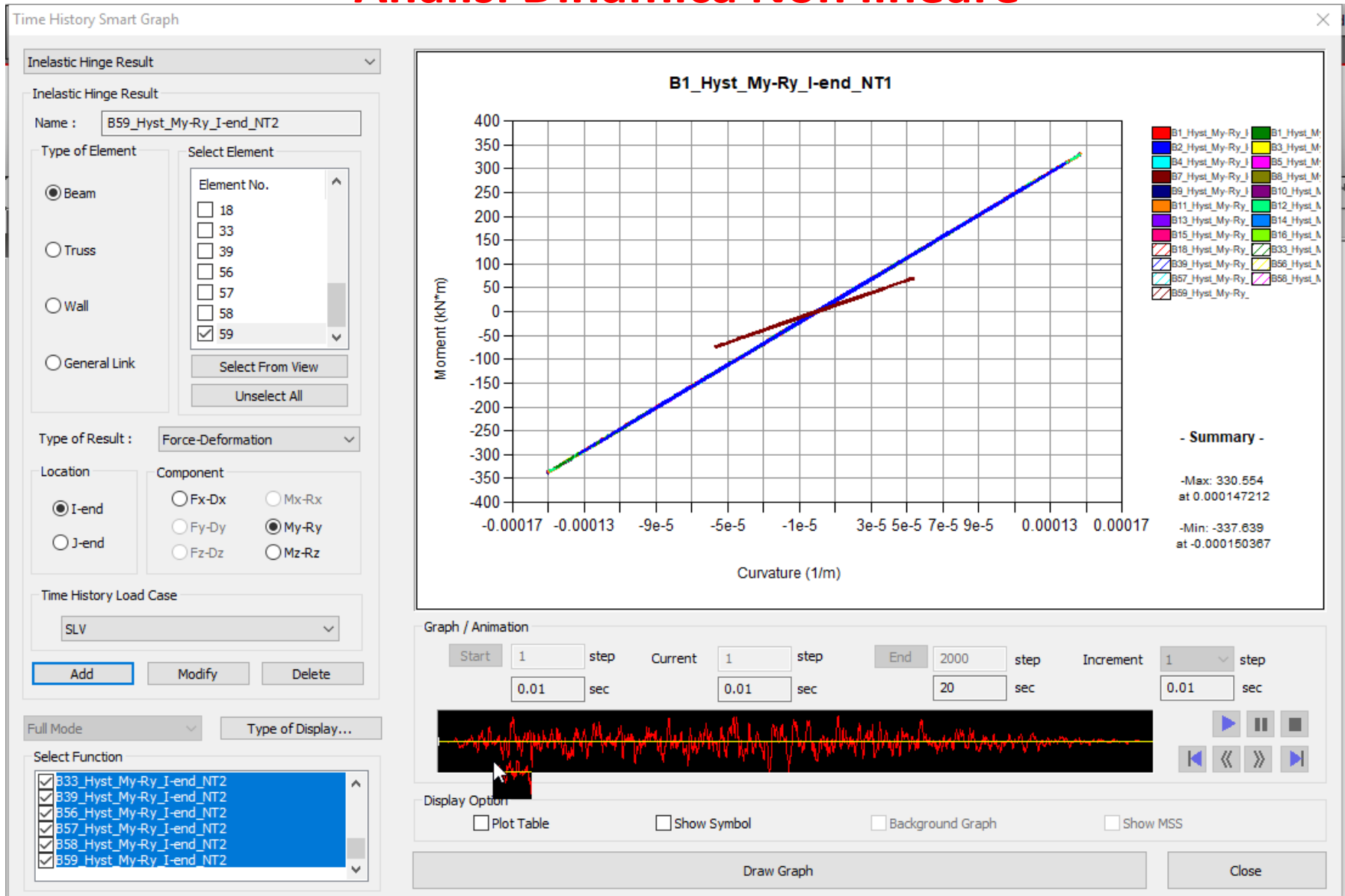
# Isolamento con dissipatori a scorrimento

## Analisi Dinamica Non lineare



# Isolamento con dissipatori a scorrimento

## Analisi Dinamica Non lineare



## **Esempio 3**

# **Isolamento sotto la platea fondale di un ospedale esistente**

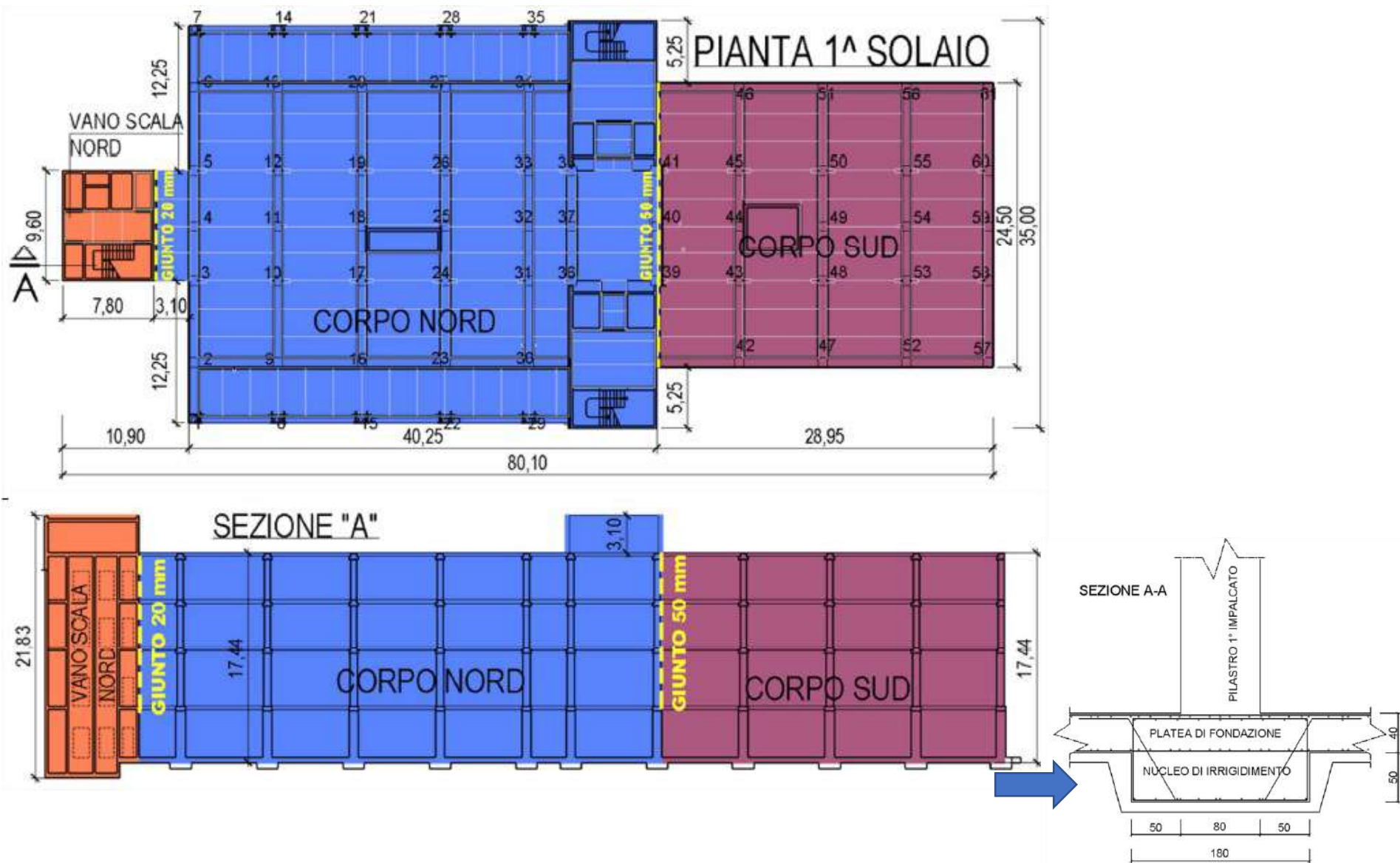
# Isolamento all'intradosso della platea fondale di un ospedale

## Analisi stato di fatto - Le ragioni della scelta



# Isolamento all'intradosso della platea fondale di un ospedale

## Analisi stato di fatto - Le ragioni della scelta



# Isolamento all'intradosso della platea fondale di un ospedale

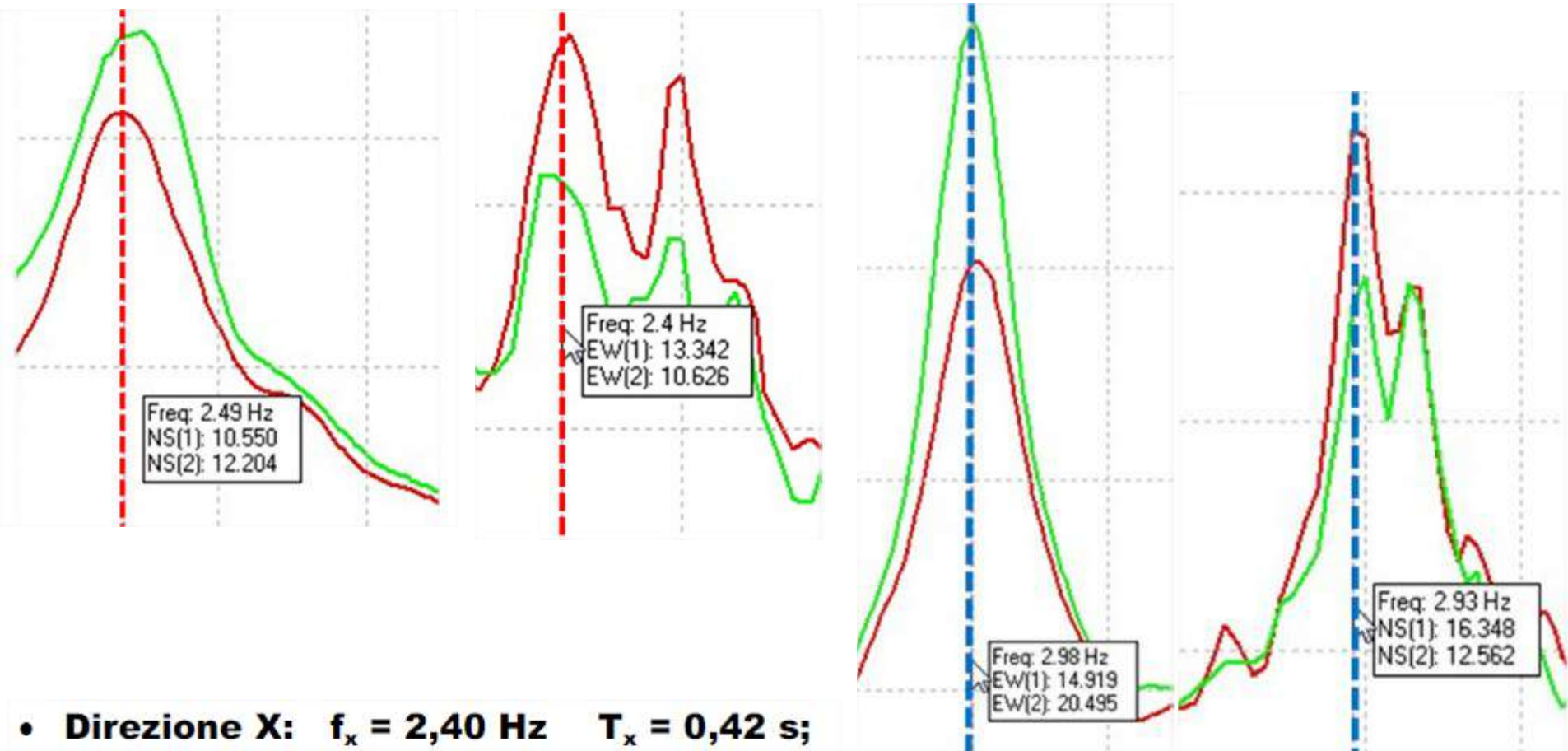
## Analisi stato di fatto – Caratterizzazione Dinamica





# Isolamento all'intradosso della platea fondale di un ospedale

## Analisi stato di fatto – Caratterizzazione Dinamica

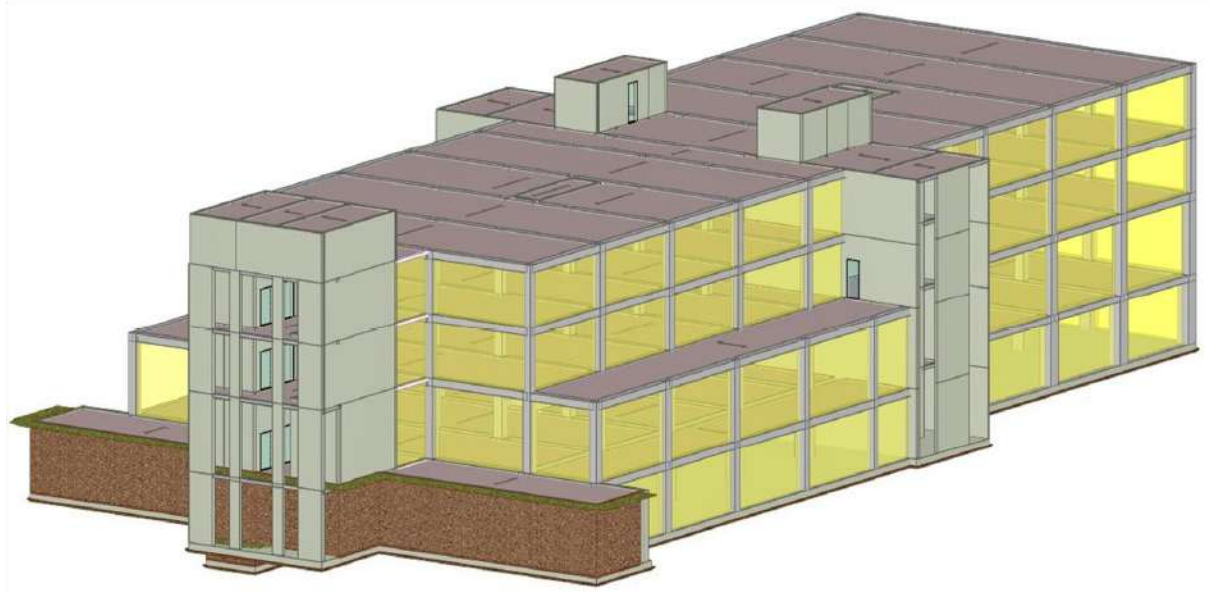
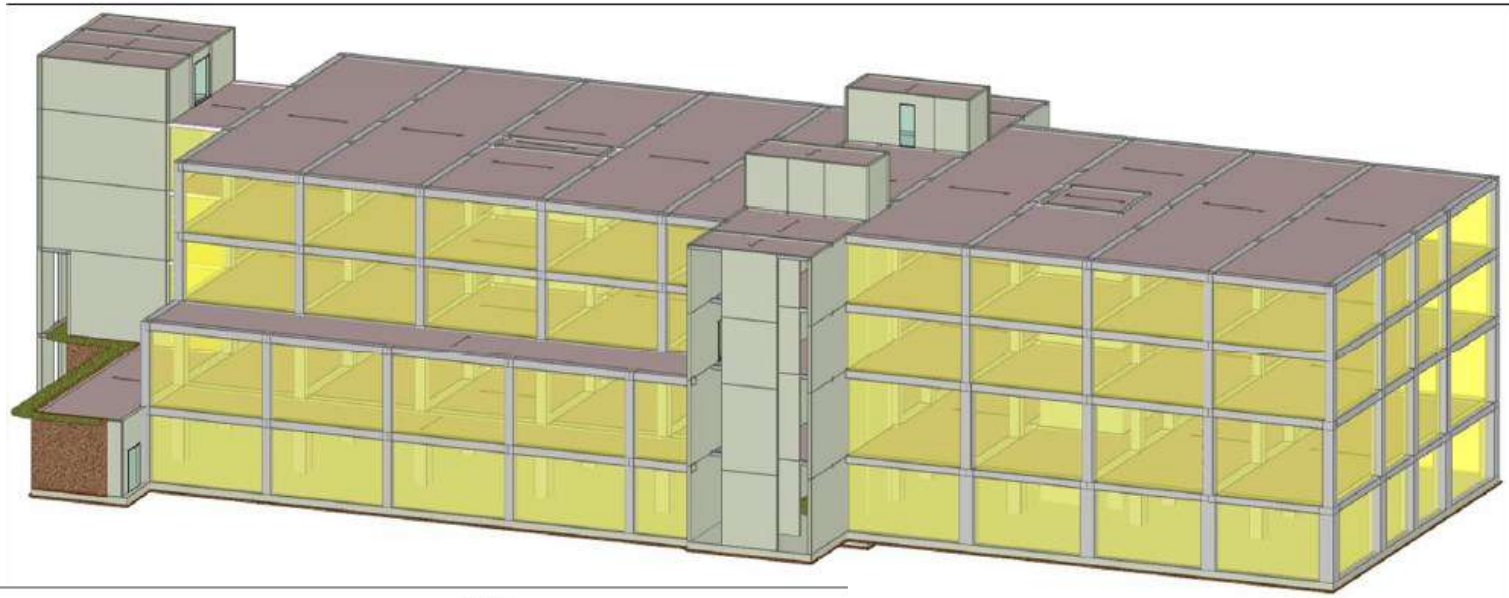


• **Direzione X:**  $f_x = 2,40$  Hz     $T_x = 0,42$  s;

• **Direzione Y:**  $f_y = 2,93$  Hz     $T_y = 0,34$  s.

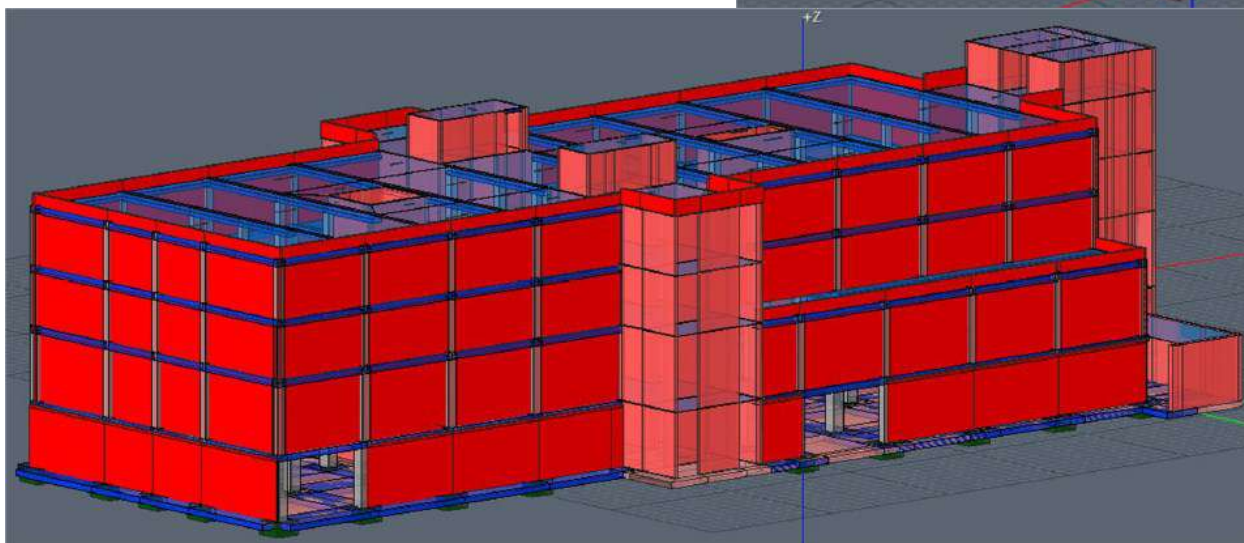
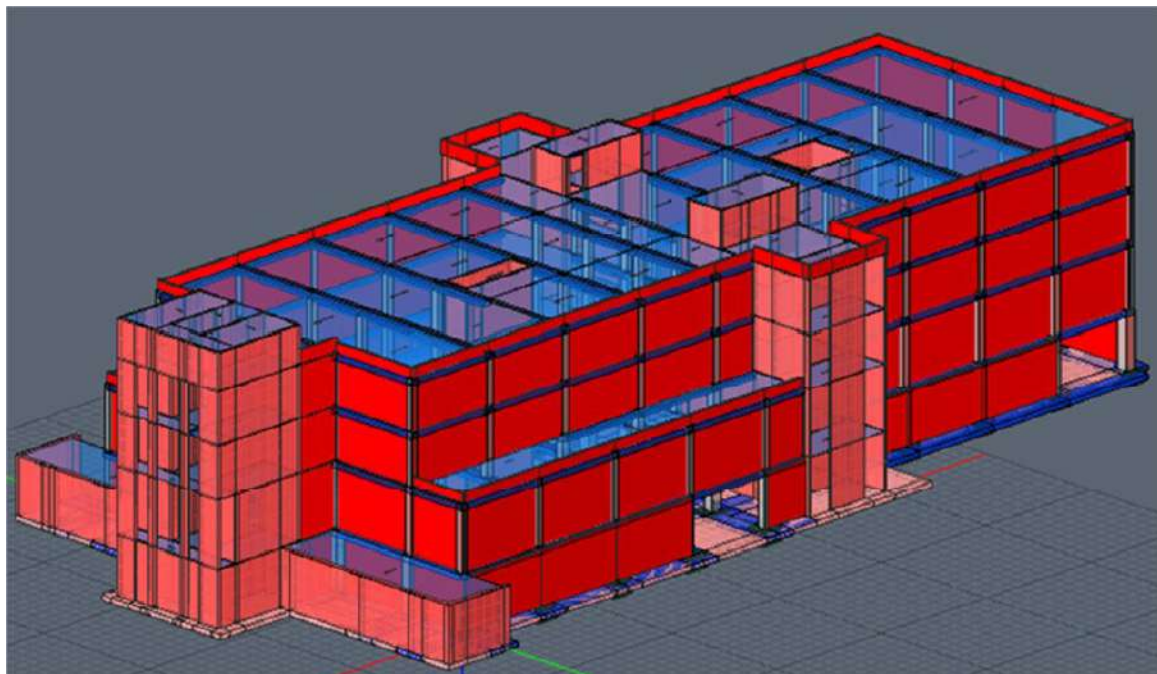
# Isolamento all'intradosso della platea fondale di un ospedale

## Analisi stato di fatto – Modellazione FEM 1



# Isolamento all'intradosso della platea fondale di un ospedale

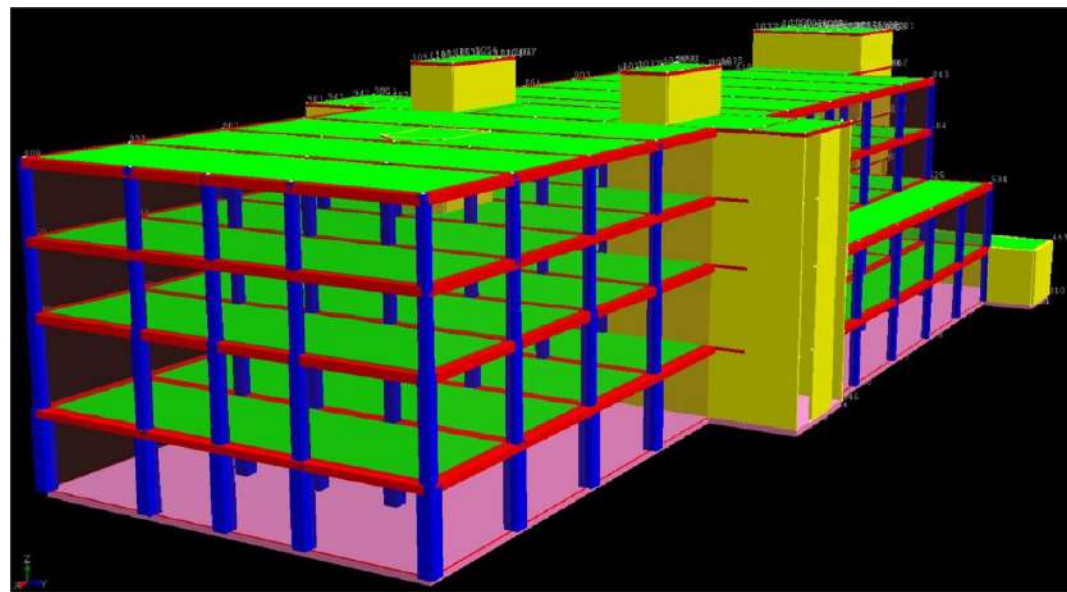
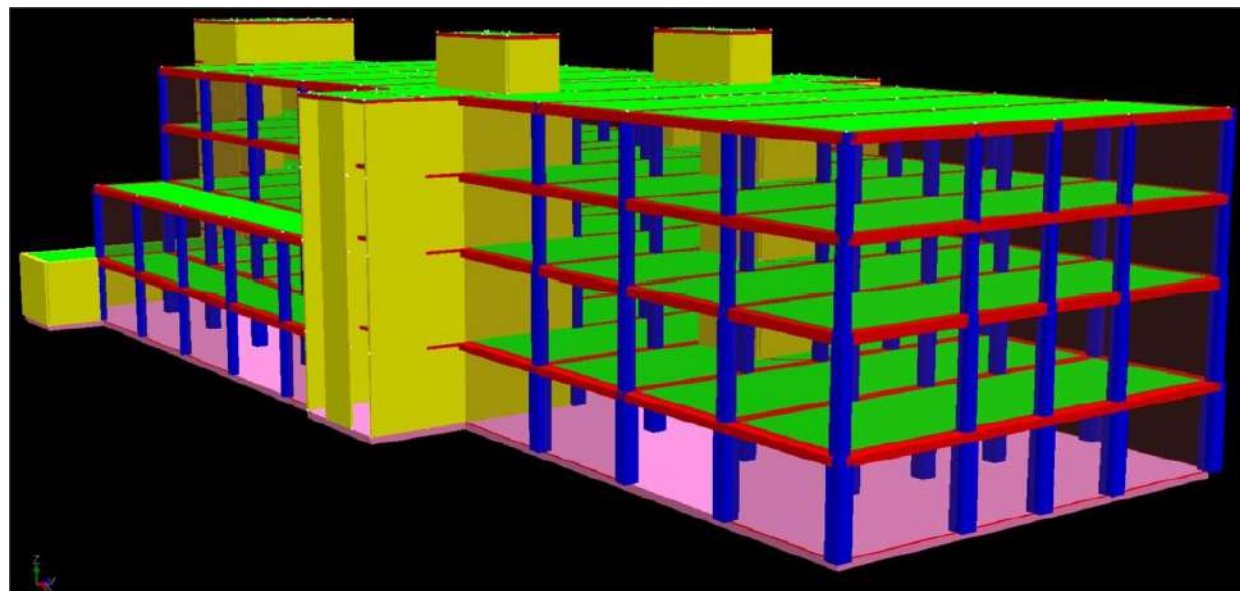
## Analisi stato di fatto – Modellazione FEM 2





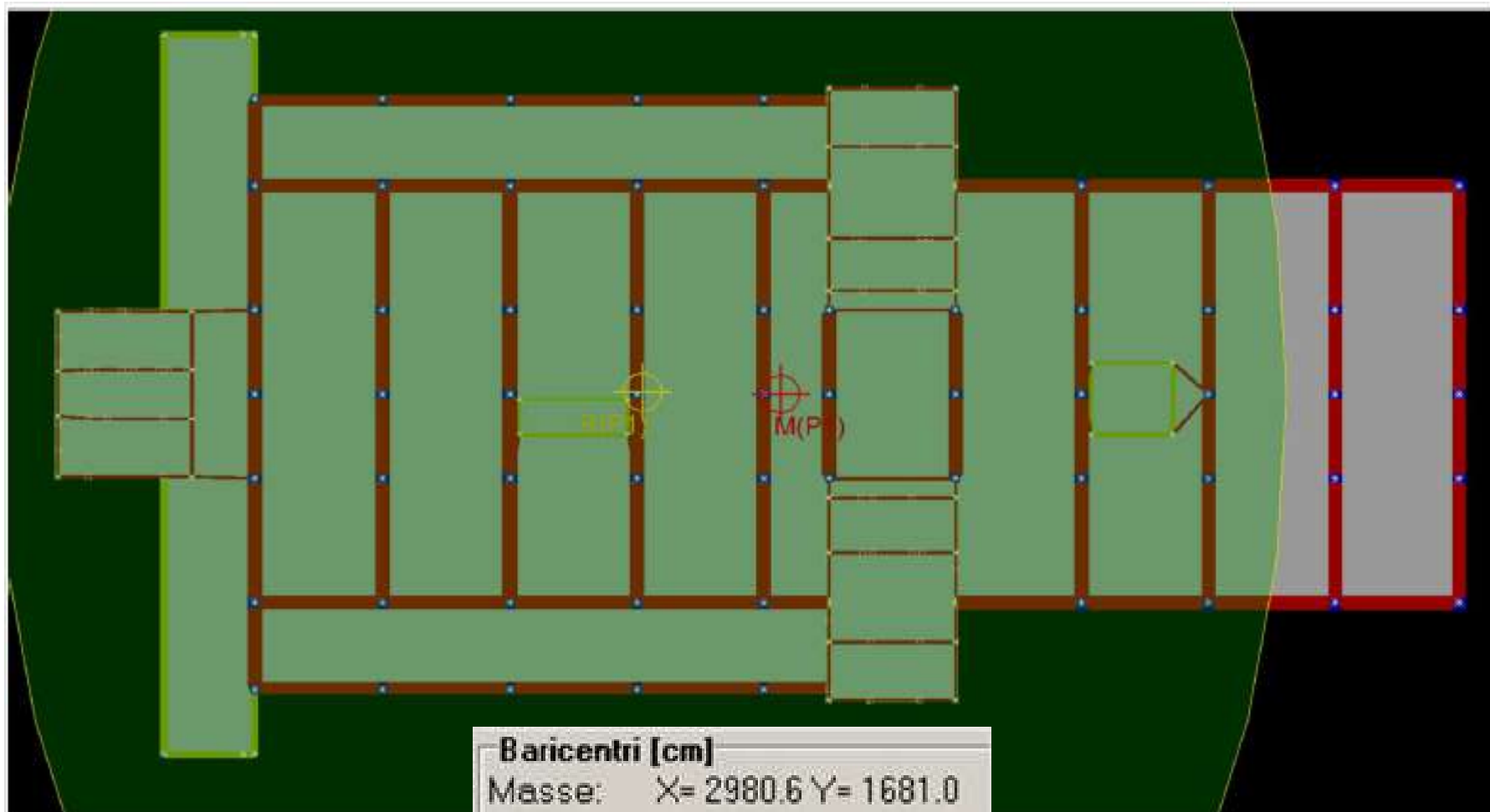
# Isolamento all'intradosso della platea fondale di un ospedale

## Analisi stato di fatto – Modellazione FEM 3



# Isolamento all'intradosso della platea fondale di un ospedale

## Analisi stato di fatto – Baricentri di Massa e Rigidezza



Baricentri [cm]	
Masse:	X= 2980.6 Y= 1681.0
Rigidezze:	X= 2195.4 Y= 1691.1
Delta X=	-785.2 Delta Y= 10.0
Distanza=	785.3

# Isolamento all'intradosso della platea fondale di un ospedale

## Analisi stato di fatto – Confronto Modellazioni FEM

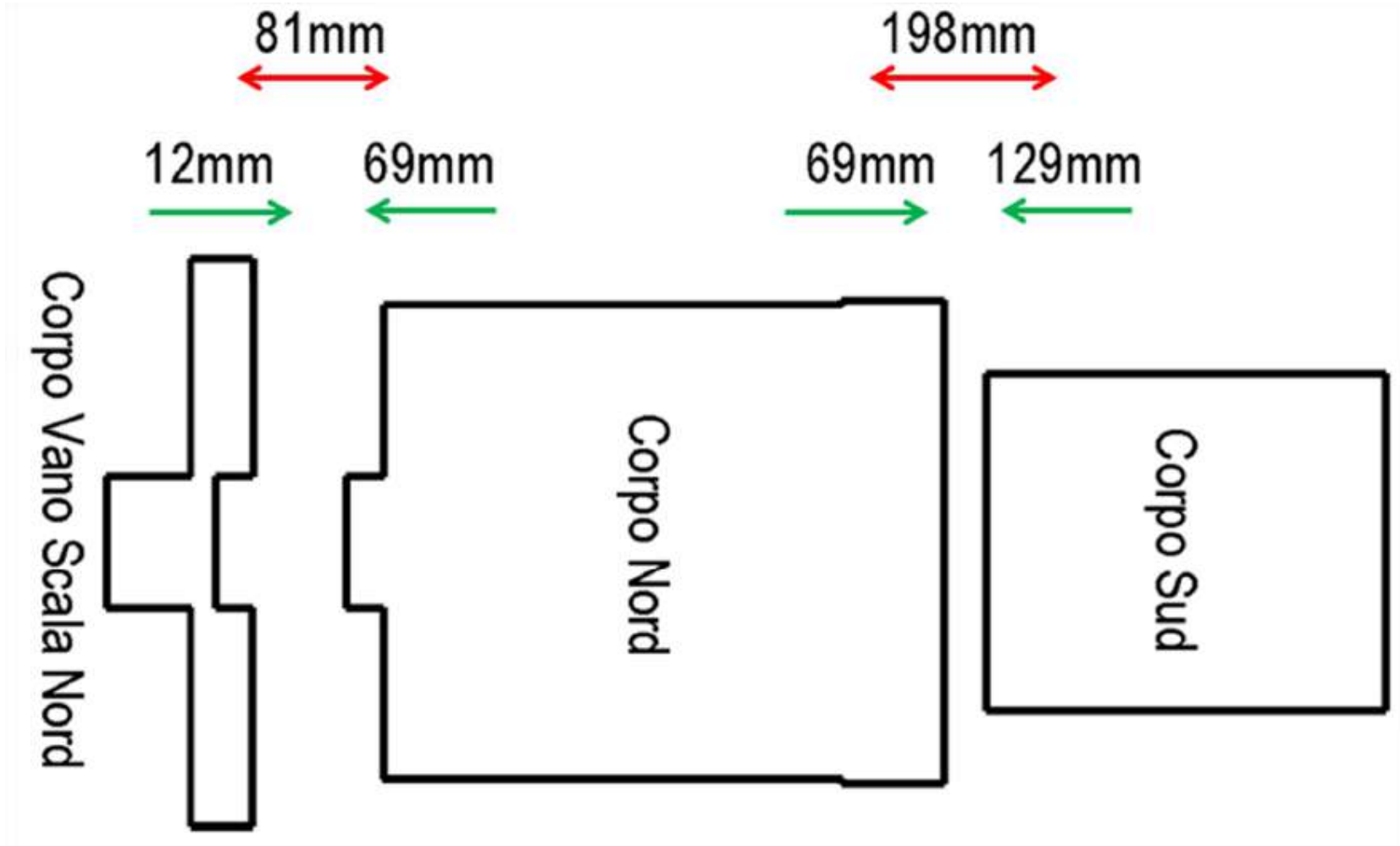
MdV	TRAVI CON VINCOLI ESTREMI DI INCASTRO								
	IPERSPACE MAX 7			FATAE			EDILUS		
	f [Hz]	T [s]	G <sup>14</sup> %	f [Hz]	T [s]	G %	f [Hz]	T [s]	G %
1	2.372	0.422	76.09	2.378	0.421	59.10	2.179	0.459	76.10
2	2.833	0.353	34.75	2.963	0.338	30.00	3.247	0.308	39.00
3	3.690	0.271	37.68	3.880	0.258	25.70	2.625	0.381	33.30

MdV	TRAVI CON VINCOLI ESTREMI DI CERNIERA								
	IPERSPACE MAX 7			FATAE			EDILUS		
	f [Hz]	T [s]	G %	f [Hz]	T [s]	G %	f [Hz]	T [s]	G %
1	2.278	0.439	75.82	2.260	0.442	58.90	2.092	0.478	75.6
2	2.661	0.376	33.80	2.714	0.369	29.60	3.077	0.325	41.6
3	3.521	0.284	38.28	3.728	0.268	25.70	2.421	0.413	30



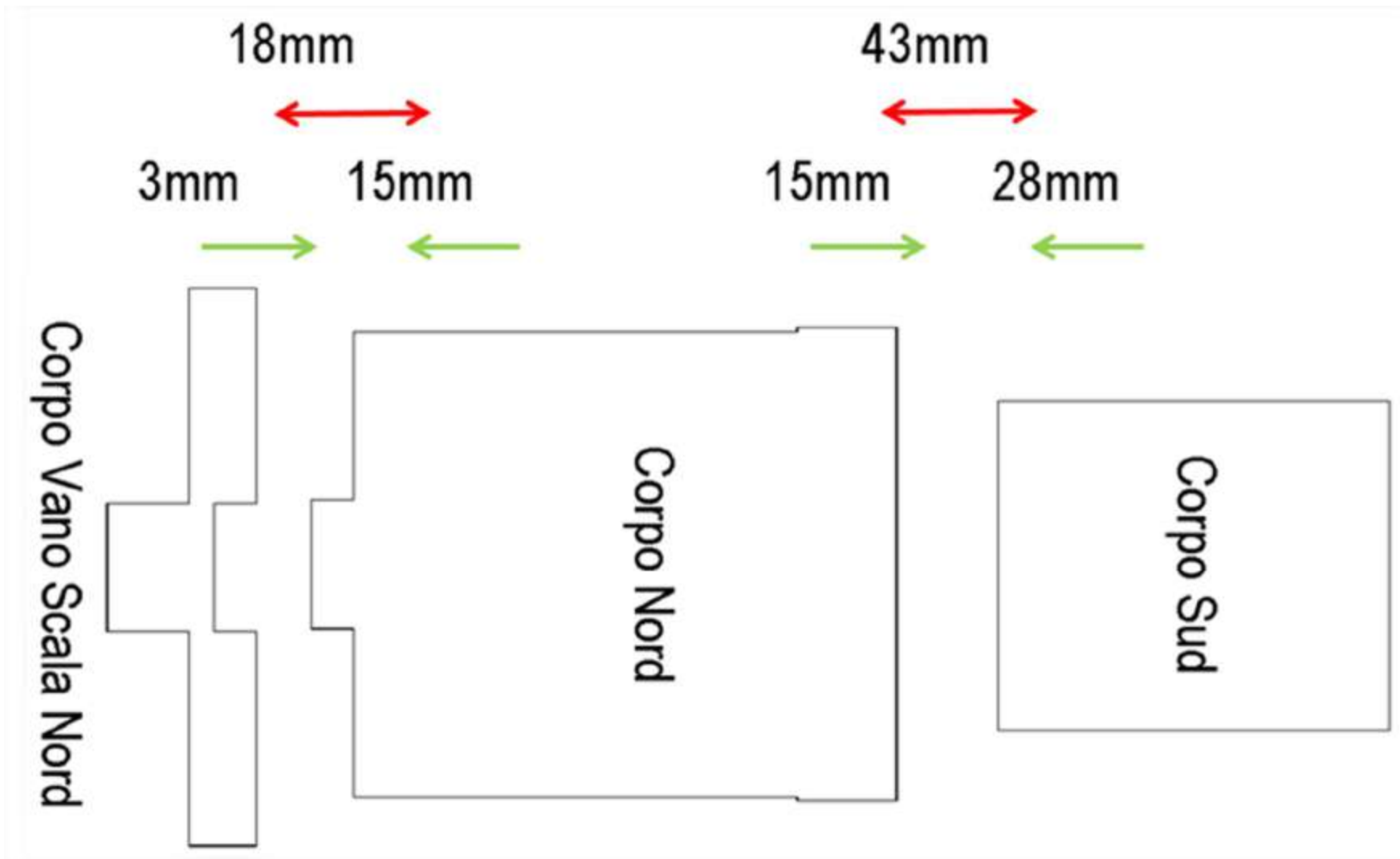
# Isolamento all'intradosso della platea fondale di un ospedale

## Analisi stato di fatto – Il martellamento per $V_n=50$



# Isolamento all'intradosso della platea fondale di un ospedale

## Analisi stato di fatto – Il martellamento per $V_n=2$



# Isolamento all'intradosso della platea fondale di un ospedale

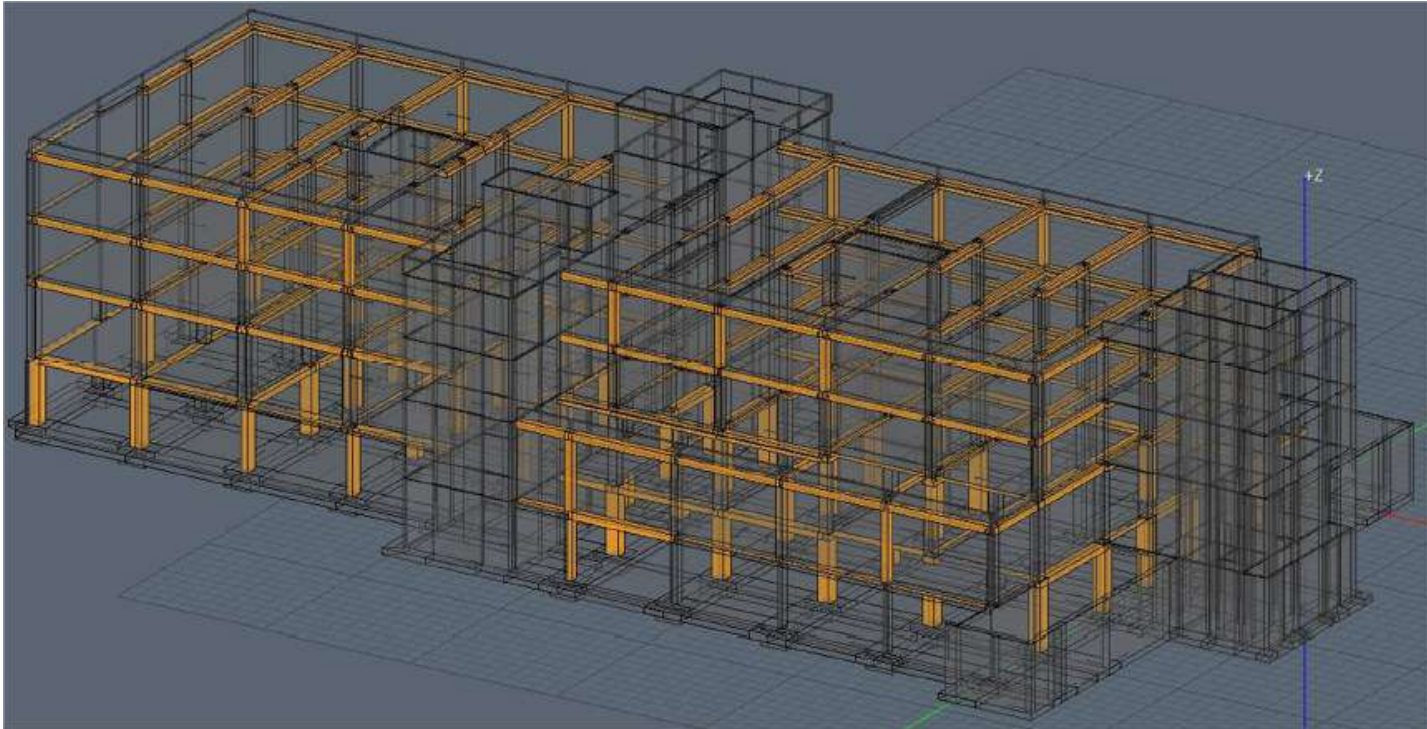
## Analisi stato di fatto – Vulnerabilità da martellamento

- $\frac{T_R(\text{con } V_R = 2 \text{ anni})}{T_R(\text{con } V_R = 100 \text{ anni})} \% = \frac{38}{1949} \% = 1,95\%$
- **Indicatore di Rischio -  $I_R = (T_C/T_P)^{0,41} = 0,20$**

Isolamento all'intradosso della platea fondale di un ospedale

**Performance Obiettivo: Vulnerabilità >60%**

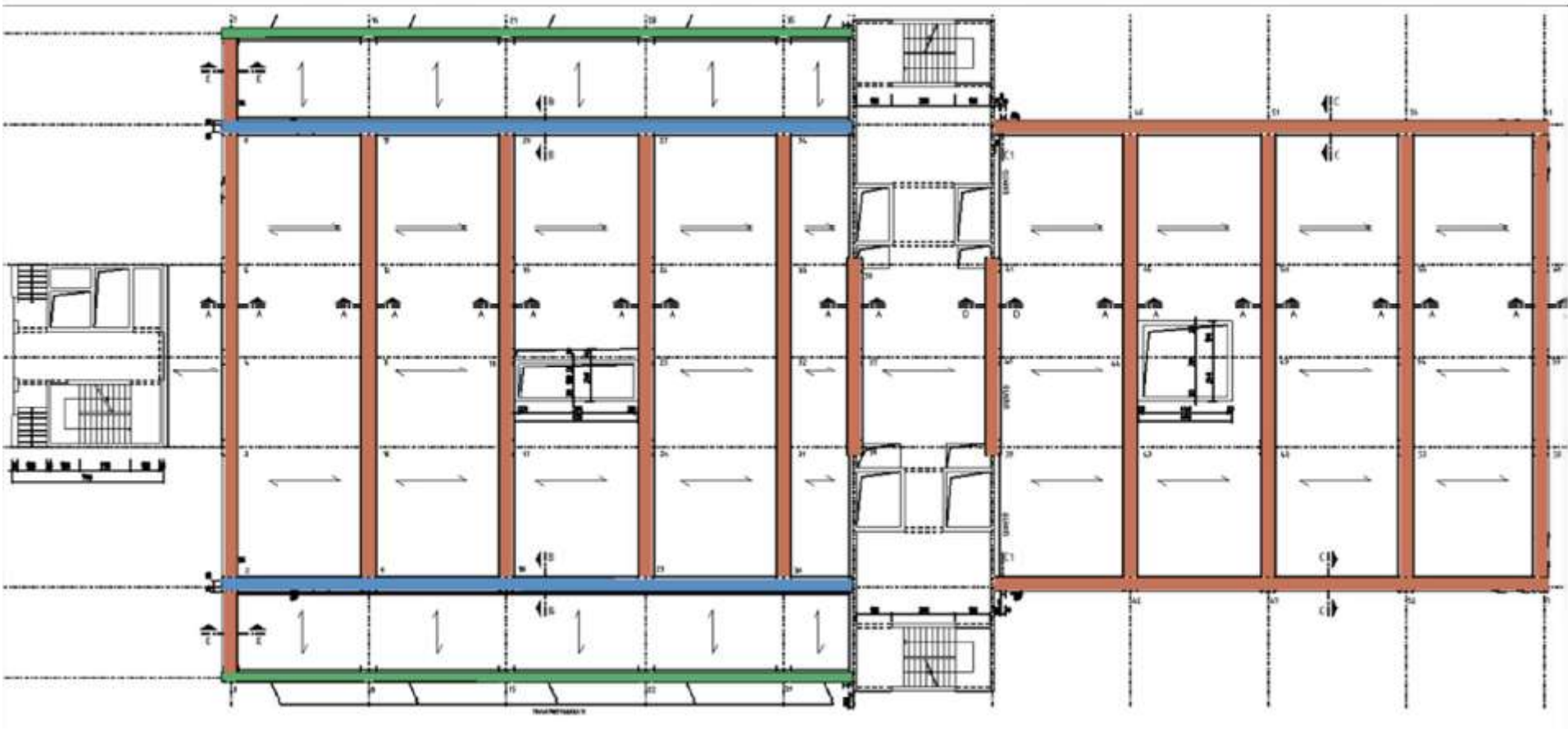
**Elementi non verificati allo SLC**



# Isolamento all'intradosso della platea fondale di un ospedale

**Performance Obiettivo: Vulnerabilità >60%**

## Approccio Convenzionale – Interventi necessari



# Isolamento all'intradosso della platea fondale di un ospedale

**Performance Obiettivo: Vulnerabilità >60%**

## Approccio Non Convenzionale: Isolamento di base

T	$\xi$	$S_e(T)$	Tagliante	Massa partecipante
[sec]	%	[g]	[kN]	[%]
0.42	6	0.9	13891.13	
3	10	0.1	2294.358	83
	15	0.1	1986.972	86

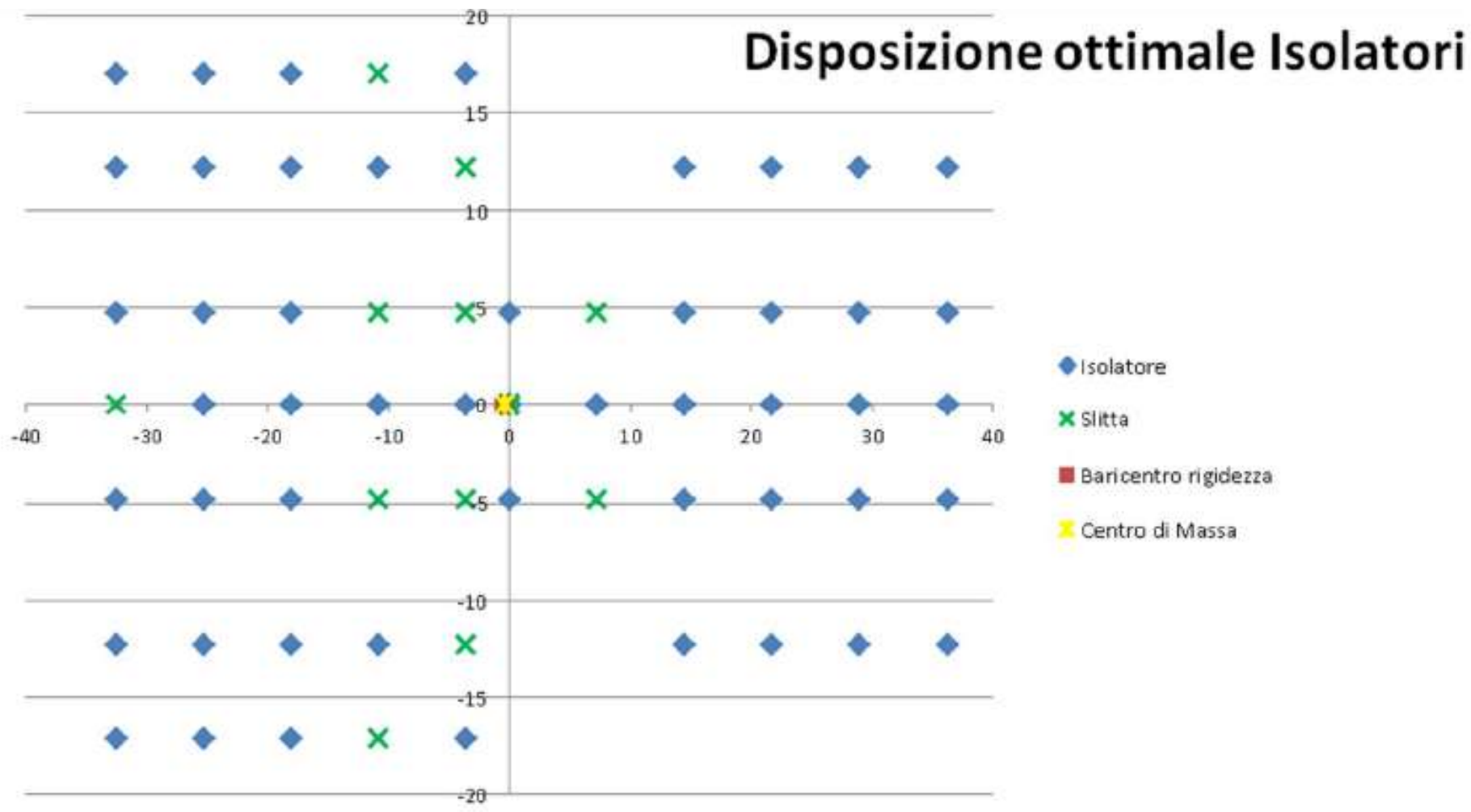
T[sec]	Smorzamento 6%	Smorzamento 10%	Smorzamento 15%
	$d_{dc}^{43}$ [mm]	$d_{dc}$ [mm]	$d_{dc}$ [mm]
3	373.4	319.8	276.9



# Isolamento all'intradosso della platea fondale di un ospedale

**Performance Obiettivo: Vulnerabilità >60%**

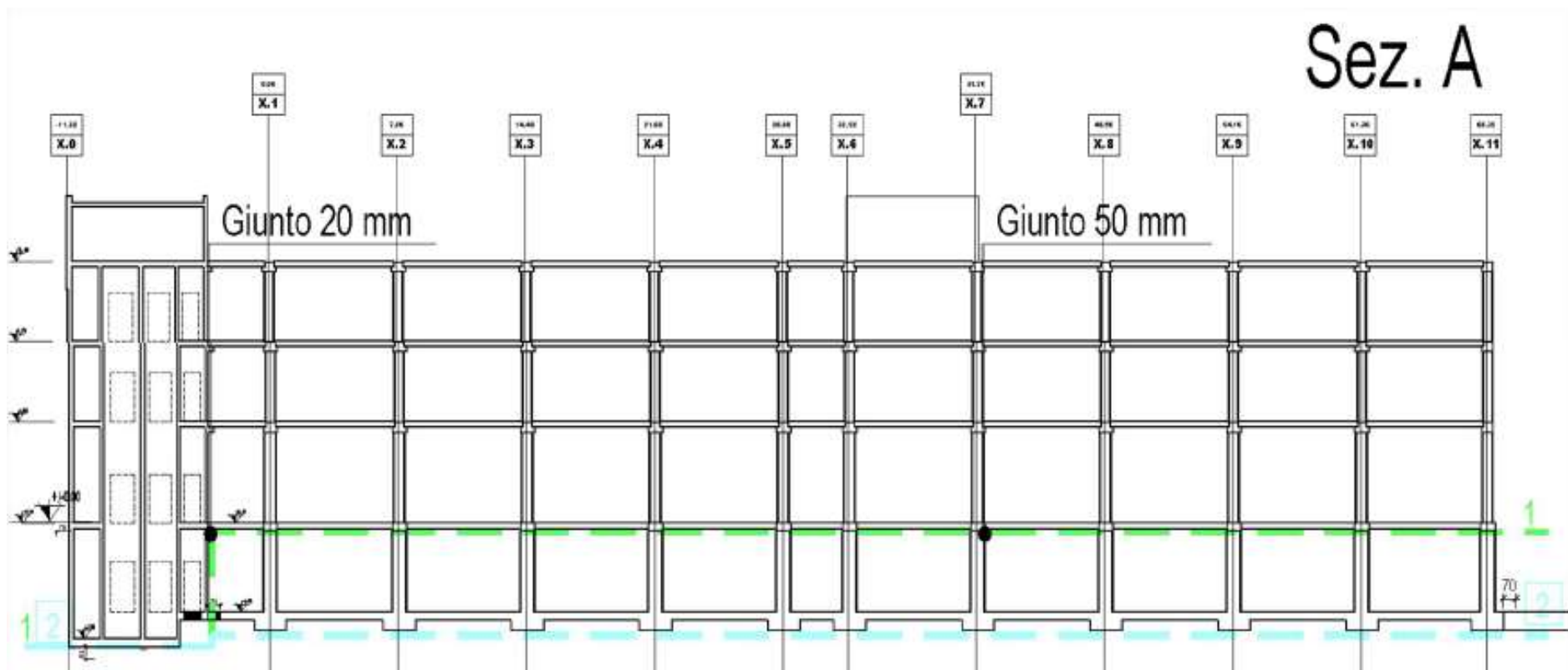
## Approccio Non Convenzionale: Isolamento di base



Isolamento all'intradosso della platea fondale di un ospedale

**Performance Obiettivo: Vulnerabilità >60%**

**Approccio Non Convenzionale: Isolamento di base**  
**2 Ipotesi per collocazione piano di isolamento**



Isolamento all'intradosso della platea fondale di un ospedale

**Performance Obiettivo: Vulnerabilità >60%**

**Approccio Non Convenzionale: Isolamento di base**

**2 Ipotesi per collocazione piano di isolamento**

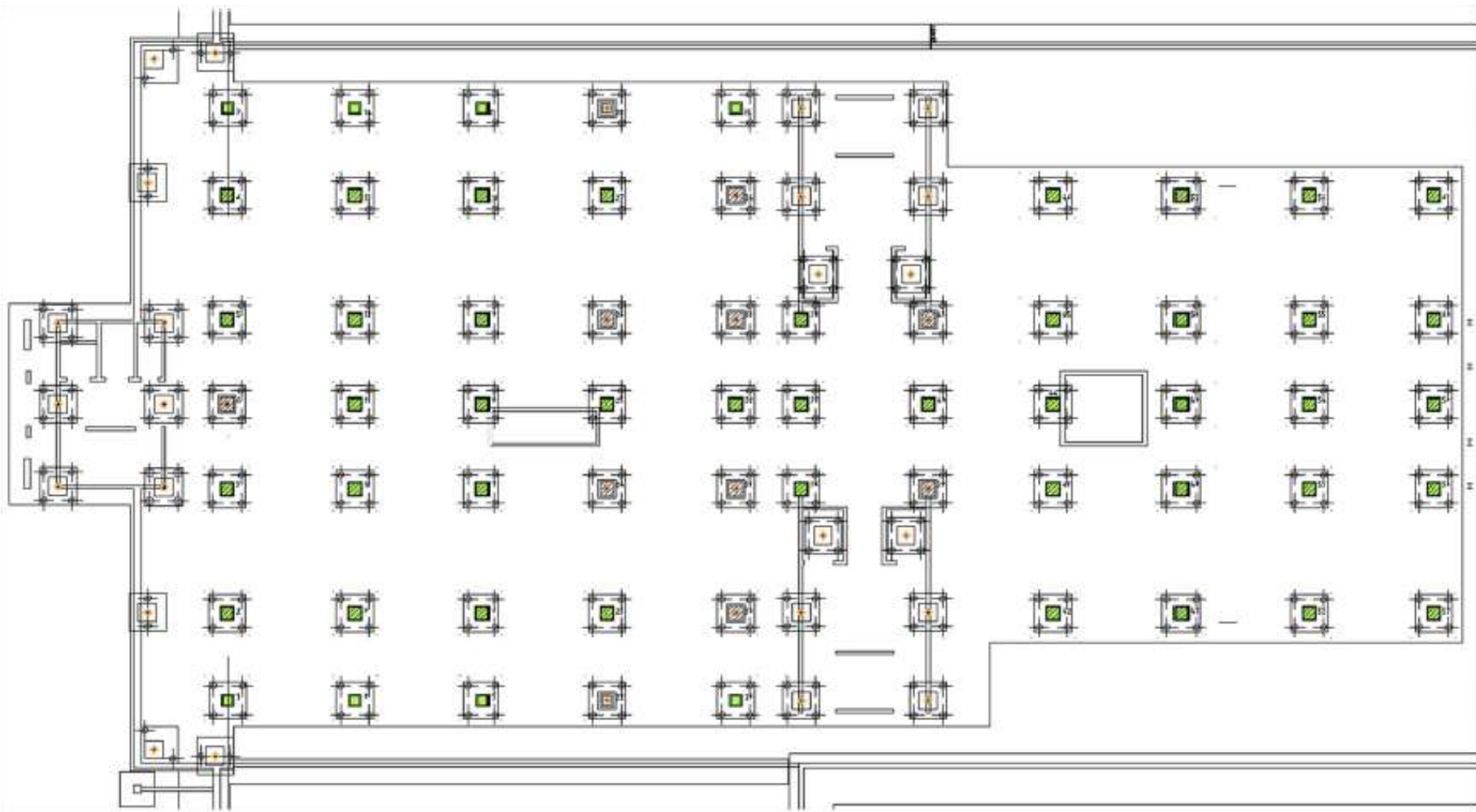


Isolamento all'intradosso della platea fondale di un ospedale

Performance Obiettivo: Vulnerabilità >60%

Approccio Non Convenzionale: Isolamento di base

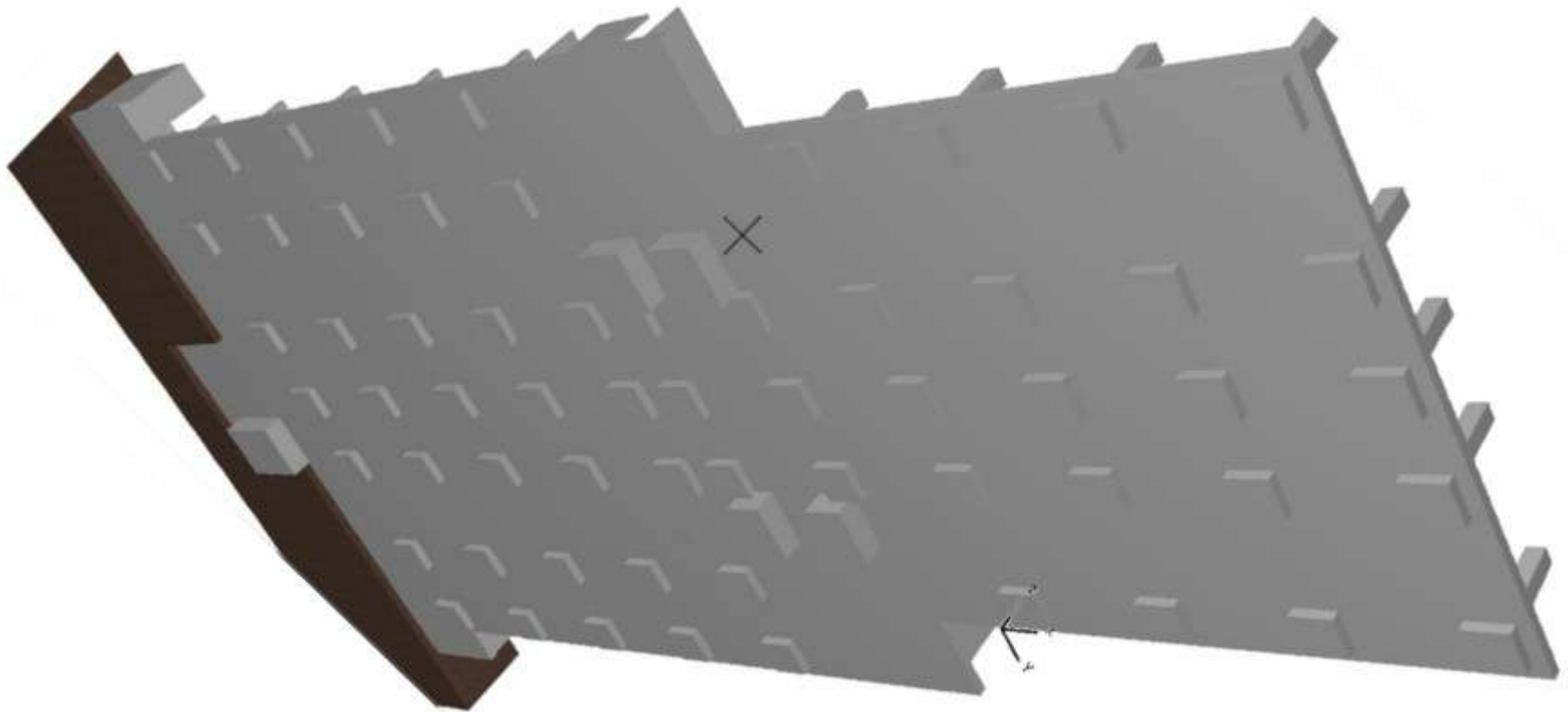
Collocazione Isolatori ■ e SD ■



Isolamento all'intradosso della platea fondale di un ospedale

**Performance Obiettivo: Vulnerabilità >60%**

**Isolamento di base – Sequenza operativa**

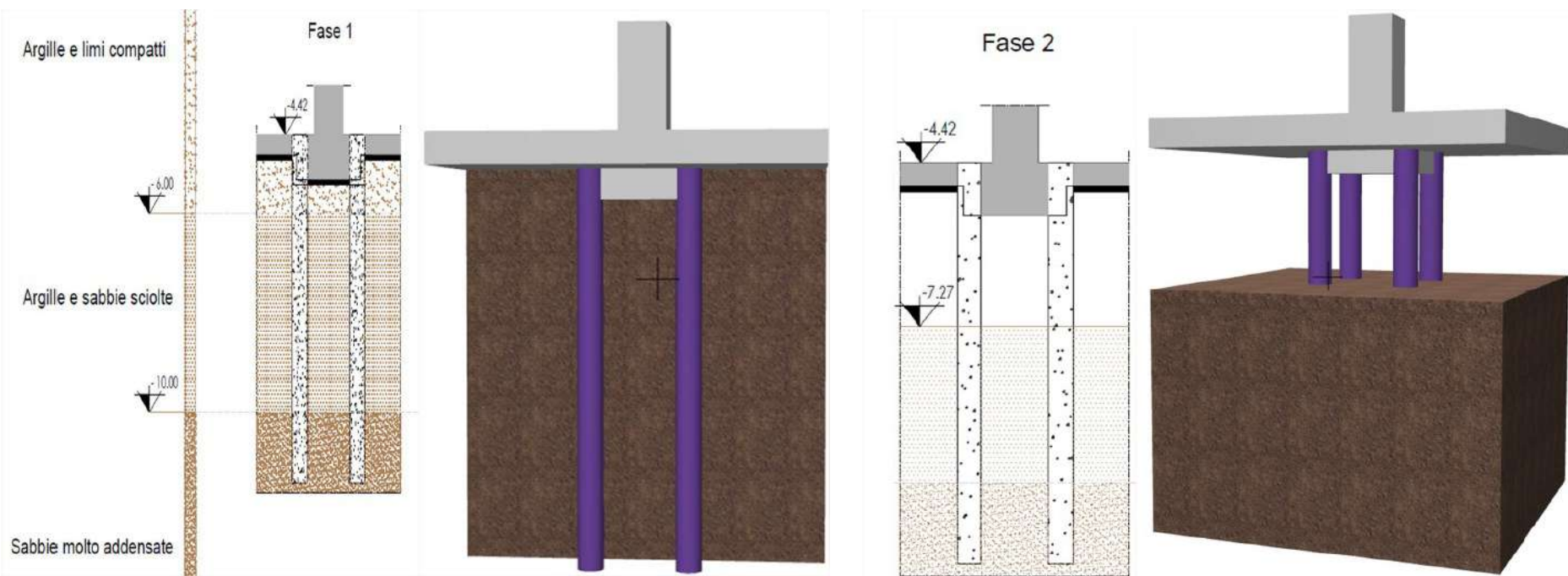




# Isolamento all'intradosso della platea fondale di un ospedale

**Performance Obiettivo: Vulnerabilità >60%**

## Isolamento di base – Sequenza operativa

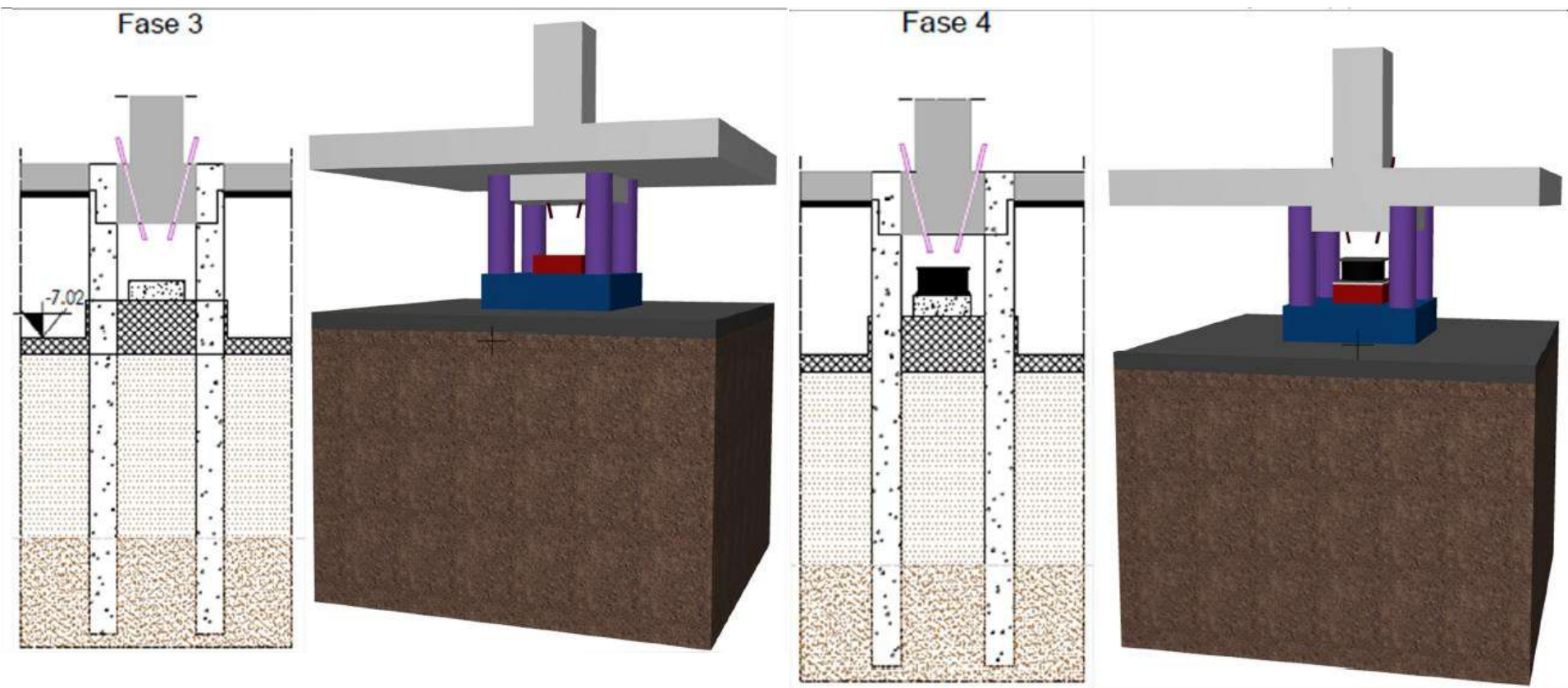




# Isolamento all'intradosso della platea fondale di un ospedale

**Performance Obiettivo: Vulnerabilità >60%**

## Isolamento di base – Sequenza operativa

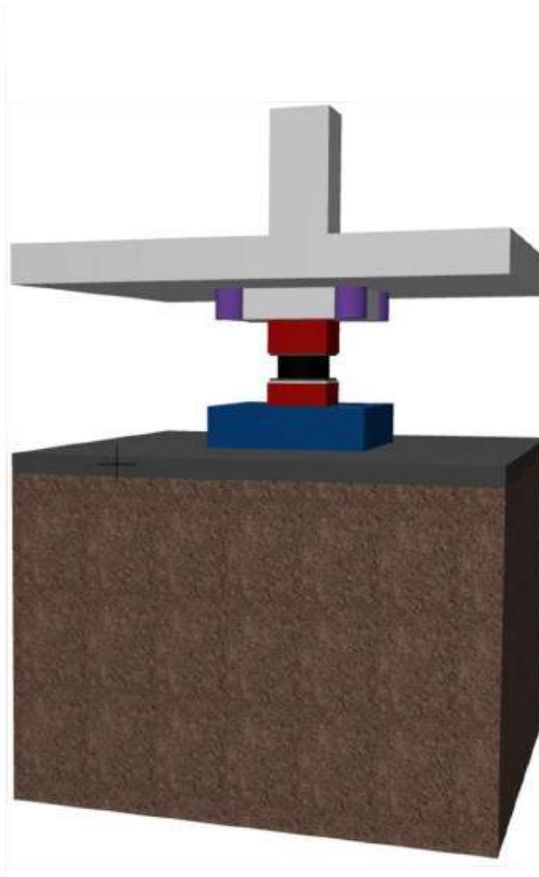
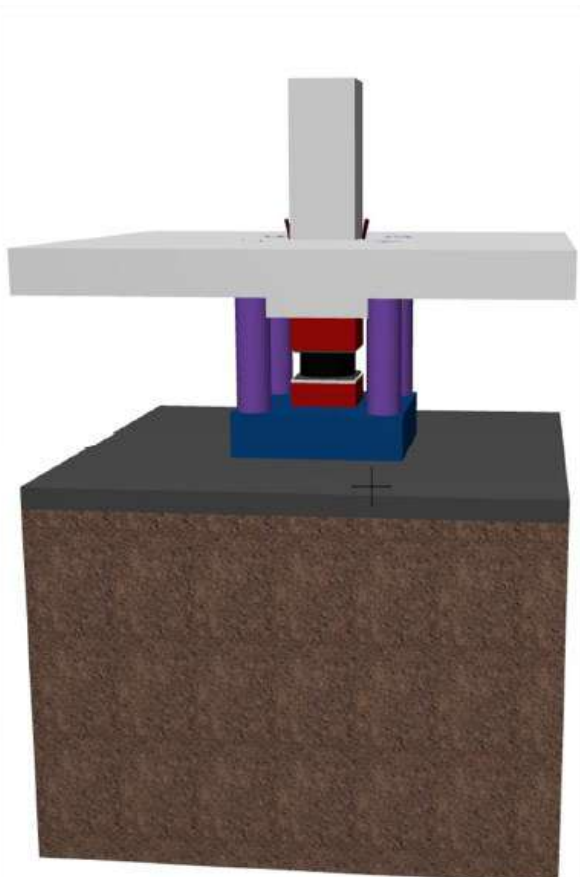
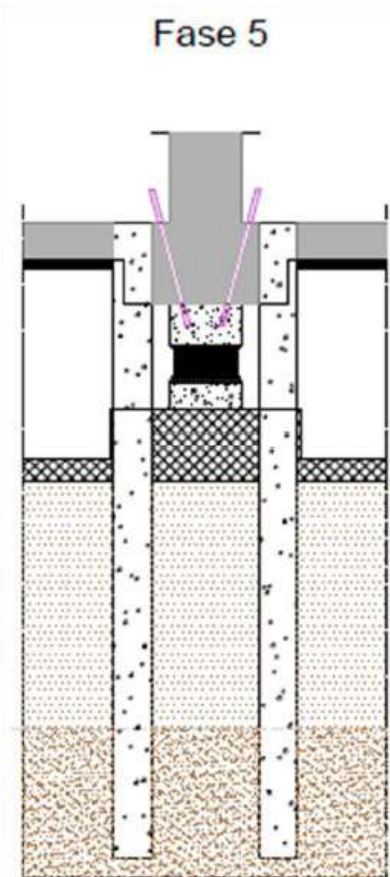


# Isolamento all'intradosso della platea fondale di un ospedale

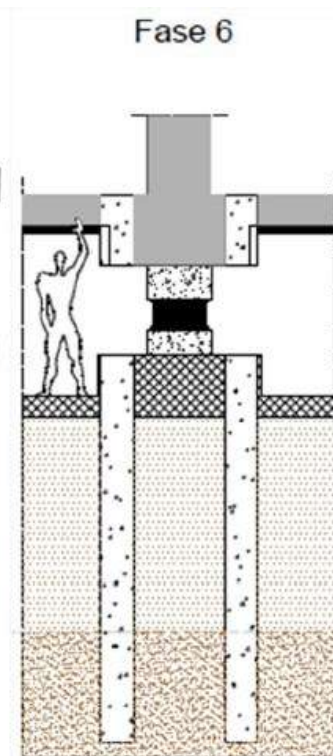
**Performance Obiettivo: Vulnerabilità >60%**

## Isolamento di base – Sequenza operativa

Fase 5



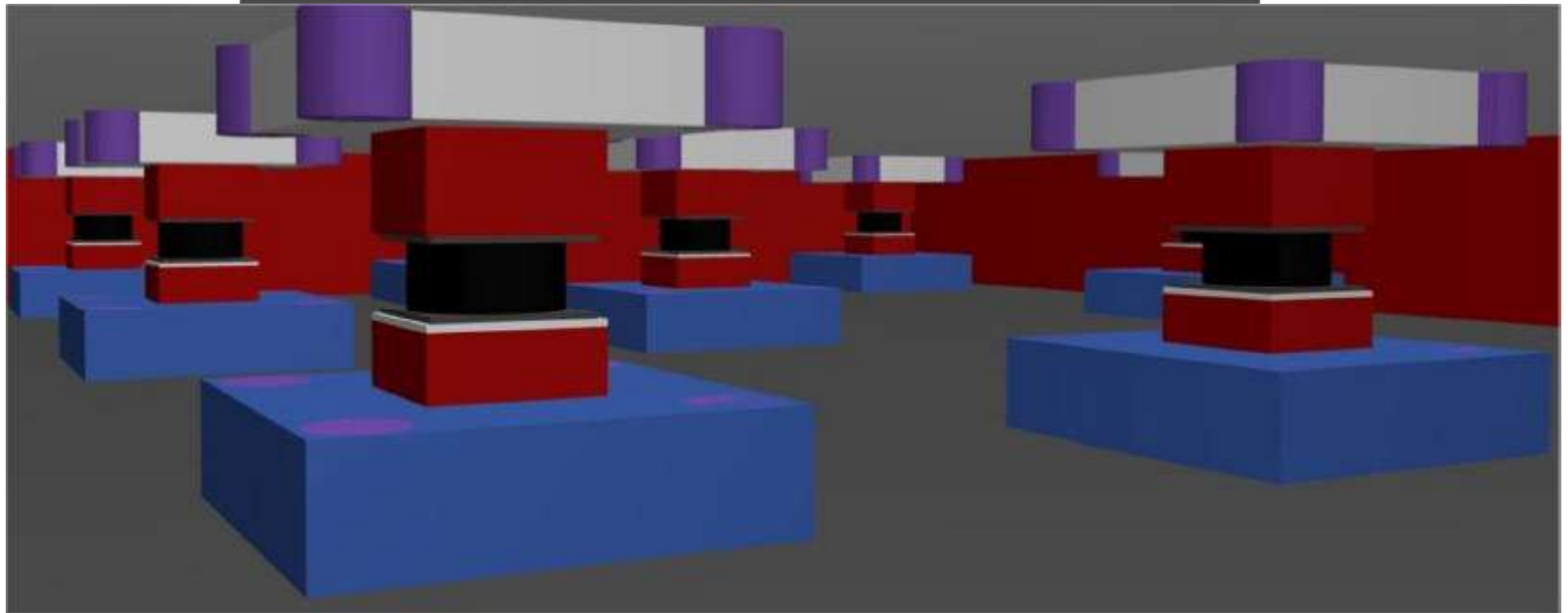
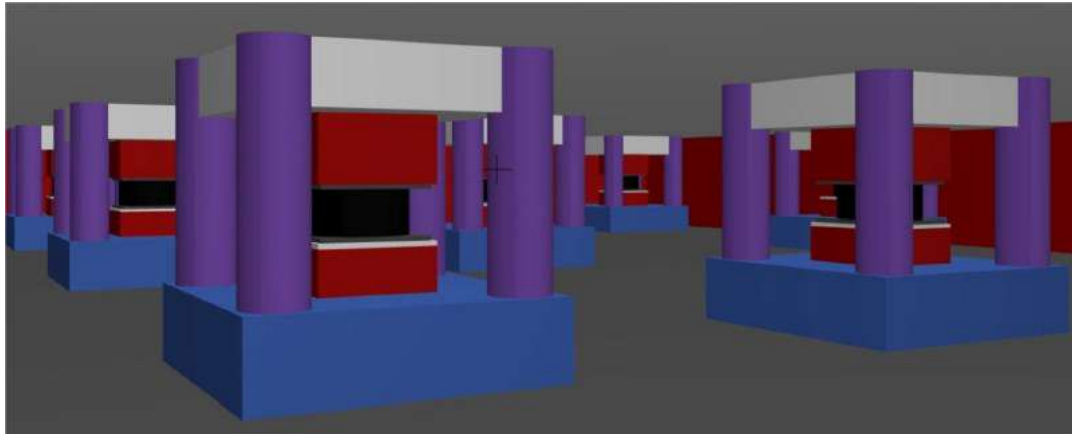
Fase 6



Isolamento all'intradosso della platea fondale di un ospedale

**Performance Obiettivo: Vulnerabilità >60%**

**Isolamento di base – Ultime fasi**



# Isolamento all'intradosso della platea fondale di un ospedale

**Performance Obiettivo: Vulnerabilità >60%**

## Isolamento di base – Dati salienti dimensionamento

### Caratteristiche del sistema di isolamento

$T_{is}$	Periodo di isolamenti di progetto	sec	3,00
$M$	Massa della soprastruttura	tonn	16.040
$K_{tot}$	Rigidezza complessiva necessaria	KN/mm	70,36

### Caratteristiche del dispositivo

### FSS

$V$	Carico max. sotto sisma allo SLC	KN	2500
$F$	Carico max. in assenza di sisma SLU	KN	3800
$Ca$	Coeff. Attrito /dispositivo nuovo)	max	1%
$\delta_{SLC}$	Spost. Massimo ( $\gamma \leq 2$ )	mm	400

# Isolamento all'intradosso della platea fondale di un ospedale

**Performance Obiettivo: Vulnerabilità >60%**

## Isolamento di base – Dati salienti dimensionamento

Caratteristiche del dispositivo		HDRB	
<b>V</b>	Carico max. sotto sisma allo SLC	KN	2000
<b>F</b>	Carico max. in assenza di sisma SLU	KN	3000
<b>Ke</b>	Rigidezza orizzontale equiv. allo spost. max	KN/mm	1,47
<b>Ke/Kv</b>	Rapporto di rigidezza	Minimo	800
<b>Spm.</b>	Spost. Massimo ( $\gamma \leq 2$ )	mm	400
$\xi$	Smorzamento equival. ( $\gamma = 2$ )	minimo	10%

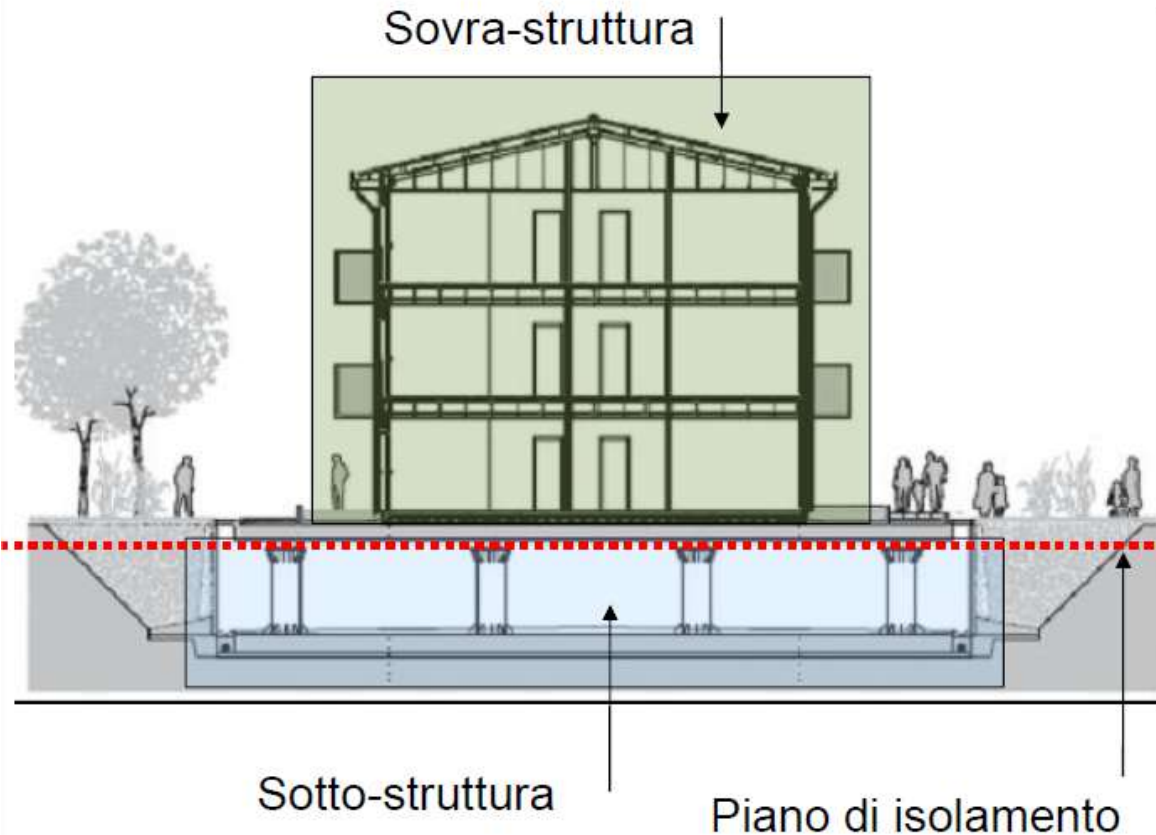
# Esempio di Pre-Dimensionamento 1

## Isolatore Elastomerico HDRB



# Isolamento di base - Pre-dimensionamento 1

Esempio di pre – dimensionamento  
“dati del problema ”



## Geometria ipotizzata:

- Pianta 20 metri X 11 metri
- Pilastri 12
- Piani 2 fuori terra + 1 terreno e garage
- Altezza 10 metri fuori terra

## Effetti di sito:

- Suolo tipo A
- Categoria di sottosuolo T1

## Primo periodo a base fissa:

- $T_{1bf} = C_1 \cdot H^{(3/4)} = 0,42 \text{ sec}$

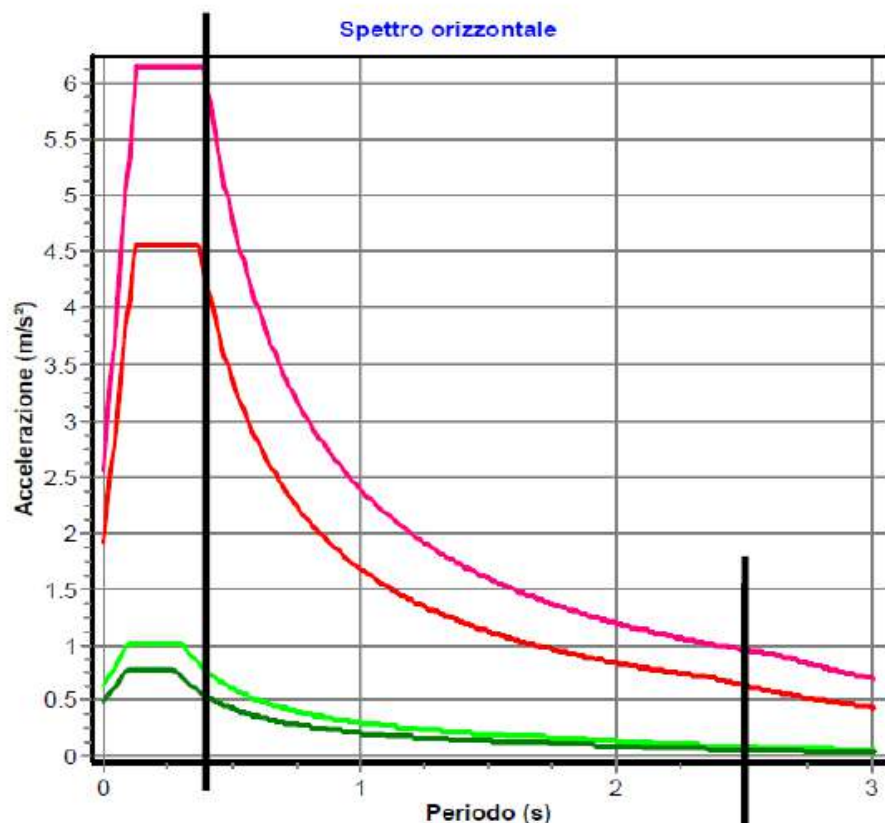
## Periodo di tentativo a base isolata:

- $T_{1is} = 2,5 \text{ sec}$

# Isolamento di base - Pre-dimensionamento 1

Esempio di pre – dimensionamento  
 “spettri associati”

$$\xi = 5\% \text{ quindi } \eta = 1$$



T1bf=0,42

T1is=2,50

Definizione di pericolosità sismica di base:

STATO LIMITE	TR [anni]	ag [g]	Fo	Tc* [s]
SLO	30	0.050	2.348	0.278
SLD	50	0.065	2.347	0.303
SLV	475	0.194	2.398	0.369
SLC	975	0.260	2.414	0.389

# Isolamento di base - Pre-dimensionamento 1

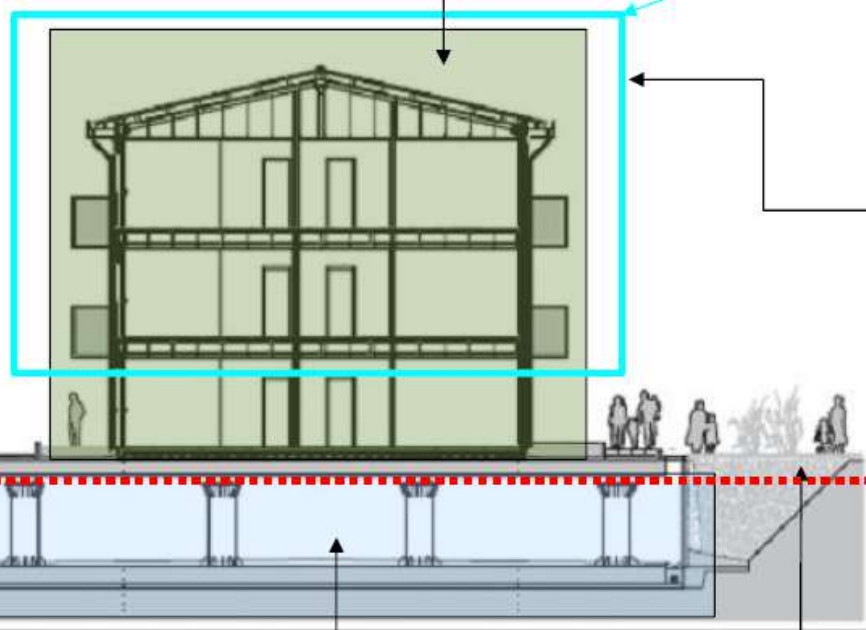
Esempio di pre – dimensionamento  
 “masse in gioco”

Peso sismico: D.M. 2008 3,2,4

$$G_1 + G_2 + \sum_j \Psi_{2j} Q_{kj} .$$

Massa sopra al piano di isolamento  
 M1 (isolata) = Ton (massa) 780

Massa relativa al tagliante alla base  
 M2 = Ton (massa) 536



Sotto-struttura

Piano di isolamento

Piano	peso	massa
Copertura	KN 860	Ton 88
II piano	KN 2200	Ton 224
I piano	KN 2200	Ton 224
base mobile	KN 2400	Ton 244
sottostruttura	KN 400	Ton 41

# Isolamento di base - Pre-dimensionamento 1

Esempio di pre - dimensionamento  
*Considerazioni sul tagliante alla base (SLV)*

Edificio a base fissa  $T = 0,42\text{sec}$   $q = 3$  (ipotesi)

$\xi = 5\%$  quindi  $\eta = 1$



$V_R$  50 Stalo Limite SLV

$a_g$  0.193  $F_0$  2.397  $T_c^*$  0.369

Suolo A  $S_s$  1.000  $C_c$  1.000

Topo T1  $h/H$  1  $S_T$  1.000

Comp.  Horizontal  Vertical

Behaviour Factor  $q$  3

n° of points 20 + 5

SIMQKE

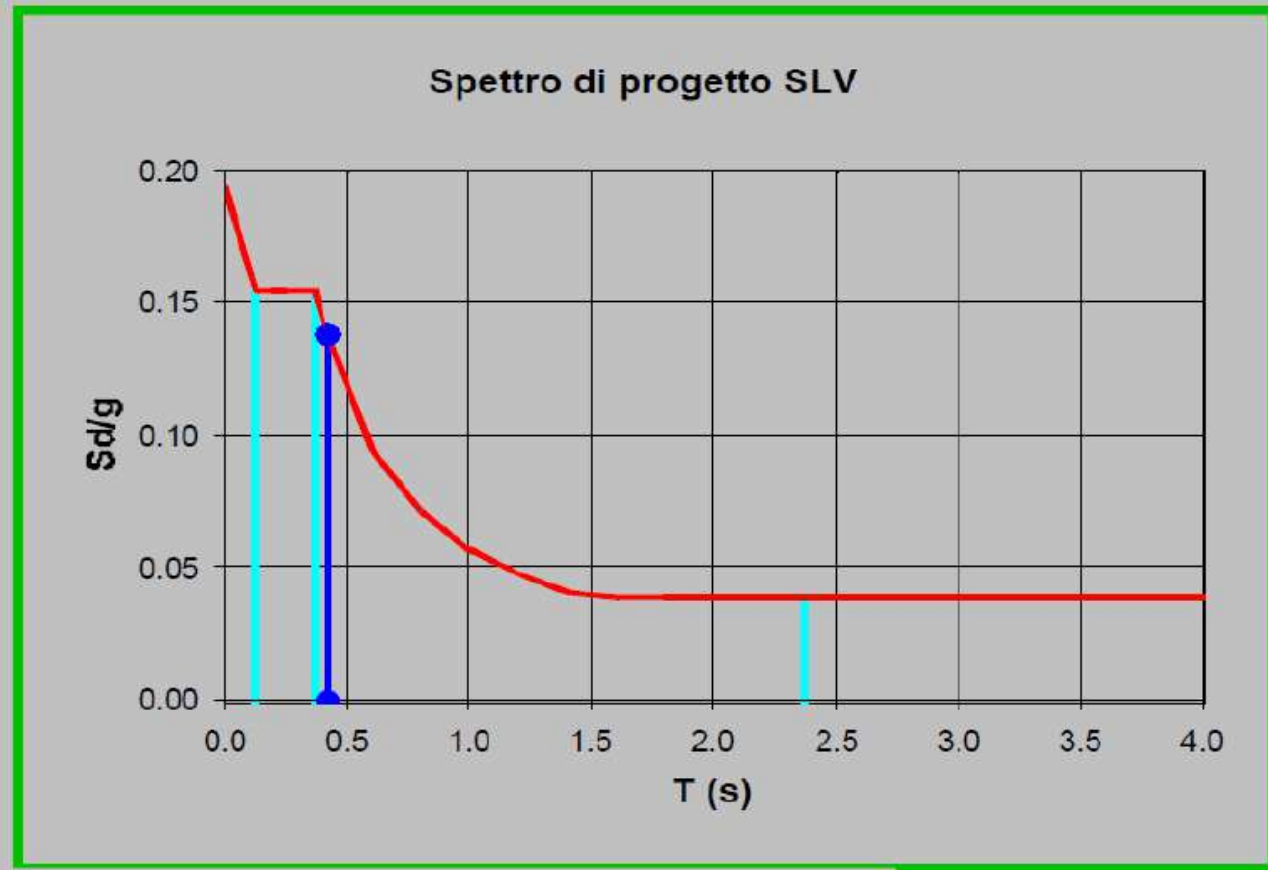
$T$  0.42 s

$f$  2.381 Hz

$\omega$  14.96 rad/s

$s_d$  0.138  $\times g$

$d_g$  0.0415 m  $v_g$  0.112 m/s





# Isolamento di base - Pre-dimensionamento 1

Esempio di pre – dimensionamento

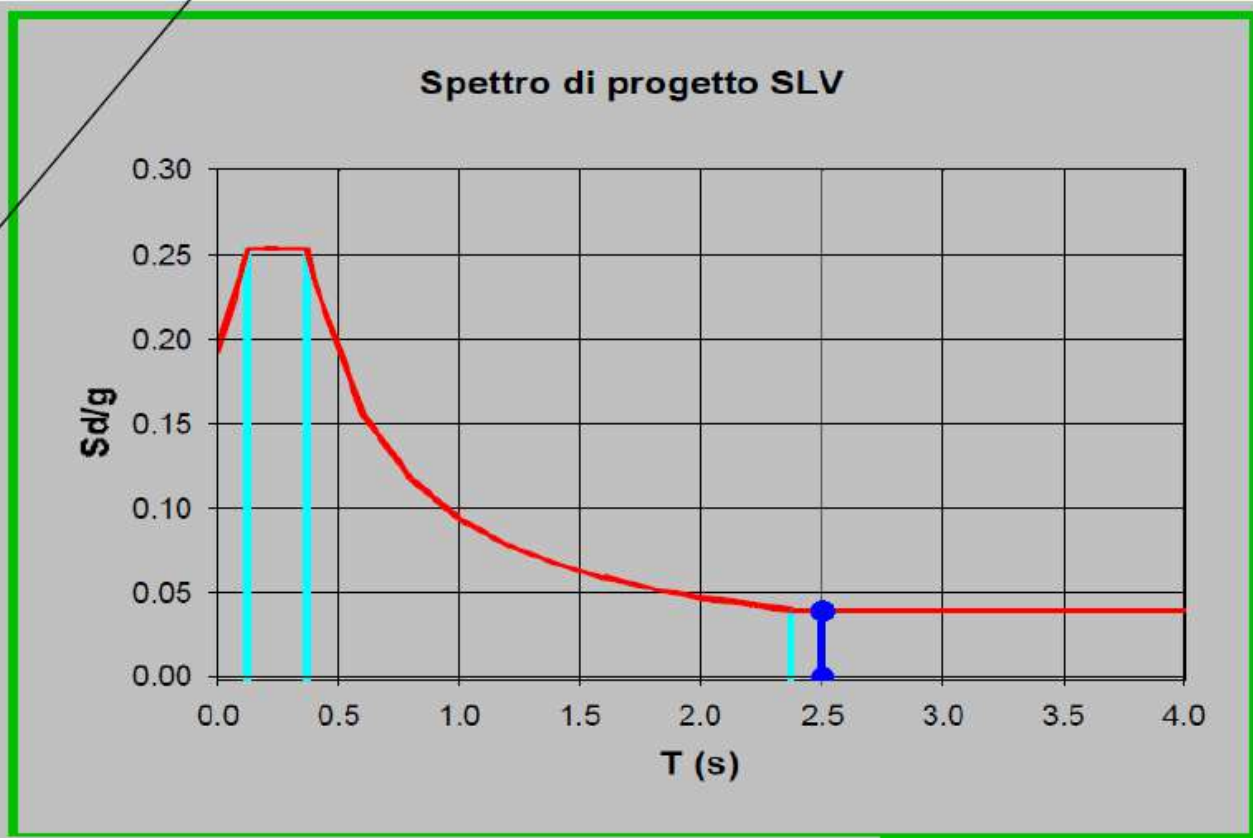
*Considerazioni sul tagliante alla base (SLV)*



Edificio a base mobile  $T = 2,5\text{sec}$

$q = 1,5$   $\xi \approx 10\%$  quindi  $\eta = 0.816$

VR 50 Stalo Limite SLV  
ag 0.193 Fo 2.397 Tc\* 0.369  
Suolo A Ss 1.000 Cc 1.000  
Topo T1 h/H 1 ST 1.000  
Comp.  Horizontal  Vertical  
Behaviour Factor q 1.83  
n° of points 20 + 5  
SIMQKE  
T 2.5 s  
f 0.4 Hz  
 $s_d$  0.039 x g  
 $\omega$  2.513 rad/s  
dg 0.0415 m vg 0.112 m/s



# Isolamento di base - Pre-dimensionamento 1

Esempio di pre – dimensionamento  
*Tagliante alla base dei pilastri (SLV)*

**Forza orizzontale sul sistema di isolamento (SLV)**

La forza orizzontale complessiva applicata al sistema d'isolamento, da ripartire tra gli elementi strutturali costituenti la sottostruttura in proporzione alle rigidità dei corrispondenti dispositivi d'isolamento, è pari a:

$$F = M \cdot S_e(T_{is}, \xi_{esi}) \quad (7.10.1)$$

Tagliante alla base edificio a base fissa:

$$536\text{Ton} \cdot 0,138 \cdot g = 725\text{KN} \text{ con danneggiamento}$$

Tagliante alla base edificio isolato:

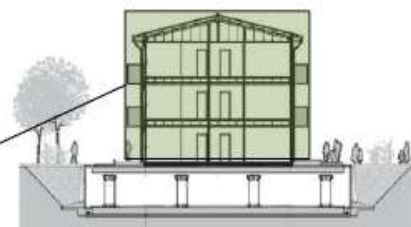
$$536\text{Ton} \cdot 0,039 \cdot g = 205\text{KN} \text{ senza danneggiamento}$$

La soluzione a base isolata comporta un tagliante sui pilastri mediamente 3,5 volte inferiore della soluzione tradizionale, senza peraltro particolari richieste di duttilità da parte della struttura.

A parità di richiesta di duttilità la differenza sale a 7.

**Forza orizzontale sul sistema di isolamento (SLV)**

Forza orizzontale sul sistema di isolamento:  $780\text{Ton} \cdot 0,039 \cdot g = \mathbf{298\text{KN}} = F_{(della\ formula\ 7,10,1)}$

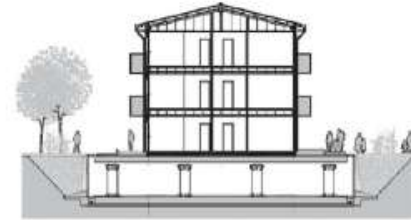




# Isolamento di base - Pre-dimensionamento 1

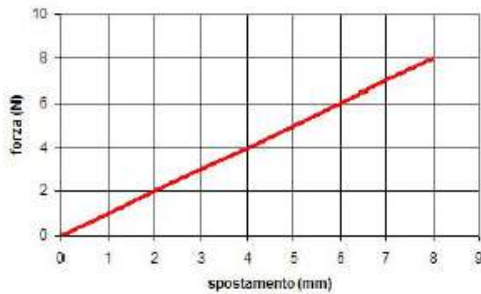
Esempio di pre – dimensionamento

**Spostamenti attesi per il centro di rigidezza (SLC)**



Lo spostamento del centro di rigidezza dovuto all'azione sismica  $d_{dc}$  deve essere calcolato, in ciascuna direzione orizzontale, mediante la seguente espressione:

$$d_{dc} = \frac{M \cdot S_e(T_{is}, \xi_{svi})}{K_{col, min}} \quad (7.10.2)$$



Ma la rigidezza del sistema non è ancora nota

Ricordando che:

$$\omega_B = \sqrt{\frac{K_B}{M}}$$

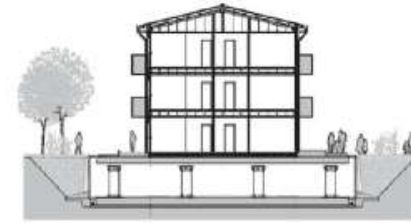
Si ottiene:

$$d_{dc} = S_e(T_{is}, \xi) / \omega^2$$

Integrazione delle accelerazioni

# Isolamento di base - Pre-dimensionamento 1

Esempio di pre - dimensionamento  
*Spostamenti attesi per il centro di rigidezza (SLC)*



$$d_{dc} = S_e(T_{is}, \xi) / \omega^2$$

$$\xi \approx 10\% \quad \eta = 0.816 \quad q = 1/\eta \approx 1.22$$

VR  Stalo Limite 
  
 a<sub>g</sub>  Fo  T<sub>c</sub>\* 
  
 Suolo  S<sub>s</sub>  C<sub>c</sub> 
  
 Topo  h/H  S<sub>T</sub> 
  
 Comp.  Horizontal  Vertical

Behaviour Factor q 
  
 n° of points  + 5

T  s

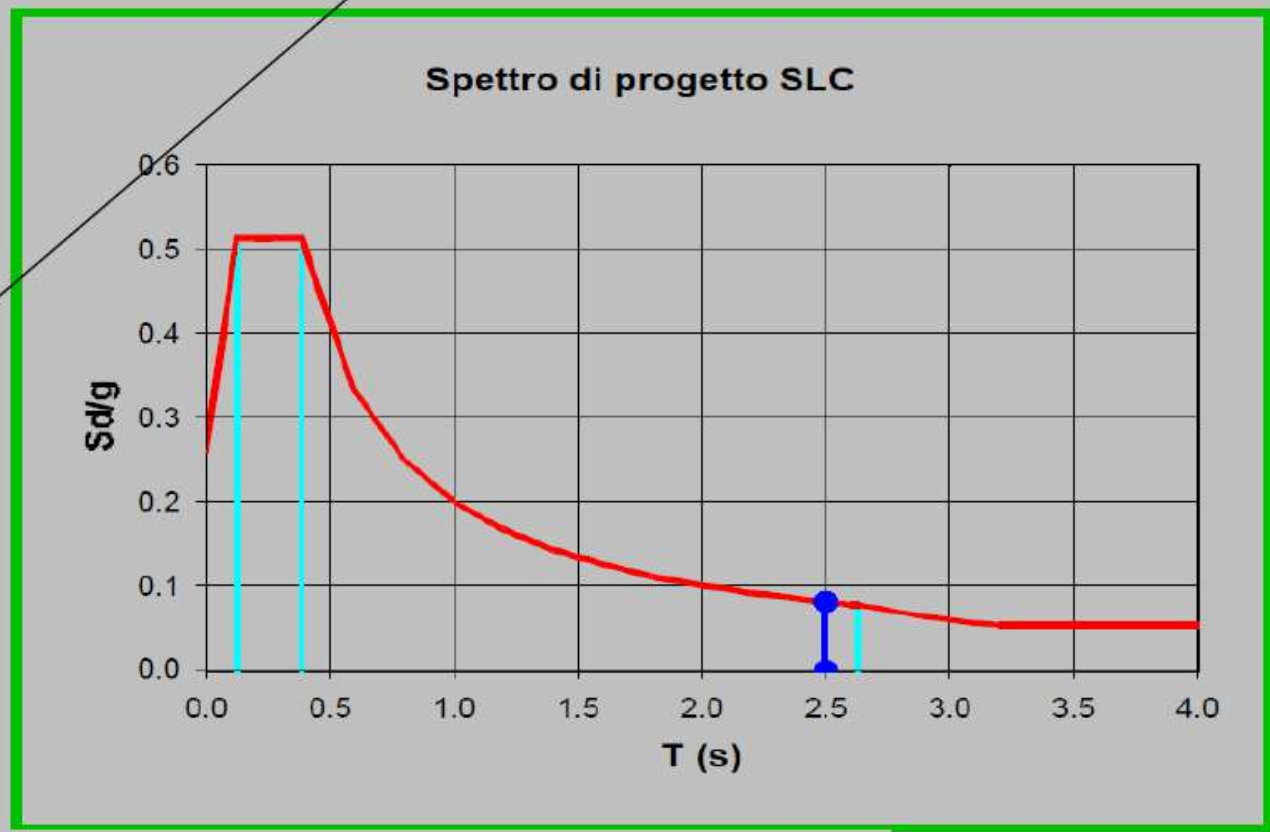
Hz

rad/s

m

m/s

× g



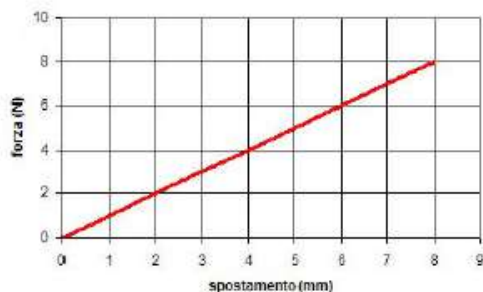
# Isolamento di base - Pre-dimensionamento 1



Esempio di pre – dimensionamento  
*Spostamenti attesi per il centro di rigidezza (SLC)*

Lo spostamento del centro di rigidezza dovuto all'azione sismica  $d_{dc}$  deve essere calcolato, in ciascuna direzione orizzontale, mediante la seguente espressione:

$$d_{dc} = \frac{M \cdot S_e(T_{1s}, \xi_{ens})}{K_{ens, min}} \quad (7.10.2)$$



Rigidità non ancora nota

Ricordando che:

$$\omega_B = \sqrt{\frac{K_B}{M}}$$

Si ottiene:

$$S_{max} = a_g \cdot \left( \frac{T}{2 \cdot \pi} \right)^2$$

$$= 0,08 \cdot g / 2,513^2 = 0,12 \text{ metri (centro di rigidezza)}$$

# Isolamento di base - Pre-dimensionamento 1

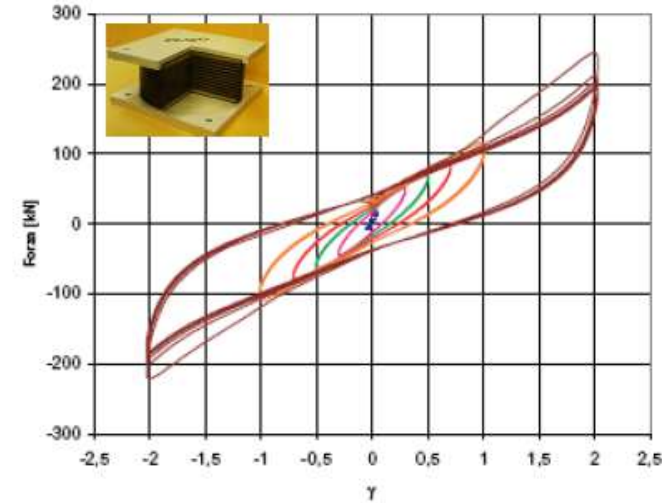
Esempio di pre - dimensionamento

**HDRB (elastomerici ad alto smorzamento)**

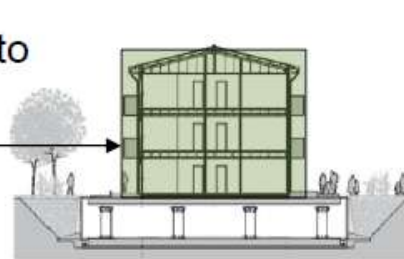
Dato aver scelto periodo di primo tentativo lo smorzamento e lo smorzamento dalla formula.

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

$$K_r = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot M}{T^2}$$



**Massa sopra al piano di isolamento**  
M1 (isolata) = **Ton (massa) 780**



4921KN/m 4,92KN/mm

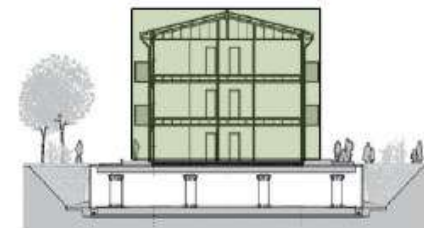
**Periodo di tentativo a base isolata: T1is=2,5 sec**



# Isolamento di base - Pre-dimensionamento 1

Esempio di pre – dimensionamento

**HDRB (elastomerici ad alto smorzamento)**



Rigidezza del sistema = 4,92KN/mm

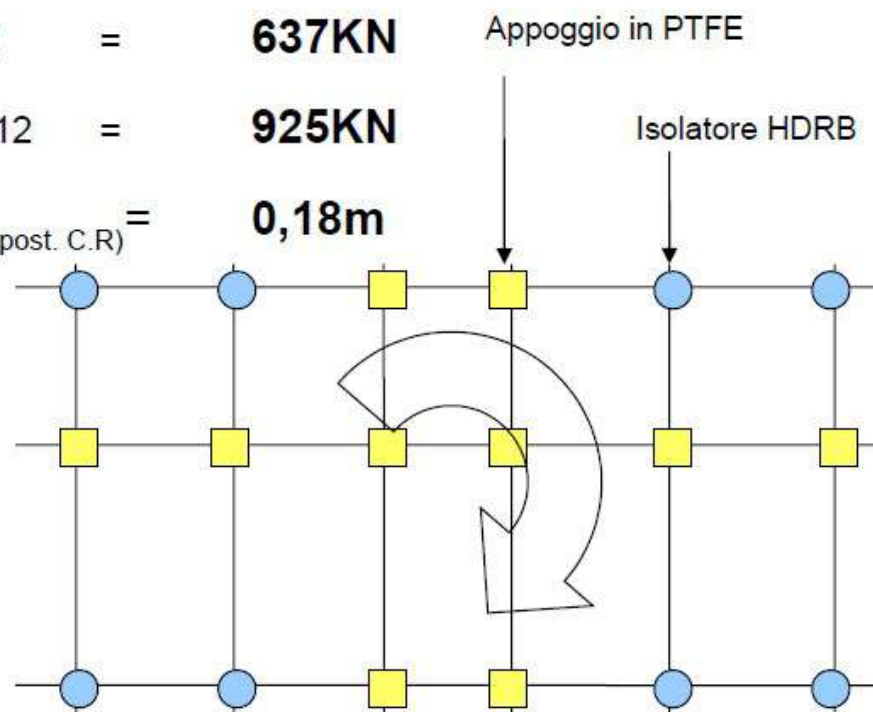
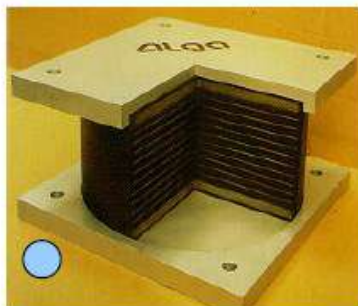
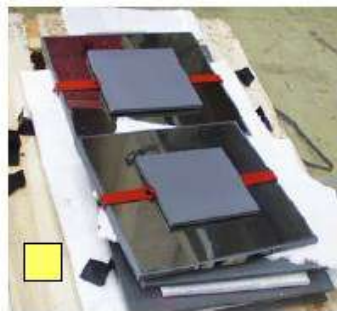
Carichi sui dispositivi  $V_{sism} = 780 \cdot 9,81 / 12 = 637\text{KN}$

Carico sui dispositivi  $V_{max(slu)} = 780 \cdot 9,81 \cdot \gamma / 12 = 925\text{KN}$

Spostamento max dispositivo =  $1,5 \cdot 0,12\text{m}_{(spost. C.R)} = 0,18\text{m}$

Si ipotizza l'impiego di 8 HDRB sul perimetro

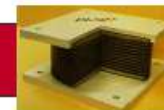
Rigidezza dispositivo =  $4,92\text{KN/mm} / 8 = 0,61\text{KN/mm}$



Pianta Ipotetica

# Isolamento di base - Pre-dimensionamento 1

**D 400 B 450 Z 335**



Geometrical DATA		Technical DATA														
te	H	HDS $\xi = 10\%$ - G = 0,4 MPa					HDN $\xi = 10\%$ - G = 0,8 MPa					HDH $\xi = 16\%$ - G = 1,4 MPa				
		S <sub>max</sub>	V <sub>max</sub>	V <sub>sism</sub>	K <sub>r</sub>	K <sub>v</sub>	S <sub>max</sub>	V <sub>max</sub>	V <sub>sism</sub>	K <sub>r</sub>	K <sub>v</sub>	S <sub>max</sub>	V <sub>max</sub>	V <sub>sism</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	210	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	1050	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	260	3250	1400	1,37	1277

[http://www.alga.it/uploads/369\\_ALGA\\_-\\_HDRB\\_LRB.pdf](http://www.alga.it/uploads/369_ALGA_-_HDRB_LRB.pdf)

13

TECHNOLOGICAL THINKING

Rigidezza sistema di isolamento:

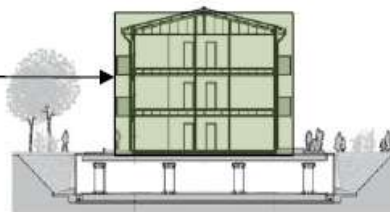
0,57\*8 = 4,56 kN/mm    K = 4560 kN/m

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Periodo a base isolata:

• T<sub>is</sub> = 2,59 sec

Massa sopra al piano di isolamento  
M<sub>1</sub> (isolata) = T<sub>on</sub> (massa) 780



Non cambiano in modo significativo i dati spettrali iniziali.



# Esempio di Pre-Dimensionamento 2

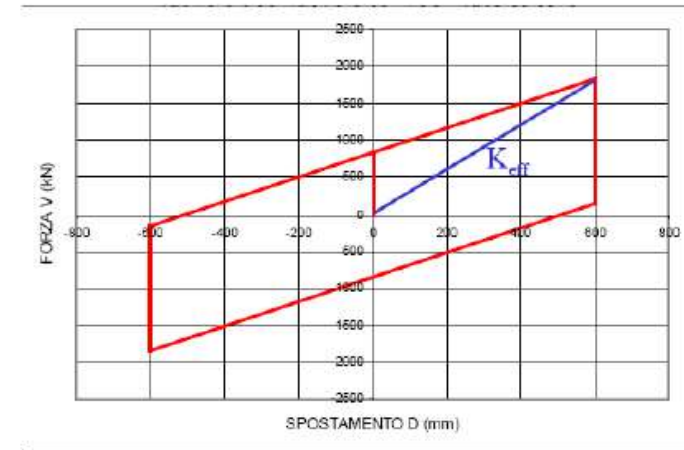
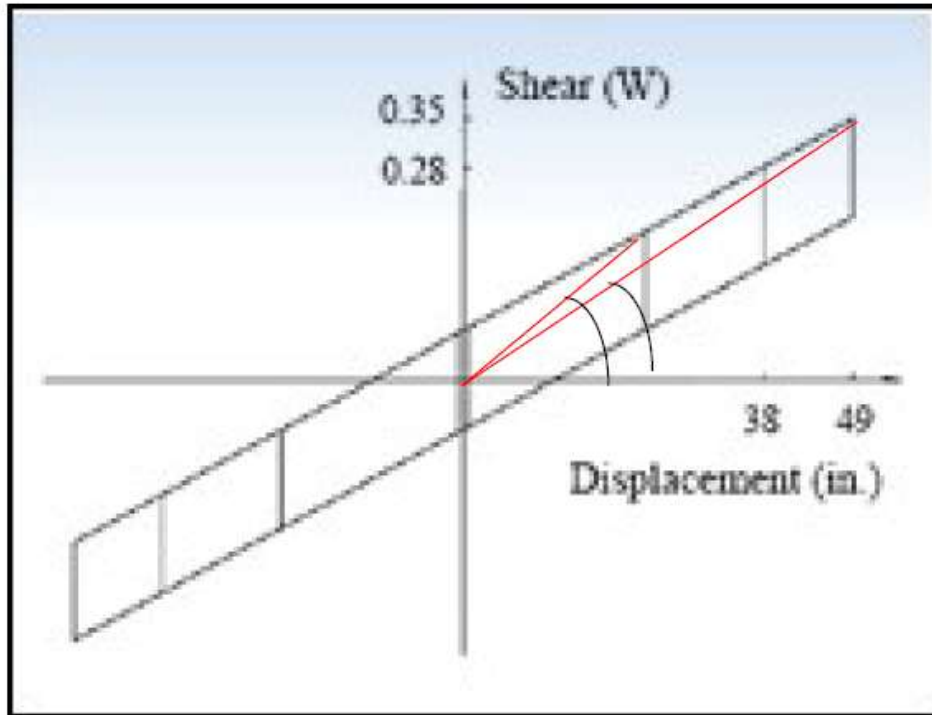
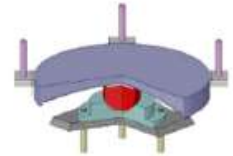
## Isolatore FP

# Isolamento di base - Pre-dimensionamento 2

Esempio di pre - dimensionamento

## FP (friction pendulum)

Rigidezza funzione diretta dell'attrito ed inversa con la spostamento



Anche lo smorzamento dipende dallo spostamento e dall'attrito

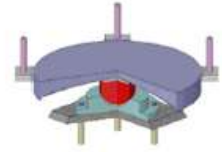
# Isolamento di base - Pre-dimensionamento 2

Esempio di pre - dimensionamento

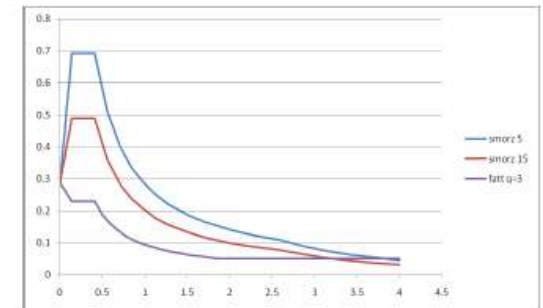
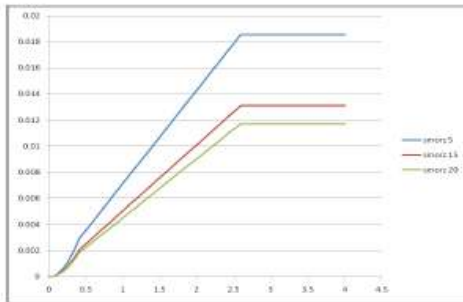
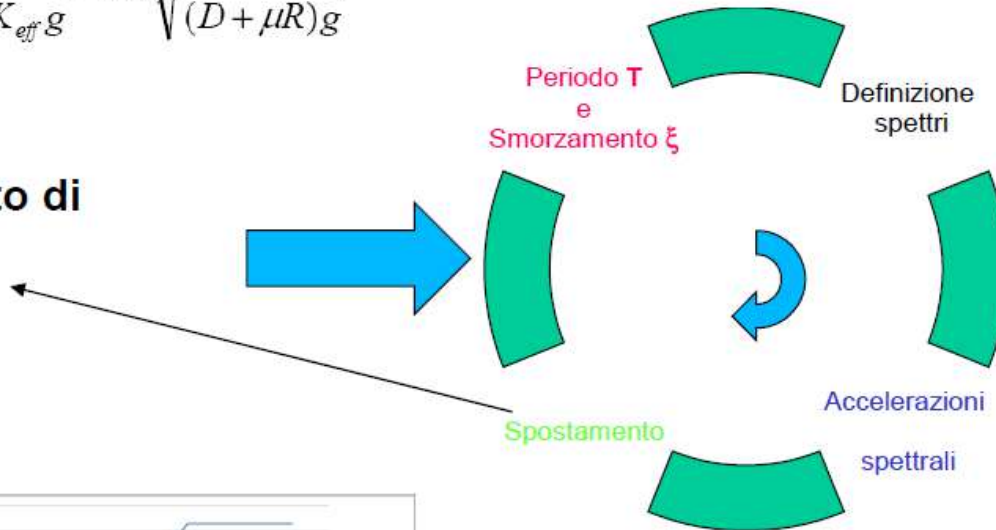
FP (friction pendulum)

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{eff}g}} = 2\pi \sqrt{\frac{RD}{(D + \mu R)g}}$$

$$\xi_{eff} = \frac{2}{\pi} \left[ \frac{\mu}{\mu + \frac{D}{R}} \right]$$

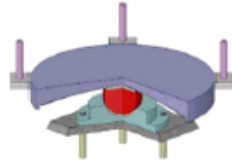


Spostamento di tentativo



# Isolamento di base - Pre-dimensionamento 2

Esempio di pre – dimensionamento



## FP (friction pendulum)

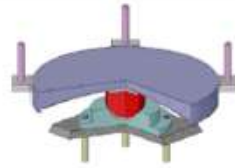
1. **Periodo** di tentativo a base isolata inizialmente senza attrito :  
 $T_i > 2,5$  sec
2. **Attrito** del dispositivo (tra 2% e 20%)
3. **Spostamento di tentativo** (per esempio lo spostamento del centro di rigidità precedentemente calcolato)
4. **Carico** sul dispositivo per evento sismico

1. Si consideri un periodo relativo ad un pendolo privo di attrito pari a 3sec., dalla formula si ricava: **R= 2239 mm**
2. Valore di attrito  $\mu = 2\%$
3. Spostamento iniziale ipotizzato per le iterazioni **D = 0,12 m**

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

# Isolamento di base - Pre-dimensionamento 2

Esempio di pre – dimensionamento



## FP (friction pendulum)

peso	V	kN	637	637	637	637
coeff.atrito	$\mu$		0.02	0.02	0.02	0.02
raggio	R	mm	2239	2239	2239	2239
spostamento	D	mm	120	105.7	102.0	101.0
rigidezza	K	kN/mm	0.28	0.28	0.28	0.28
rigidezza efficace	$K_{eff}$	kN/mm	0.39	0.41	0.41	0.41
periodo	T	s	3.00	3.00	3.00	3.00
periodo efficace	$T_{eff}$	s	2.56	2.52	2.50	2.50
smorzamento	$\xi$		17.3%	18.9%	19.4%	19.6%
fattore di smorzamento	$\eta$		0.670	0.646	0.640	0.638
accelerazione	a	m/s <sup>2</sup>	0.636	0.636	0.637	0.637
spostamento	D	mm	105.692	101.997	100.996	100.721
carico orizzontale	H	kN	43	42	41	41