



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

Prof.ssa Ing. Gloria Terenzi

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Firenze

Tecnica d'isolamento alla base: elementi di base e metodi di progetto

Corso di Costruzioni in zona sismica

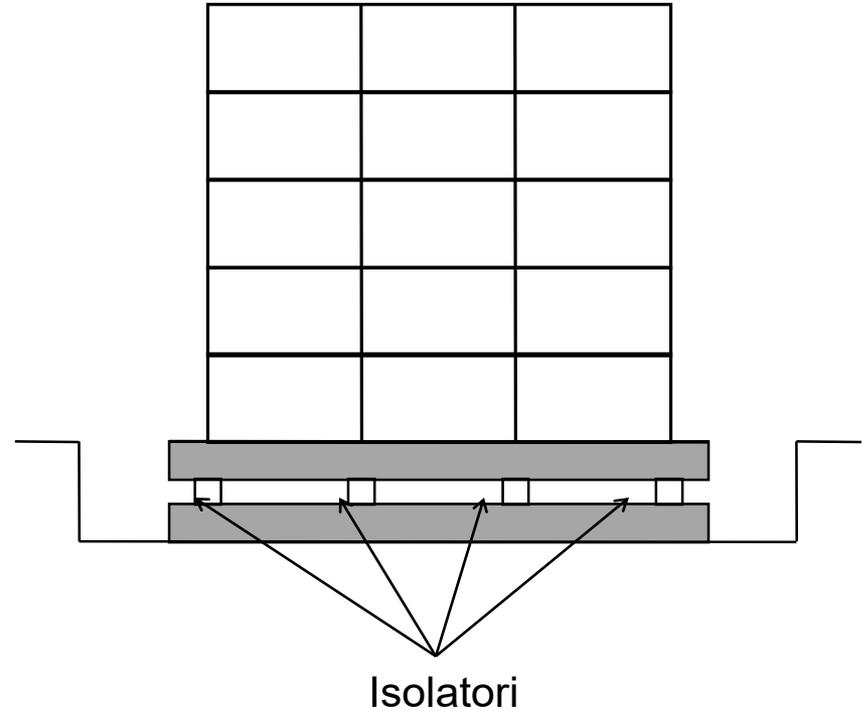
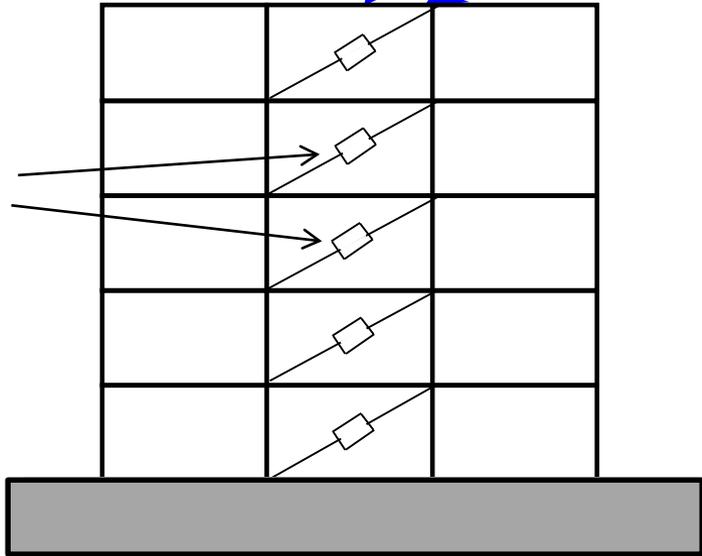
Bilancio energetico

$$\cancel{E_k} + E_\xi - \cancel{E_s} + E_h = E_i$$

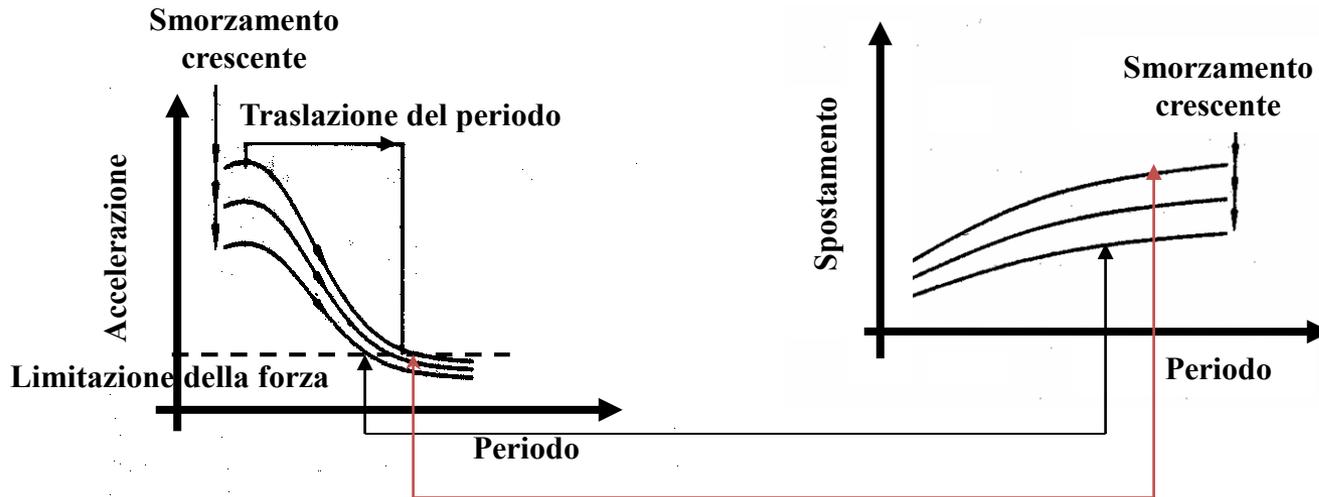
Dissipazione supplementare di energia

Isolamento alla base

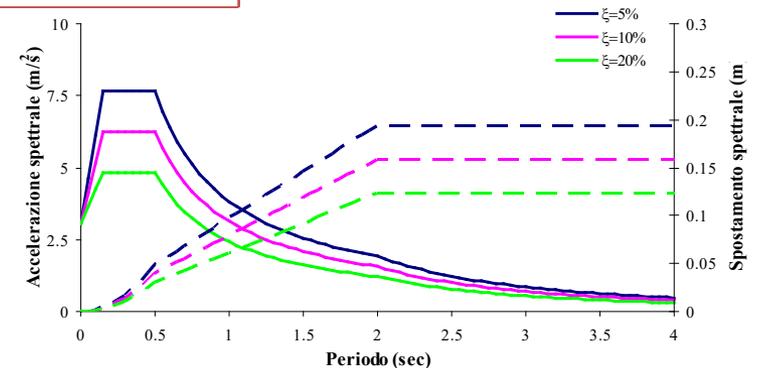
Dispositivi dissipativi



➤ **Strategie di riferimento per le tecnologie avanzate di protezione sismica delle strutture:**



- 1) *Isolamento alla base e dissipazione di energia*
- 2) *Dissipazione supplementare dell'energia*



NTC 14/01/2008: §7.10 e §11.9

Circolare 617: §C7.10, §C11.9, §C7A10 (Dissipazione supplementare di energia)

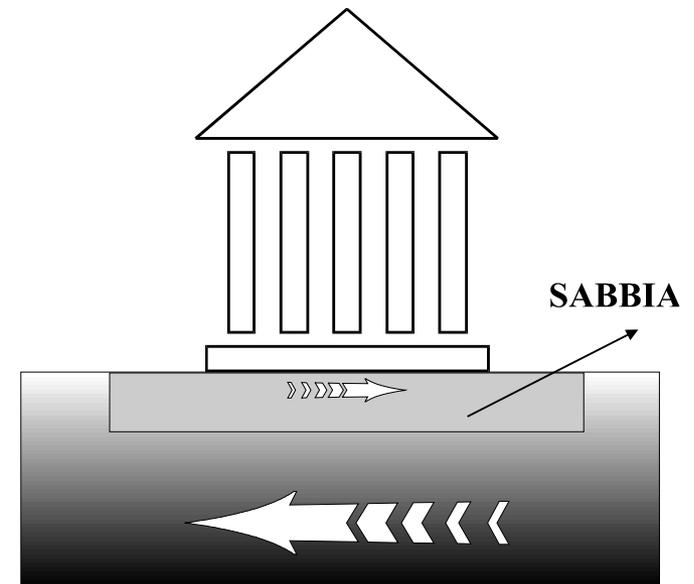
□ Isolamento sismico

NON È UN CONCETTO NUOVO!

Gaius Plinius Secundus, Naturalis Historia:

*“Graecae magnificentiae vera admiratio extat templum Ephesiae Dianae
CXX annis factum a tota Asia.*

*In solo id palustri fecere, ne terrae motus sentiret aut hiatus timeret,
rursus ne in lubrico atque instabili fundamenta tantae molis locarentur,
calcatis ea substravere carbonibus, dein velleribus lanae”.*



**Antichi templi greci, monasteri, templi e ponti cinesi, costruzioni degli Incas
e templi italiani appaiono protetti da rudimentali sistemi d'isolamento sismico**

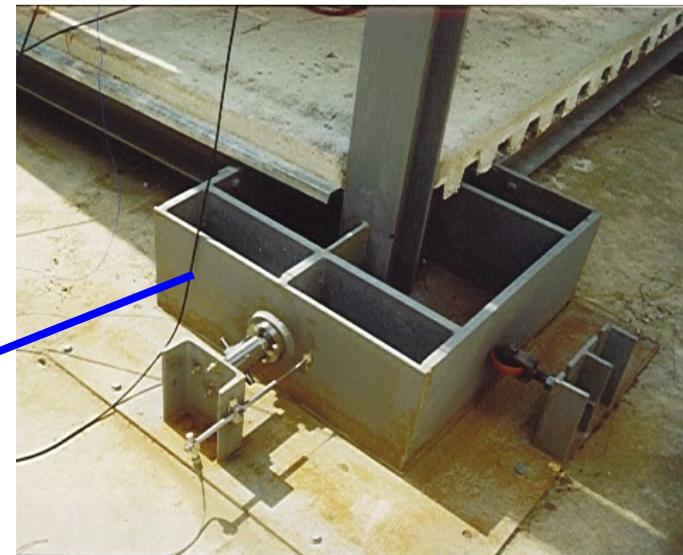
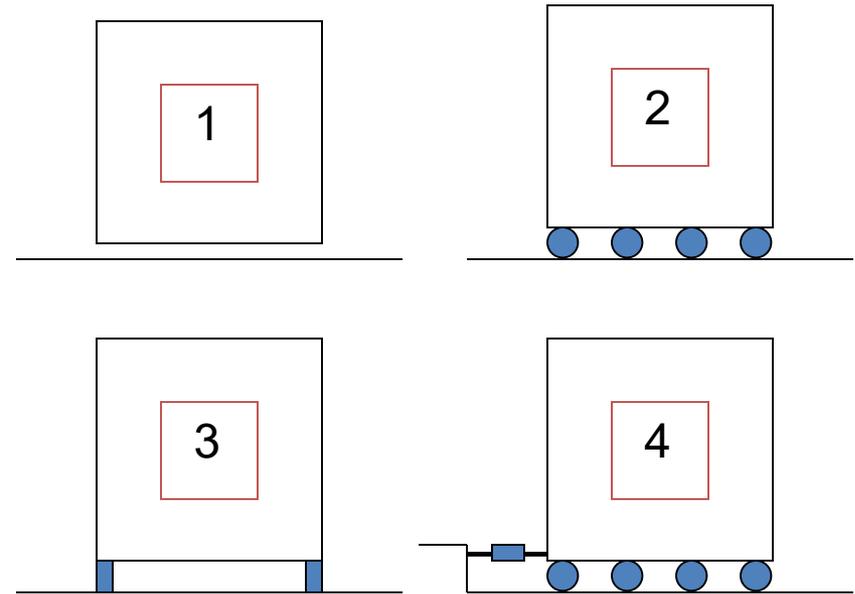
Cyrus tomb in Pasargades, the oldest base-isolated structure in the world

- La [tomba di Ciro il Grande](#) a [Pasargadae](#), la più antica struttura [isolata alla base](#) nel mondo, [Persia](#), [VI secolo a.C.](#)



Isolamento alla base

A. Chiarugi, G. Terenzi: "Sperimentazione dinamica di una struttura in acciaio isolata mediante dispositivi silicnici", Atti del 9° Convegno Nazionale ANIDIS (CD-ROM), Torino, 20-23 settembre 1999



❑ Isolamento sismico

D.M. 26.01.96

B. Criteri generali di progettazione

B.1. Disposizioni preliminari

“..... Le costruzioni nelle quali sia prevista l’introduzione di isolatori sismici, di qualunque tipo, possono essere realizzate previa dichiarazione di idoneità del Presidente del Consiglio superiore dei lavori pubblici, su conforme parere dello stesso Consiglio.”

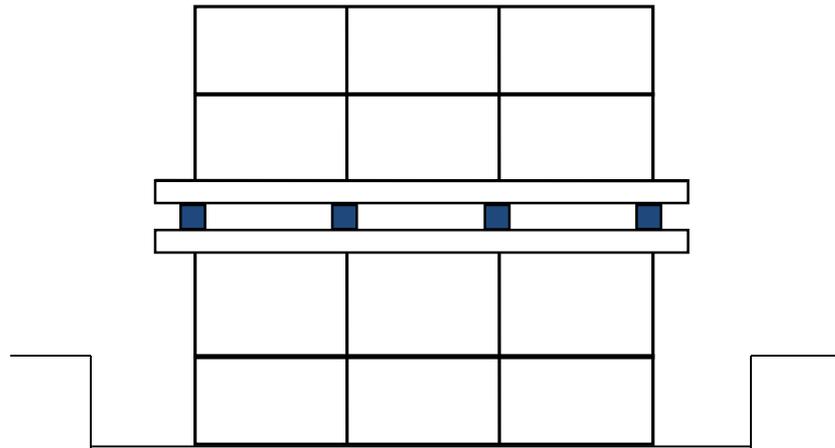
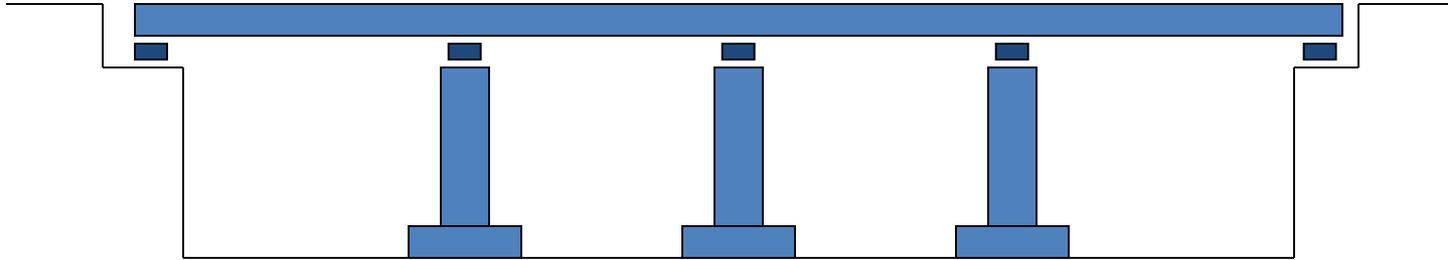
NTC 17/01/2008

(Cap. 7.10 Costruzioni e ponti con isolamento e/o dissipazione)

7.10.1 Scopo

“Il presente capitolo fornisce criteri e regole per il progetto di costruzioni e ponti nuovi e per l’adeguamento di quelli esistenti, nei quali un sistema d’isolamento sismico è posto al di sotto della costruzione medesima, o sotto una sua porzione rilevante, allo scopo di migliorarne la risposta nei confronti delle azioni sismiche orizzontali.”

Isolamento parziale



□ **Isolamento sismico**

NTC 14/01/2008 §11.9

I dispositivi facenti parte di un sistema di isolamento si distinguono in:

- **Isolatori** (sono dispositivi che svolgono fundamentalmente la funzione di sostegno dei carichi verticali, con elevata rigidezza in direzione verticale e bassa rigidezza o resistenza in direzione orizzontale, permettendo notevoli spostamenti);
- **Dispositivi ausiliari** (svolgono fundamentalmente la funzione di dissipazione di energia e/o ricentraggio del sistema e/o di vincolo laterale sotto carichi orizzontali di servizio (non sismici), rispetto alle azioni orizzontali).

NTC 14/01/2008 § 7.10 (§7.10.2 NTC 17/01/2018)

Il **sistema d'isolamento** è composto dai dispositivi d'isolamento, ciascuno dei quali espleta una o più delle seguenti funzioni:

- Sostegno dei carichi verticali con elevata rigidezza in direzione verticale e bassa rigidezza o resistenza in direzione orizzontale, permettendo notevoli spostamenti orizzontali;
- Dissipazione di energia, con meccanismi isteretici e/o viscosi;
- Ricentraggio del sistema;
- Vincolo laterale, con adeguata rigidezza, sotto carichi orizzontali di servizio (non sismici).

Fanno parte integrante del sistema d'isolamento gli elementi di connessione, nonché eventuali vincoli supplementari disposti per limitare gli spostamenti orizzontali dovuti ad azioni non sismiche (ad es. vento).

NTC 14/01/2008 §10.7 (§7.10.2 NTC 17/01/2018)

Detta **“interfaccia d’isolamento”** la superficie di separazione sulla quale è attivo il sistema d’isolamento, si definiscono:

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

La sovrastuttura e la sottostruttura si devono mantenere sostanzialmente in campo elastico. Per questo la struttura può essere progettata con riferimento ai particolari costruttivi della zona 4 con deroga, per le strutture in c.a., a quanto previsto al § 7.4.6.

Un’affidabilità superiore è richiesta al sistema d’isolamento, formato dall’insieme dei dispositivi d’isolamento, per il ruolo critico che esso svolge. Tale affidabilità si ritiene conseguita se il sistema d’isolamento è progettato e verificato sperimentalmente secondo quanto stabilito nel §11.9.

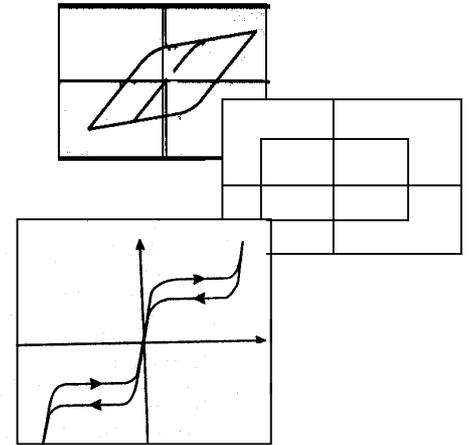
NTC 14/01/2008 (§11.9) e Circolare 617 §C11.9

Si distingue fra:

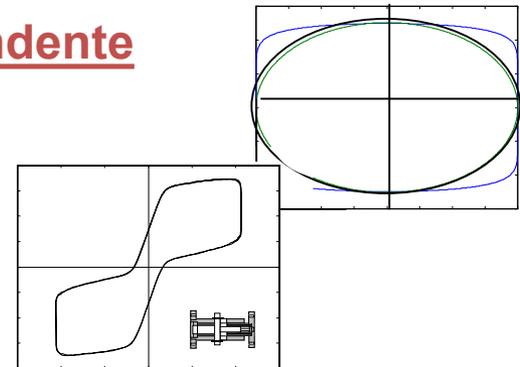
1. Dispositivi di vincolo temporaneo (fusibili e “Shock transmitter”);
2. Dispositivi dipendenti dallo spostamento;
3. Dispositivi dipendenti dalla velocità;
4. Dispositivi di isolamento (isolatori elastomerici ed isolatori a scorrimento)

- ***Se l'isolatore funge da semplice dispositivo di appoggio, esso deve essere utilizzato congiuntamente ai dispositivi ausiliari, a cui si devono gli altri requisiti di elementi elastici, dissipativi e ricentranti***

- **Dispositivi a comportamento non lineare, indipendente dalla velocità di deformazione**

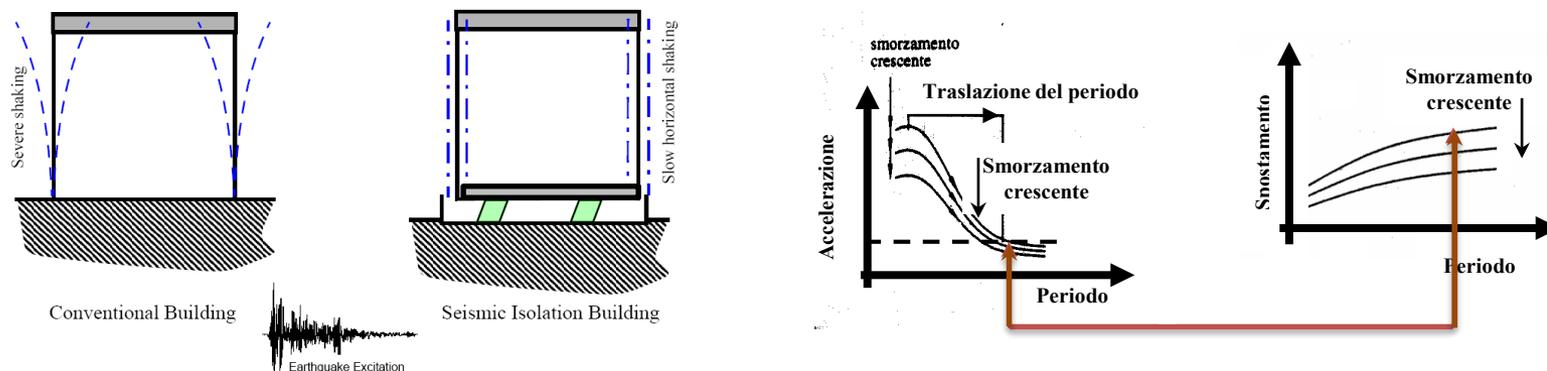


- **Dispositivi a comportamento viscoso, dipendente dalla velocità di deformazione**



Bilancio energetico della risposta sotto l'azione sismica

(b) Struttura dotata di un sistema d'isolamento sismico

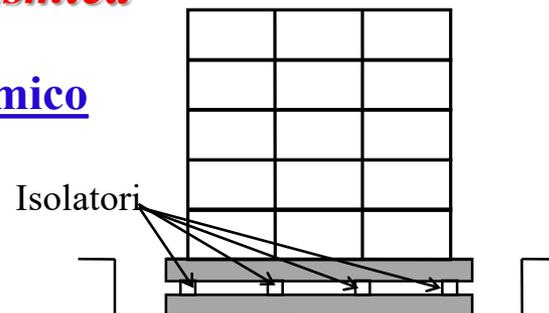


S'introducono due nuovi gradi di libertà,
uno per ciascuna delle due direzioni principali in pianta,
che determinano nuovi modi fondamentali di vibrazione, sempre per ciascuna direzione,
cui viene associato quasi il 100% della massa "sismica" della sovrastruttura
(ciò determina una grande riduzione di spostamenti e sollecitazioni su quest'ultima
rispetto ad una struttura progettata tradizionalmente)

**Il sistema deve possedere anche una certa capacità dissipativa (ξ_{sup-is}),
al fine di mantenere gli spostamenti del piano d'isolamento
entro limiti tecnicamente accettabili
(soprattutto per quanto riguarda i giunti dell'impiantistica che attraversa tale piano)**

Bilancio energetico della risposta sotto l'azione sismica

(b) Struttura dotata di un sistema d'isolamento sismico

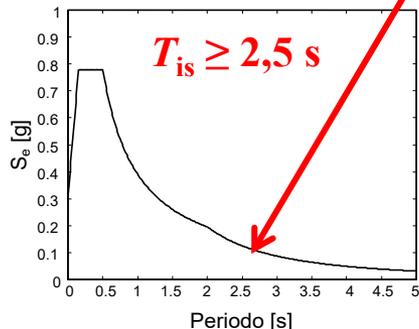


azioni con P_{VR}
del $5\%/V_R$

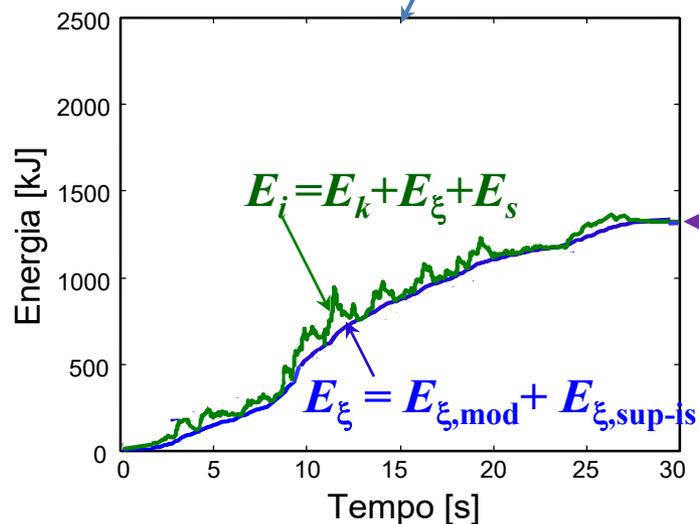
Risposta elastica

(con eventuale
piccolo beneficio di
un fattore $1 \leq q < 1,5$)

$$E_k + E_\xi + E_s = E_i$$



Esempio di risposta all'azione scalata all'intensità
corrispondente ad un evento con P_{VR} del $5\%/V_R$



$$E_i^f = E_{\xi,mod}^f + E_{\xi,sup-is}^f$$

□ **Isolamento sismico** Conferme dell'efficacia



USC Hospital a Los Angeles: ha resistito indenne al terremoto di Northridge, California, USA (1994) (~ 30 km dall'epicentro; $A_{is}/A_{conv} \sim 1/9$).



← **Isolatori in gomma-piombo (LRB)**

Isolatori in gomma a basso smorzamento (LDRB) →



e dissipatori elastoplastici (EPD) →



Ministero delle Poste e Telecomunicazioni di Sanda City: ha resistito indenne al terremoto di Great Hanshin-Awaji, Kobe, Giappone (1995) (~ 30 km dall'epicentro; $A_{is}/A_{conv} \sim 1/9$).

□ **Isolamento sismico** Conferme dell'efficacia

**Edificio di 3 piani della
Matsumura Gumi (Sanda
City)**



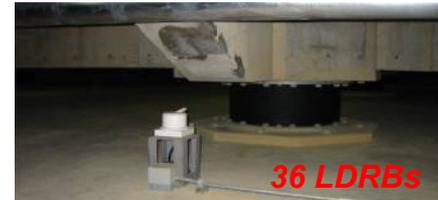
Terremoto di Great-Hanshin
Awaji (Hyogoken Nanbu) del
1995 (M=7.2, 6500 morti)

**ULTERIORI
EDIFICI ISOLATI
GIAPPONESI
COLPITI DA
TERREMOTI**

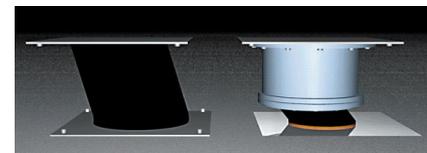
**Centro computerizzato in c.a. di 2 piani con
basamento di 1 piano (Sendai City)**



**Edificio ad uso uffici
di 18 piani
(Sendai City): primo
in Giappone
più alto di 60 m**



Terremoto di "Miyagi-
Oki" del 2003 (M=7.0)
(16 feriti)



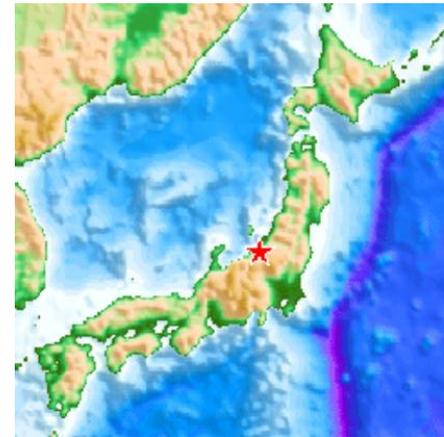
Rubber Bearing

Sliding Bearing

□ **Isolamento sismico**
Conferme dell'efficacia

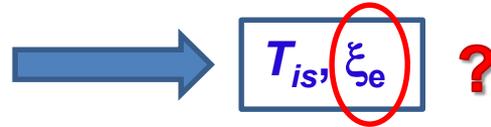


**Terremoto di
Mid Niigata,
ottobre 2004
($M=6,8$ – oltre 40
vittime)**



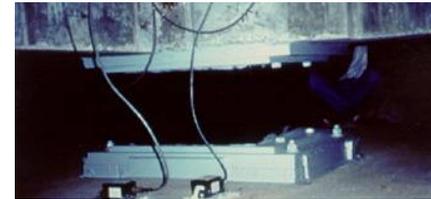
**Edificio in c.a. costruito
a Ojiya City nel 1996
(spostamento laterale
massimo = 15 cm)**

Parametri di progetto di un sistema d'isolamento sismico

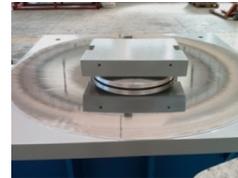


I sistemi d'isolamento sismico maggiormente applicati in Italia

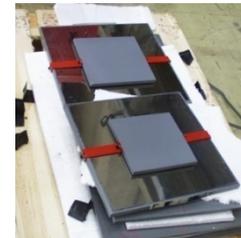
- a. HDRB (“High Damping Rubber Bearings”);
LRB (“Lead Rubber Bearings”) – edifici regolari
- b. HDRB o LRB + Appoggi scorrevoli di più tipi
(generalmente in acciaio-PTFE)

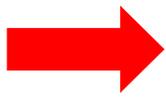


- c. FPI (“Friction Pendulum Isolators”)

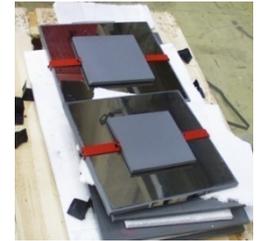


- d. Appoggi scorrevoli + Dissipatori di vari tipi
(ponti e, recentemente, un primo edificio)



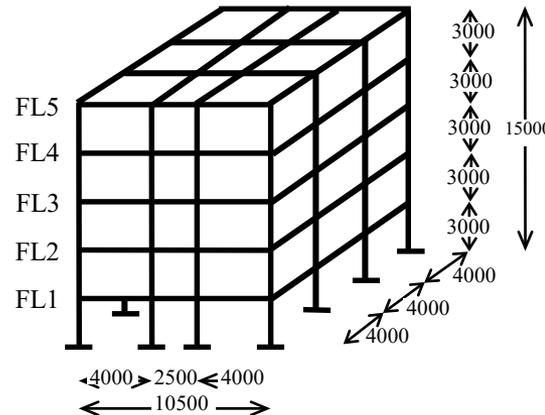


Ruolo della dissipazione nella progettazione di sistemi d'isolamento alla base



Applicazione simulata del sistema BIS ad edifici a struttura intelaiata in cemento armato ed in acciaio

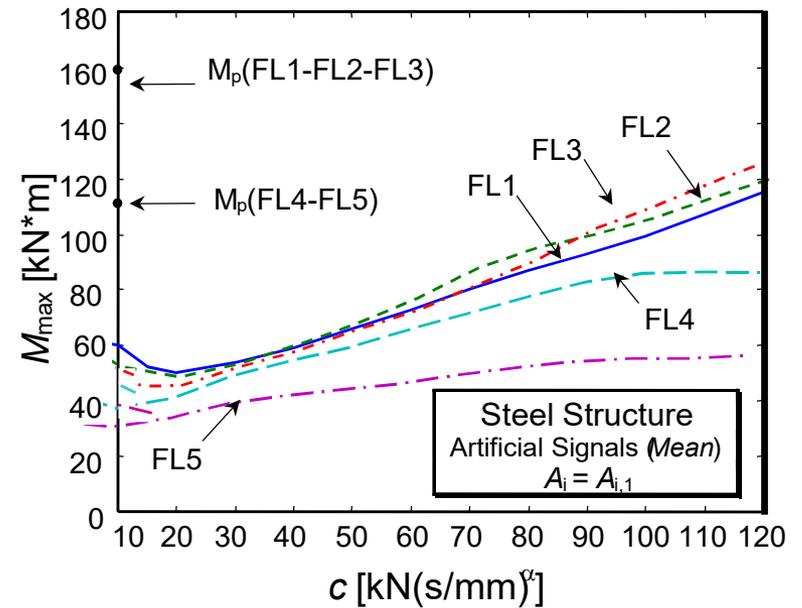
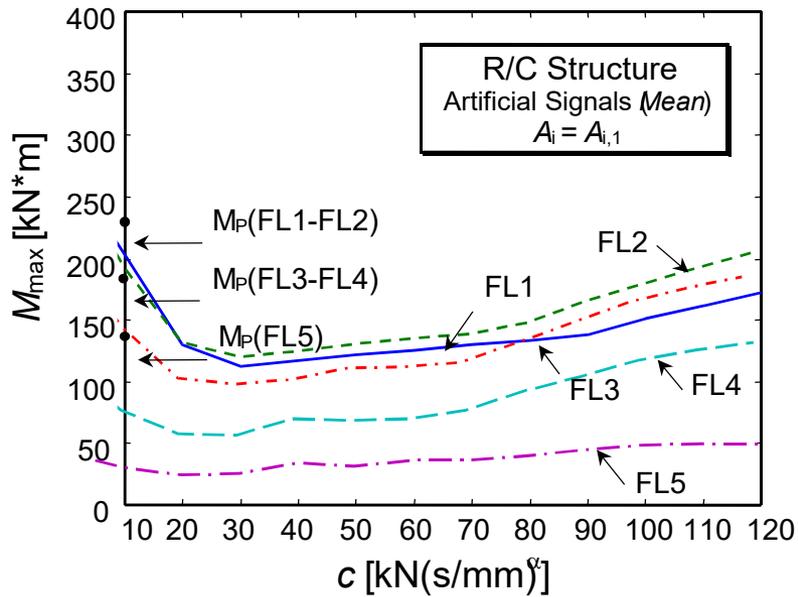
S. Sorace, G. Terenzi (2001). Non-linear dynamic design procedure of FV spring-dampers for base isolation—Frame building applications, *Engineering Structures*, Vol. 23, pp. 1568-1576, Munro Prize Awarded.



Floor	R/C structure	
	Columns (mm x mm)	Beams (mm x mm)
1	□ 400x400	T 500x500x 240x200
2	□ 350x350	T 500x500x 240x200
3	□ 350x350	T 500x500x 240x200
4	□ 300x300	T 500x500x 240x200
5	□ 300x300	T 500x500x 240x200

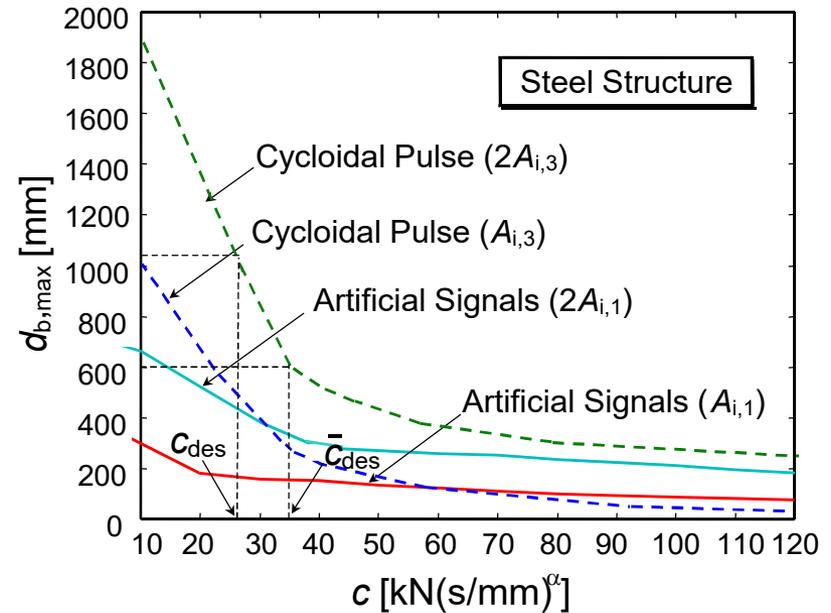
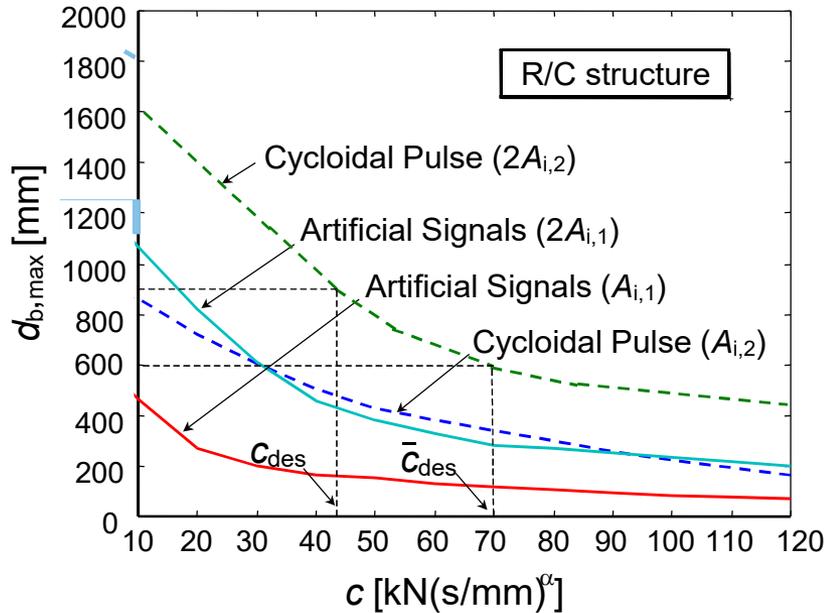
Floor	Steel structure	
	Columns (profiles)	Beams (profiles)
1	HEB220	HEB180
2	HEB200	HEB180
3	HEB180	HEB180
4	HEB160	HEA180
5	HEB160	HEA180

Valutazione della risposta per differenti assunzioni di c Valori massimi del momento sulle travate



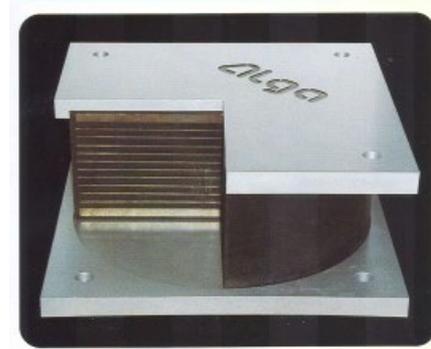
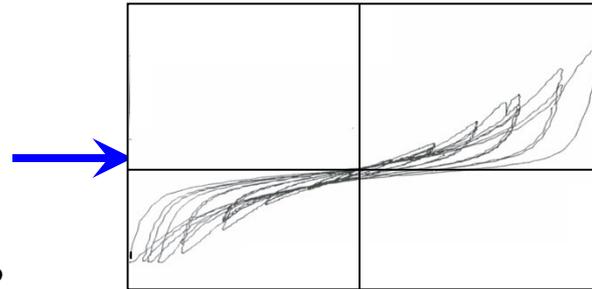
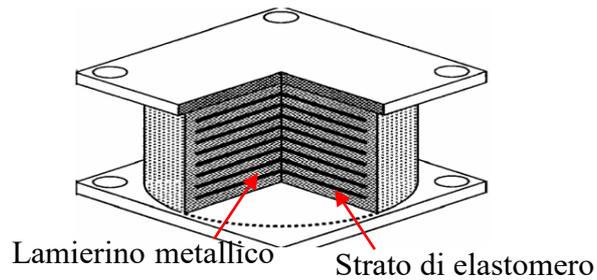
Intervallo di η ottimale = 0,5÷1 ($\xi = 0,25\div 0,5$)

Valori massimi degli spostamenti alla base

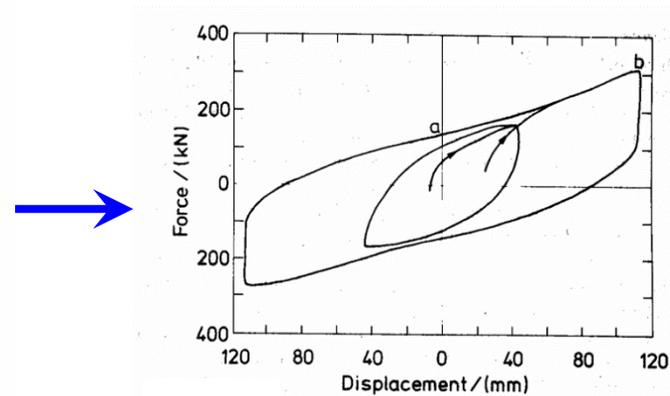
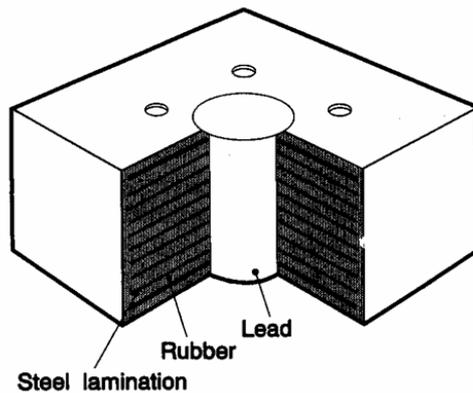


Nota: Oltre un certo valore, l'aumento di c non comporta ulteriori significative riduzioni degli spostamenti alla base, causando invece l'eccitazione di modi di vibrazione superiori al primo sulla sovrastruttura.

➤ **Isolatori elastomerici armati (High Damping Rubber Bearings – HDRB)**



➤ **Isolatori elastomerici con nucleo in piombo (Lead Rubber Bearings – LRB)**



➤ Isolatori elastomerici (NRB ed HDRB)

✓ Metodo di progetto

$$T_{is}, \xi_e$$

SPOSTAMENTO 100 mm

SI-S	V kN	F _{zd} kN	K _e kN/mm	K _v kN/mm	D _g mm	t _e mm	h mm	H mm	Z mm	W kg
SI-S 300/52	490	1860	0.54	584	300	52	116	166	350	84
SI-S 350/50	700	3010	0.77	779	350	50	108	158	400	109
SI-S 400/50	1150	4680	1.01	1246	400	50	108	158	450	140
SI-S 450/54	1540	5770	1.18	1369	450	54	118	168	500	183
SI-S 500/54	2230	8050	1.45	1962	500	54	118	168	550	224
SI-S 550/56	2720	9310	1.70	2153	550	56	117	167	600	265
SI-S 600/56	3200	10310	2.02	2438	600	56	114	164	650	307
SI-S 650/54	3650	10830	2.46	2848	650	54	109	159	700	351
SI-S 700/60	4460	11370	2.57	2871	700	60	125	185	750	481
SI-S 800/60	6930	14990	3.35	4519	800	60	125	185	850	624
SI-S 900/60	8480	21220	4.24	5317	900	60	126	186	950	790
SI-S 1000/70	10940	22590	4.49	5316	1000	70	146	226	1050	1214
SI-S 1100/70	14840	27460	5.43	7324	1100	70	146	226	1150	1463
SI-S 1200/80	17990	28700	5.66	7224	1200	80	156	236	1250	1750

SI-N	V kN	F _{zd} kN	K _e kN/mm	K _v kN/mm	D _g mm	t _e mm	h mm	H mm	Z mm	W kg
SI-N 300/52	920	2610	1.09	879	300	52	116	166	350	84
SI-N 350/50	1400	3510	1.54	1195	350	50	108	158	400	109
SI-N 400/50	2300	4680	2.01	1824	400	50	108	158	450	140
SI-N 450/54	3080	7510	2.36	2044	450	54	118	168	500	183
SI-N 500/54	4470	9380	2.91	2822	500	54	118	168	550	224
SI-N 550/56	5440	9820	3.39	3156	550	56	117	167	600	265
SI-N 600/56	6410	10310	4.04	3627	600	56	114	164	650	307
SI-N 650/54	7310	10830	4.92	4286	650	54	109	159	700	351
SI-N 700/60	8920	11370	5.13	4362	700	60	125	185	750	481
SI-N 800/60	12690	14990	6.70	6557	800	60	125	185	850	624
SI-N 900/60	16960	21220	8.48	7879	900	60	126	186	950	790
SI-N 1000/70	19830	22590	8.98	8000	1000	70	146	226	1050	1214
SI-N 1100/70	24420	27460	10.86	10668	1100	70	146	226	1150	1463
SI-N 1200/80	25800	28700	11.31	10684	1200	80	156	236	1250	1750

➤ Isolatori elastomerici (NRB ed HDRB)

✓ Metodo di progetto

SI-H	V kN	F _{zd} kN	K _e kN/mm	K _v kN/mm	D _g mm	t _e mm	h mm	H mm	Z mm	W kg
SI-H 300/52	920	2610	1.90	1122	300	52	116	166	350	84
SI-H 350/50	2240	3510	2.69	1550	350	50	108	158	400	109
SI-H 400/50	3200	4680	3.52	2276	400	50	108	158	450	140
SI-H 450/54	5400	7510	4.12	2592	450	54	118	168	500	183
SI-H 500/54	7040	9380	5.09	3475	500	54	118	168	550	224
SI-H 550/56	7610	9820	5.94	3944	550	56	117	167	600	265
SI-H 600/56	8190	10310	7.07	4585	600	56	114	164	650	307
SI-H 650/54	8770	10830	8.60	5470	650	54	109	159	700	351
SI-H 700/60	9370	11370	8.98	5612	700	60	125	185	750	481
SI-H 800/60	12690	14990	11.73	8129	800	60	125	185	850	624
SI-H 900/60	18340	21220	14.84	9930	900	60	126	186	950	790
SI-H 1000/70	19830	22590	15.71	10210	1000	70	146	226	1050	1214
SI-H 1100/70	24420	27460	19.01	13263	1100	70	146	226	1150	1463
SI-H 1200/80	25800	28700	19.79	13443	1200	80	156	236	1250	1750

Legenda

V	Carico verticale massimo agente sull'isolatore in presenza di sisma corrispondente allo SLC
F _{zd}	Carico verticale massimo agente sull'isolatore in assenza di sisma (SLU), concomitante con rotazione 0 e spostamento orizzontale 10 mm
K _e	Rigidezza orizzontale equivalente
K _v	Rigidezza verticale
D _g	Diametro elastomero
t _e	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

➤ Isolatori elastomerici (NRB ed HDRB)

✓ Metodo di progetto

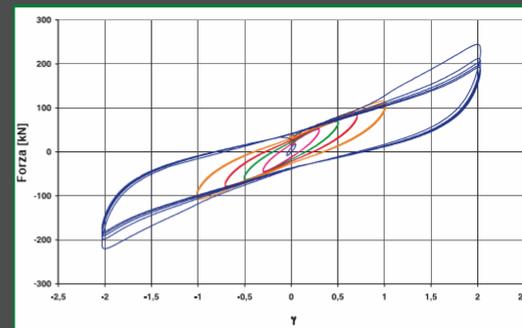
ELASTOMERI

Le mescole elastomeriche utilizzate per la produzione degli isolatori elastomerici della serie **SI** sono caratterizzate da un modulo dinamico equivalente a taglio G_{din} 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.

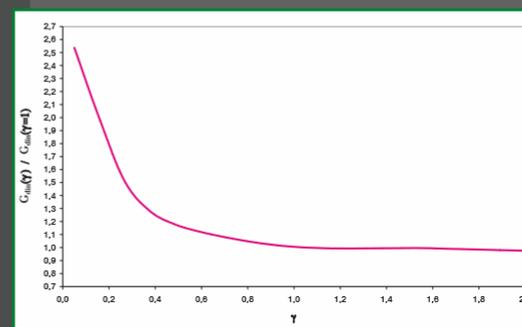
In tabella vengono riportate alcune proprietà fisico-meccaniche relative alle tre mescole standard.

PROPRIETÀ	MESCOLA		
	MORBIDA (SOFT - S)	NORMALE (NORMAL - N)	DURA (HARD - H)
Durezza (Shore A)	40	60	75
Modulo di elasticità tangenziale G_{din} a $\gamma = 1$ (MPa)	0.4	0.8	1.4
Coefficiente di smorzamento viscoso equivalente ξ a $\gamma = 1$ (%)	10 / 15	10 / 15	10 / 15

Le mescole elastomeriche ad alto smorzamento sono caratterizzate da una sensibile variazione del modulo di taglio G_{din} al variare della deformazione di taglio γ per deformazioni $\gamma < 0.5$. Ciò consente di evitare spostamenti eccessivi a fronte di eccitazioni dinamiche di bassa intensità, come quelle dovute al vento.

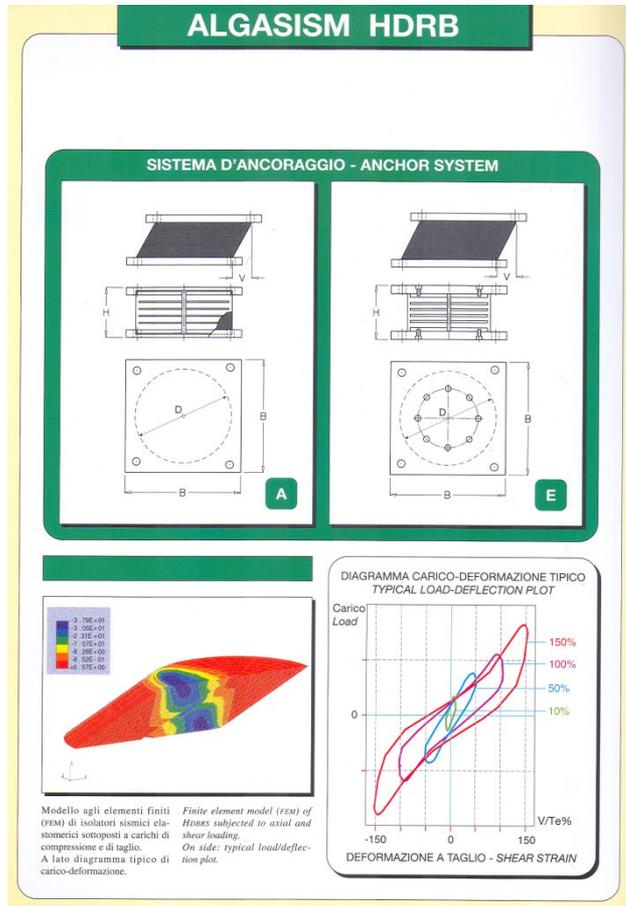


Tipico diagramma isteretico di un isolatore elastomerico ottenuto in prove dinamiche ad ampiezza crescente.



Variazione media del modulo dinamico equivalente a taglio G_{din} in funzione della deformazione di taglio γ .

✓ Metodo di progetto



CARATTERISTICHE FISICO-MECCANICHE HDRB HDRB PHYSICAL-MECHANICAL CHARACTERISTICS

Caratteristiche Characteristics		Miscela - Compound		
		Morbida Soft	Normale Normal	Dura Hard
Durezza Hardness	Shore A3	40±3	60±3	75±3
Resistenza a rottura Tensile strength	N/mm ²	20	20	18
Allungamento a rottura Tensile strength	%	750	600	500
Modulo di elasticità G G modulus	N/mm ²	0.4	0.8	1.4
Smorzamento viscoso equivalente - Equivalent viscous damping	%	10	10	16
Isolatore corrispondente Corresponding HDRB		HDS	HDN	HDH

Isolatori elastomerici

Fattori di forma:

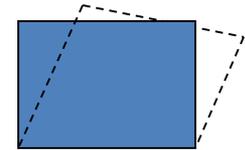
Fattore di forma primario $\Rightarrow S_1 = A'/L$ \longrightarrow



A' = area della singola piastra d'acciaio;

L = area laterale libera del singolo strato di elastomero.

Fattore di forma secondario $\Rightarrow S_2 = D/t_e$ \longrightarrow



D = dimensione in pianta della singola piastra d'acciaio;

t_e = spessore totale degli strati di elastomero, ottenuto come somma dei contributi dei singoli strati, maggiorando quelli più esterni di un fattore 1,4, se maggiori di 3 mm.

Parametri sintetici di progetto:

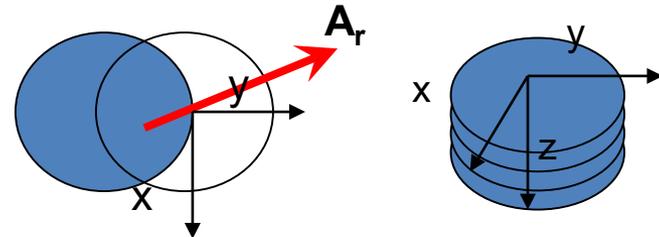
Rigidità equivalente $\Rightarrow K_e = F/d = G_{din} A/t_e$

Smorzamento viscoso equivalente $\Rightarrow \xi_e = W_d/(2\pi Fd) = \eta/2$

Predimensionamento dei dispositivi elastomerici

1. Valutazione dei carichi compressivi verticali che dovranno gravare su ciascun dispositivo ($W_{\max} = V_{\max}$);
2. Calcolo della tensione verticale limite in funzione della durezza e del valore di G (deve comunque valere la limitazione: $\sigma_v \leq 15 \text{ N/mm}^2$ per l'intero carico di progetto);
3. Determinazione dell'area della sezione trasversale A a partire dalla valutazione della minima area di sovrapposizione fra le basi, A_r :

$$A_r = \frac{F_z}{\sigma_v} = \frac{F_z}{15(\text{N/mm}^2)} = \frac{V_{\max}}{15(\text{N/mm}^2)}$$



e ponendo $A_r/A=0.6$ (Skinner et al., 1992)

4. Definizione di $T_b = T_{is}$ e quindi della rigidezza $K_b = K_e$ degli appoggi:

Dall'Ordinanza n. 3274 alle NTC 2008

$$T_b = 2\pi \sqrt{\left(\frac{W_{\max}}{gK_r}\right)} = T_{is} = 2\pi \sqrt{\frac{V_{\max}}{gK_e}}$$

$$K_b = 4\pi^2 \frac{W_{\max}}{T_{is}^2 g} = K_e = 4\pi^2 \frac{V_{\max}}{T_{is}^2 g}$$

5. Valutazione dell'altezza totale della gomma dalla relazione fra tale parametro e la rigidità $K_b = K_e$:

Dall'Ordinanza n. 3274 alle NTC2008

$$K_b = \frac{GA}{h} = K_e = \frac{G_{din} A}{t_e}$$

$$h = \frac{GA}{K_b} = t_e = \frac{G_{din} A}{K_e}$$

$$G_{din} = Ft_e / (Ad) \Rightarrow \text{per } d = t_e$$

6. Tenendo conto che lo spostamento verticale dell'appoggio è somma di due contributi di cui l'uno correlato alla sollecitazione di taglio, l'altro a variazione di volume, la rigidità verticale risulta data dalla seguente relazione (Skinner et al. 1992):

$$K_z = \frac{K_z(\gamma)K_z(V)}{K_z(\gamma) + K_z(V)} = \frac{6GS_1^2 AE_0(1 + 2\beta S_1^2)}{h[6GS_1^2 + E_0(1 + 2\beta S_1^2)]}$$

ove:

$K_z(\gamma)$ = rigidità verticale dell'appoggio senza variazione di volume = $6GS_1^2 A/h$;

$K_z(V)$ = rigidità verticale connessa alle variazioni di volume = $E_c A/h$;

$E_c = E_0(1+2\beta S_1^2)$ = modulo di compressione apparente, con $\beta = 1$ per gomma soffice, $\beta = 0,7$ per gomme da isolamento; E_0 = modulo di Young della gomma = $3G$ (Derham and Thomas, 1980).

Derham, C.J. And Thomas, A.G. (1980). The design and use of rubber bearings for vibration isolation and seismic protection of structures, Engineering Structures, Vol. 2

NTC 2008

$E_c = (1/(6G_{din} S_1^2) + 4/(3E_b))^{-1}$ = modulo di compressibilità assiale valutato in MPa, essendo E_b il modulo di compressibilità volumetrica della gomma, da assumere pari a 2000 MPa in assenza di determinazione diretta

Valori di S_1 (fattore di forma primario) preferibilmente da assumere ai fini progettuali: 10÷20.

Per evitare fenomeni di dondolamento della sovrastruttura occorre stabilire un valore di S_1 tale che la rigidezza verticale sia $>800 K_b$. Imponendo tale condizione nell'espressione di K_v , si può ottenere il valore di S_1 dalla soluzione della seguente equazione:

$$S_1^4 (12\beta E_0) + S_1^2 (6E_0 - 1600\beta E_0 - 4800G) - 800E_0 = 0$$

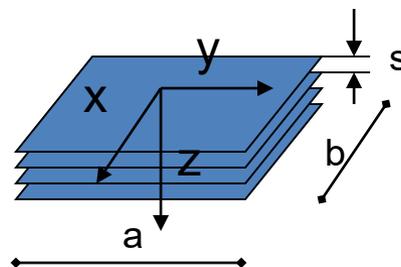
Si fissa pertanto S_1 e si calcola lo spessore di ciascuno strato s :

Fattore di forma primario S_1 per apparecchi rettangolari aventi dimensioni in pianta pari ad a e b , e spessore di ogni strato di gomma interno s :

$$S_1 = \frac{ab}{2s(a+b)}$$



$$s = \frac{ab}{2S_1(a+b)} = t_i$$

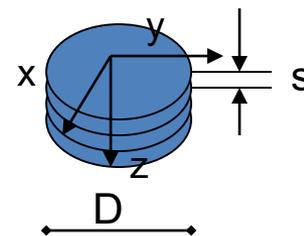


Fattore di forma primario S_1 per apparecchi circolari aventi diametro D , e spessore di ogni strato di gomma interno s :

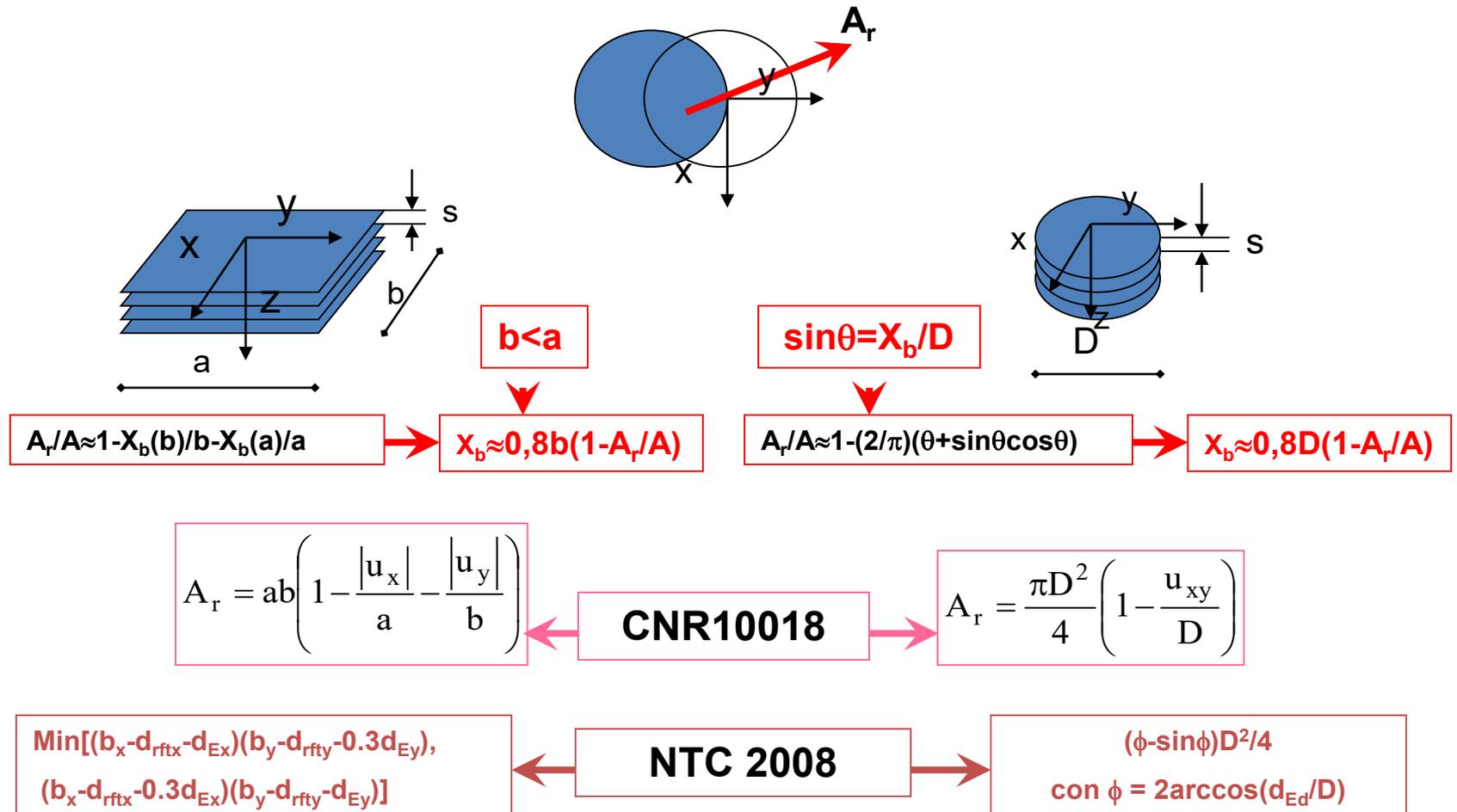
$$S_1 = \frac{D}{4s}$$



$$s = \frac{D}{4S_1} = t_i$$



7. Si riverifica lo spostamento limite $X_b = d=d_2$ (Azioni con P_{VR} del 5%/V_R): $X_b = h\gamma_s$, essendo γ_s (deformazione massima per taglio) dipendente dal minimo rapporto di sovrapposizione fra le aree A_r/A (Skinner et al. 1992):



8. Dimensionamento delle armature metalliche dalla condizione di verifica degli stati tensionali negli inserti in acciaio.

(NTC 14/01/2008 – §11.9, §C11.9 – verifica degli stati tensionali negli inserti d'acciaio)

$$\sigma_s = 1,3V(t_1+t_2)/(A_r t_s) \leq f_{yk}$$



$$t_s = \frac{1,3V(t_1 + t_2)}{f_{yk} A_r} \longrightarrow \geq 2 \text{ mm}$$

NTC 14/01/2008 (§11.9, §C11.9)

Verifica allo SLU degli isolatori elastomerici

➤ **Verifica dello stato tensionale negli inserti in acciaio**

$$\sigma_s = 1,3V(t_1+t_2)/(A_r t_s) \leq f_{yk}$$

σ_s = tensione massima agente nella generica piastra in acciaio;

f_{yk} = tensione caratteristica di snervamento dell'acciaio;

V = Carico verticale di progetto agente sull'isolatore in presenza di sisma;

t_1, t_2 = spessore dei due strati di elastomero direttamente a contatto con la piastra considerata;

t_s = spessore della piastra di verifica ($t_s \geq 2$ mm);

A_r = area ridotta efficace dell'isolatore calcolata come segue:

isolatori rettangolari con lati b_x e $b_y \Rightarrow$

$$\text{Min}[(b_x - d_{rftx} - d_{Ex})(b_y - d_{rfty} - 0.3d_{Ey}), (b_x - d_{rftx} - 0.3d_{Ex})(b_y - d_{rfty} - d_{Ey})];$$

d_{rftx} , d_{rfty} = spostamenti relativi tra le due facce (superiore e inferiore) degli isolatori, prodotti dalle azioni di ritiro, fluage e termiche (ridotte al 50%), ove rilevanti;

d_{Ex} , d_{Ey} = spostamenti relativi tra le due facce (superiore e inferiore) degli isolatori, prodotti dall'azione sismica agenti nelle direzioni x ed y;

isolatori circolari di diametro $D \Rightarrow$

$$(\phi - \sin\phi)D^2/4 \text{ con } \phi = 2\arccos(d_2/D)$$

d_2 = spostamento di progetto di livello L4

➤ **Deformazione massima di taglio sugli isolatori**

Devono risultare soddisfatte le condizioni:

$$\gamma_t \leq 5$$

$$\gamma_s \leq \gamma^*/1,5 \leq 2$$

($\Rightarrow \gamma^*$ = deformazione di taglio massima raggiunta nelle prove di qualificazione relative all'efficacia dell'aderenza elastomero-acciaio, senza segni di rottura).

$\gamma_t = \gamma_c + \gamma_s + \gamma_\alpha$ = deformazione di taglio totale di progetto;

$\gamma_c = 1,5V/(S_1 G_{din} A_r)$ = deformazione di taglio dell'elastomero prodotta dalla compressione;

S_1 = fattore di forma primario che quantifica il rapporto fra rigidità assiale e trasversale del dispositivo = A'/L ;

A' = area della superficie comune alla singola piastra d'acciaio ed allo strato di elastomero depurata degli eventuali fori (se non riempiti successivamente);

L = superficie laterale libera del singolo strato di elastomero di un isolatore elastomerico maggiorata degli eventuali fori;

$\gamma_s = d_E/t_e$; deformazione di taglio dell'elastomero prodotta dallo spostamento sismico totale, inclusi gli effetti torsionali;

$$d_E = \text{Max}\{[(d_{EX} + d_{rftx})^2 + (0,3d_{EY} + d_{rfty})^2]^{1/2}, [(0,3d_{EX} + d_{rftx})^2 + (d_{EY} + d_{rfty})^2]^{1/2}\};$$

$\gamma_\alpha = a^2/(2t_i t_e) =$ deformazione di taglio dovuta alla rotazione angolare;

$t_i =$ spessore del singolo strato di elastomero;

$a^2 =$ dimensione equivalente, usata per valutare la deformazione di taglio per rotazione in:

isolatori rettangolari con lati b_x e b_y e rotazioni $\alpha_x, \alpha_y \Rightarrow$

$$(\alpha_x b_x^2 + \alpha_y b_y^2)$$

$\alpha_x, \alpha_y =$ rotazioni relative fra le facce superiore ed inferiore di un isolatore elastomerico rispettivamente attorno alle direzioni x ed y;

isolatori circolari di diametro $D \Rightarrow$

$$3\alpha D^2/4 \longrightarrow \alpha = (\alpha_x^2 + \alpha_y^2)^{1/2}.$$

➤ Instabilità

Il carico massimo verticale agente sul singolo isolatore dovrà essere inferiore al carico critico V_{cr} diviso per un coefficiente di sicurezza pari a 2.

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

$$V_{b,max} \leq V_{cr} / 2$$

isolatori rettangolari con lati b_x e $b_y \Rightarrow$

$$b_{min} = \min (b_x, b_y)$$

isolatori circolari di diametro $D \Rightarrow$

$$b_{min} = D$$

Il metodo precedente può essere sintetizzato con il seguente diagramma di flusso, articolato in tre fasi operative

Predimensionamento del sistema d'isolamento

Stage 1: Pre-sizing of the isolators and determination of their number and distribution in plan

1.a Estimation of the total linear equivalent stiffness, K_{eq} , of the base isolation system needed to obtain a linear equivalent period T_{is} .

$$K_{eq} = \frac{4\pi^2 W_{tot}}{g T_{is}^2}$$

1.b Evaluation of the number of HDRB isolators, n .

$$n = \frac{K_{eq}}{k_{e,des}}$$

where $k_{e,des}$ = minimum stiffness of the isolator providing the best combination of axial load capacity — to absorb the gravity loads of the structure — and horizontal stiffness characteristics — to fit the total stiffness of the system.

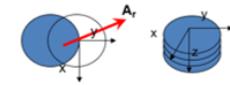
Terenzi Gloria, Sorace Stefano, Spinelli Paolo, Rossi Elena. Base isolation strategies for seismic retrofit of a historical elevated water tower. INGEGNERIA SISMICA – INTERNATIONAL JOURNAL OF EARTHQUAKE ENGINEERING, Anno XXXVI, n. 2, pp.137-157.

Dimensionamento degli isolatori

Stage 2: Final sizing of the isolators

2.a Evaluation of the minimum diameter D_{min} of the constituting steel plates.
From the minimum overlap condition

$$\frac{A_r}{A} = 0.6$$



aimed at preventing overturning, by computing A_r according to relation

$$A_r = \frac{W_i}{\sigma_v}$$

where W_i =axial load on the isolator, σ_v = vertical compression strength of rubber, equal to 15 N/mm², A is derived, from which

$$D_{min} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

2.b Evaluation and check of the Primary shape factor, S_1 .

In order to prevent rocking effects, the Primary shape factor $S_1=A/S_L$, where S_L =lateral surface of each rubber layer, is evaluated by imposing that the vertical stiffness $k_{z,des}$ of the isolator:

$$k_{z,des} = \frac{6GS_1^2E_0(1+2\beta S_1^2)}{t_e[6GS_1^2+E_0(1+2\beta S_1^2)]}$$

is no lower than 800 $k_{e,des}$. Fixing $k_{z,des}=800k_{e,des}$, the following equation is obtained:

$$S_1^4(12\beta E_0) + S_1^2(6E_0 - 1600\beta E_0 - 4800G) - 800E_0 = 0$$



which allows preliminarily checking whether S_1 is included in the optimal range [10, 20].

2.c Sizing of the internal and external rubber layer thicknesses, s_i and s_e .

$$s_i = \frac{D_{min}}{4S_1}$$

$$s_e = 1.4s_i$$

2.d Evaluation of the total height of the rubber layers, t_e .

$$t_e = \frac{D_{min}}{S_2}$$



with S_2 =Secondary shape factor= D_{min}/t_e , tentatively assumed equal to 4.

2.e Sizing of the steel plate thickness, t_s .

$$t_s = \frac{1.3W_i(2s_i)}{0.4 A_r f_{yk}}$$

where f_{yk} is the yielding stress of steel constituting the plates.

2.f Evaluation of the total height of the isolator, h_i , based on the s_i , s_e and t_s values tentatively fixed in steps 2.c and 2.e.

Verifica delle proprietà meccaniche degli isolatori

Stage 3: Checks on vertical stiffness, design displacements and stability

3.a Check on vertical stiffness

$$k_{z,des}/k_{e,des} \geq 800$$

3.b Check on design displacements

$$d_{max} \geq 0.8D \left(1 - \frac{A_r}{A}\right)$$

3.c Check on stability

$$W_i \leq \frac{V_{cr}}{2}$$

where V_{cr} is the critical value of the vertical force on the device, evaluated as follows:

$$V_{cr} = \frac{GA_r S_1 D}{t_e}$$

Terenzi Gloria, Sorace Stefano, Spinelli Paolo, Rossi Elena. Base isolation strategies for seismic retrofit of a historical elevated water tower. INGEGNERIA SISMICA – INTERNATIONAL JOURNAL OF EARTHQUAKE ENGINEERING, Anno XXXVI, n. 2, pp.137-157.