



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

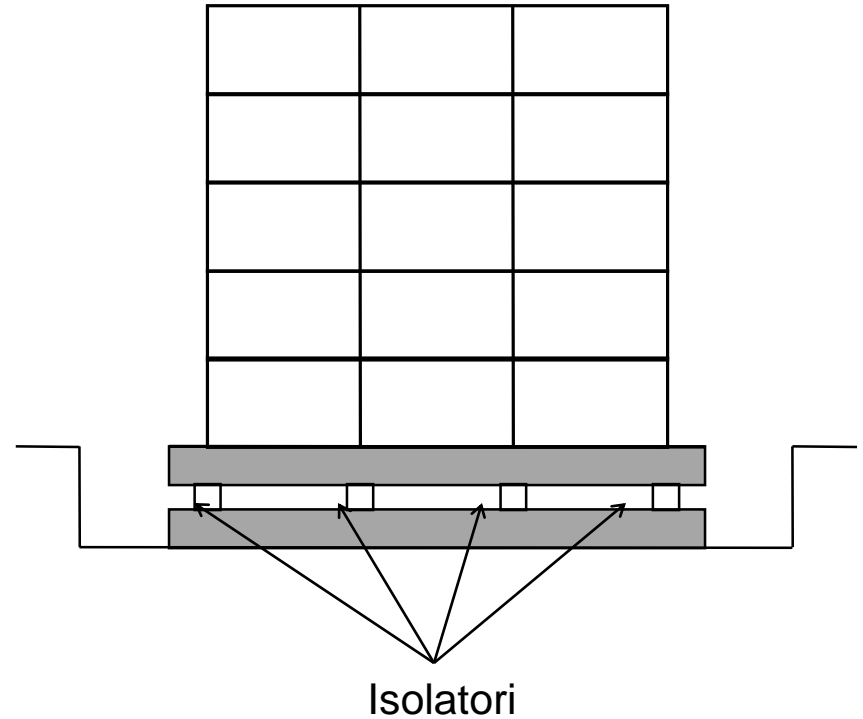
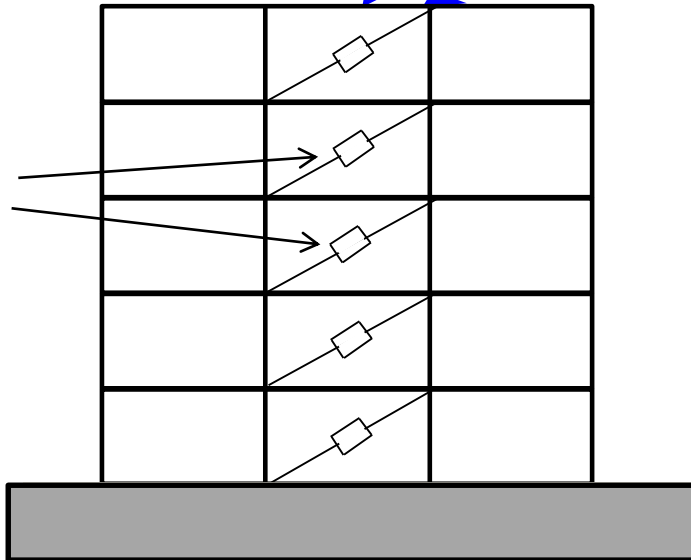
Bilancio energetico

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

Dissipazione supplementare di energia

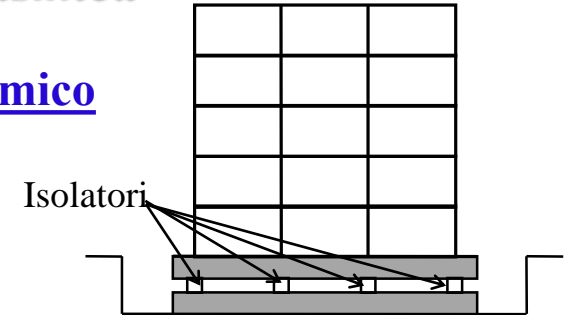
Isolamento alla base

Dispositivi dissipativi



Bilancio energetico della risposta sotto l'azione sismica

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

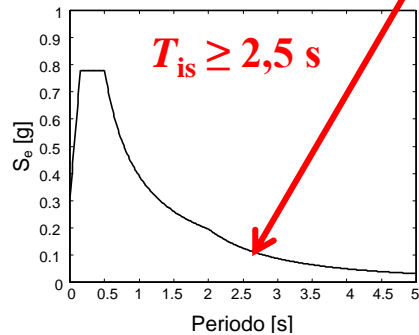


azioni con P_{VR}
del $5\%/V_R$

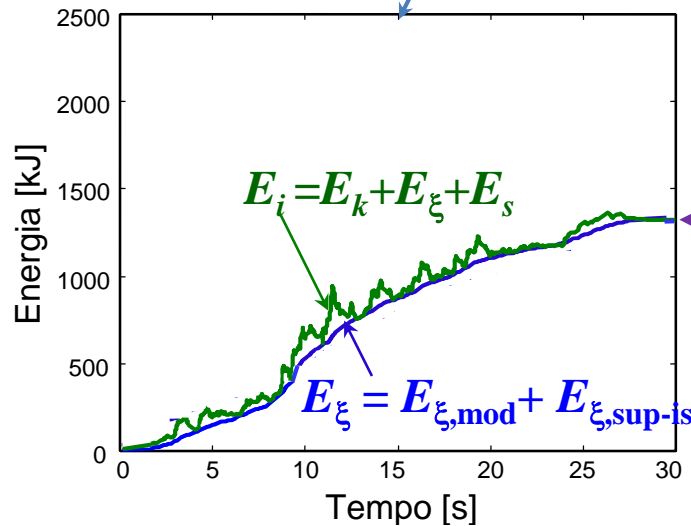
Risposta elastica

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

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

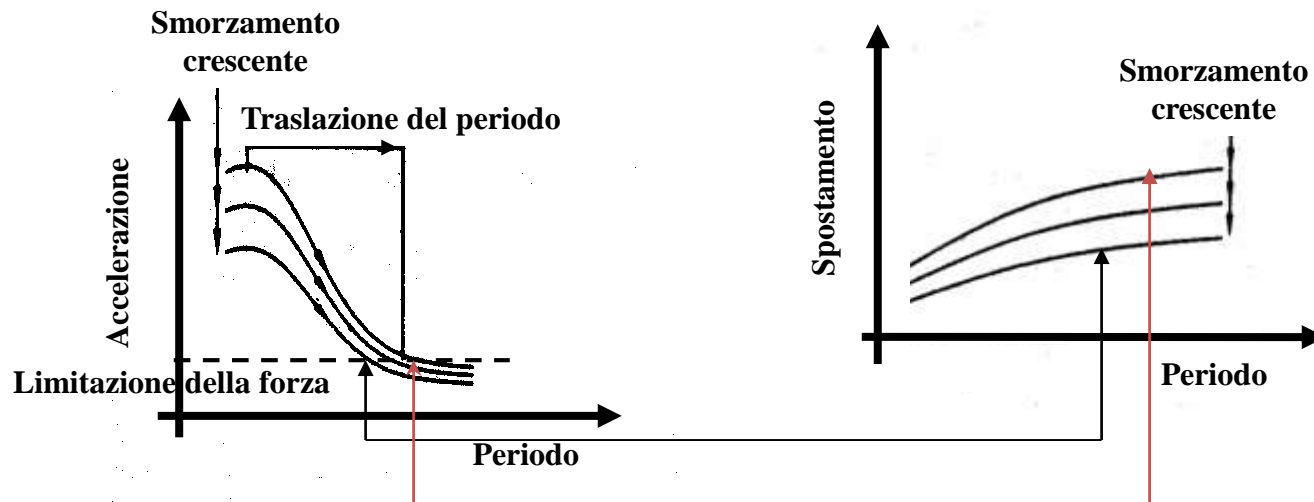


Esempio di risposta all'azione scalata all'intensità corrispondente ad un evento con P_{VR} del $5\%/V_R$



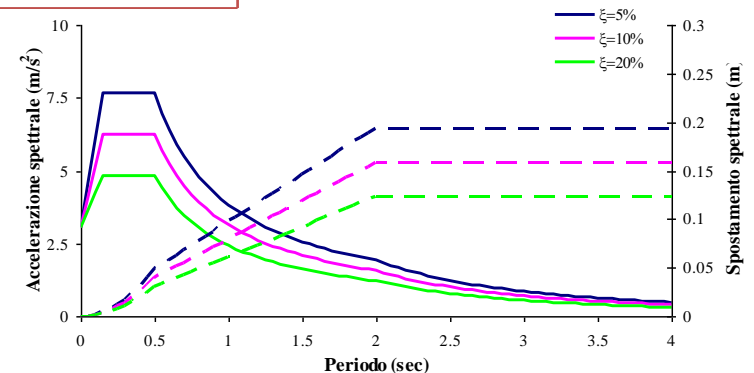
$$E_i^f = E_{\xi,mod}^f + E_{\xi,sup-is}^f$$

➤ **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**

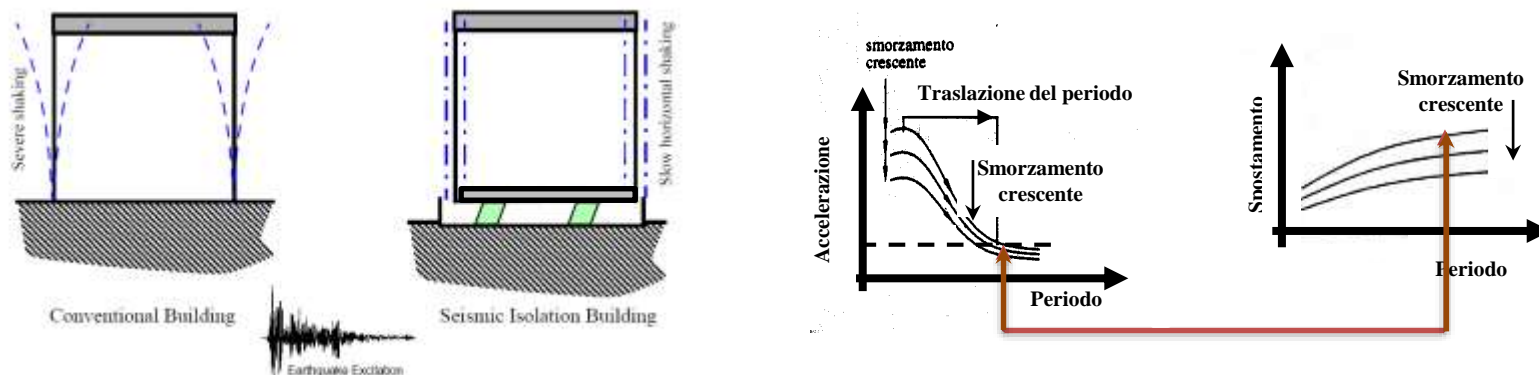


NTC 14/01/2008: §7.10 e §11.9

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

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)**

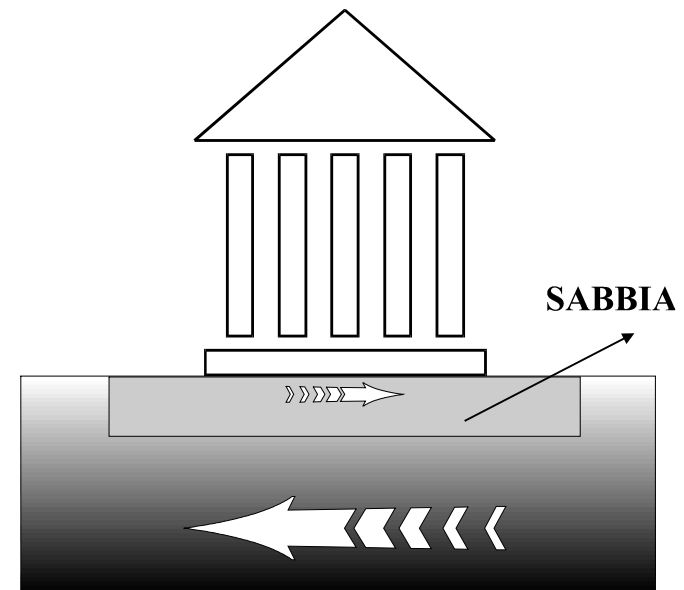
□ Isolamento sismico

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

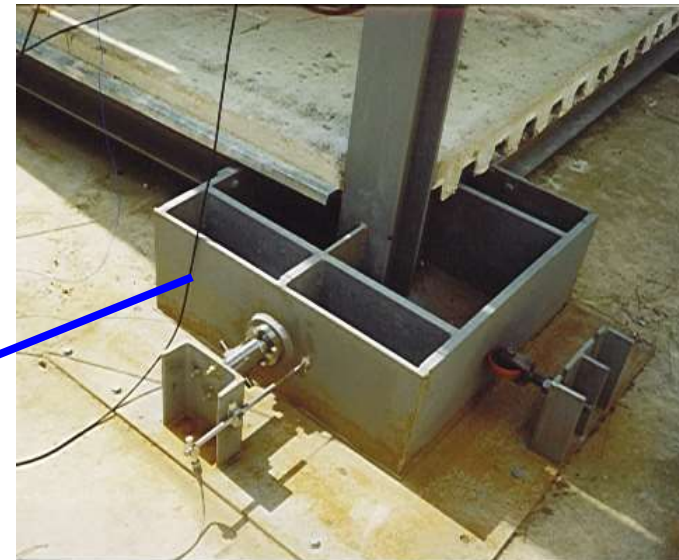
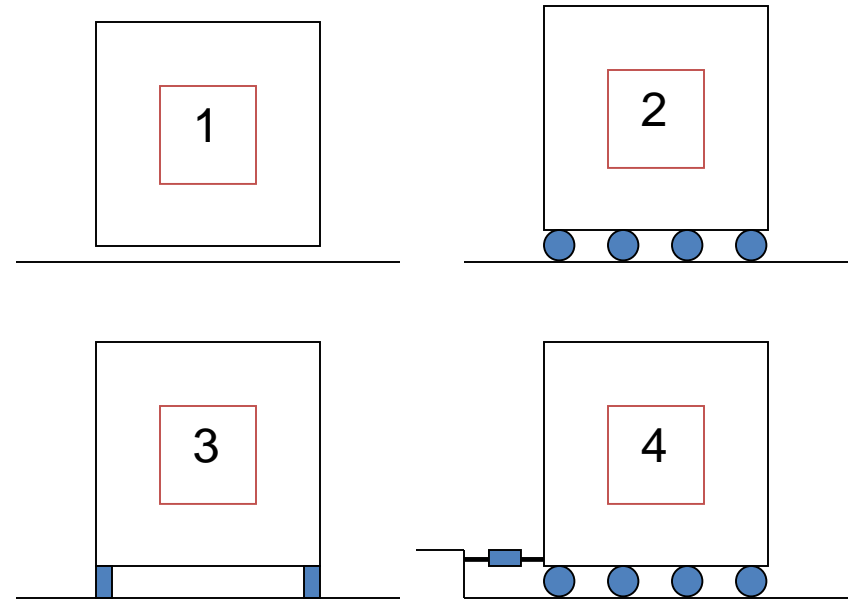
Cyrus tomb in Pasargades, the oldest base-isolated structure in the world

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

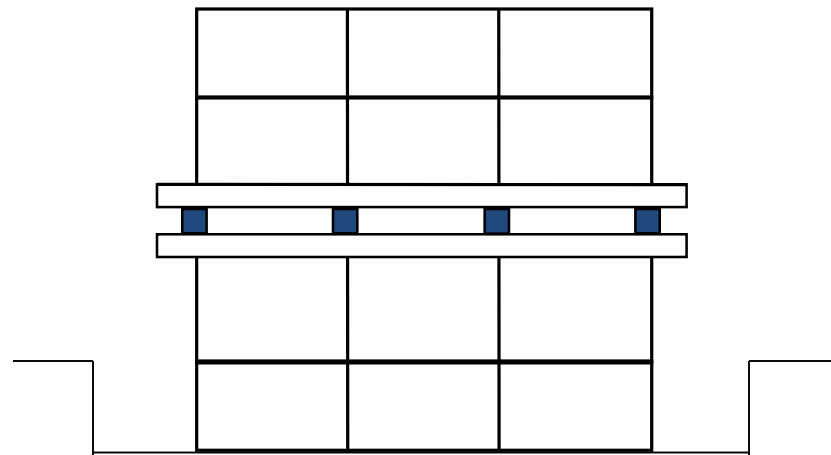
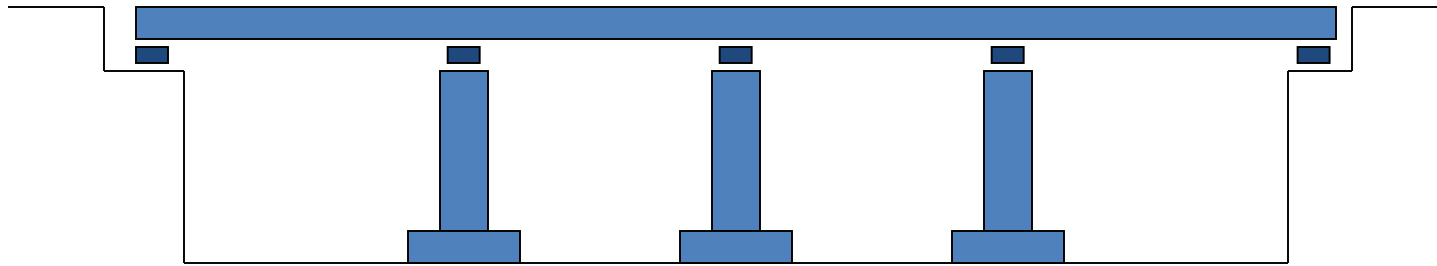


Isolamento alla base

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 parziale



❑ 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 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.

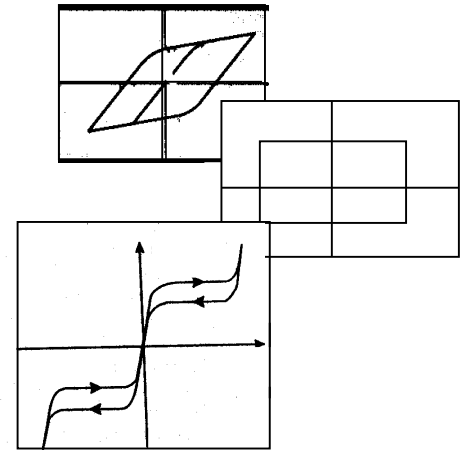
NTC 14/01/2008 (§11.9) e Circolare 617 §C11.9

Si distingue fra:

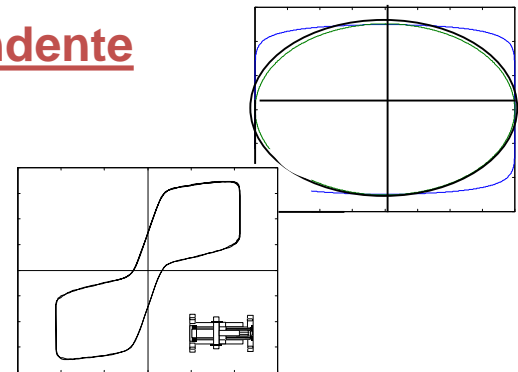
1. Dispositivi di vincolo temporaneo (fusibili e “Shock transmitter”);
2. Dispositivi dipendenti dallo spostamento;
3. Dispositivi dipendenti dalla velocità;
4. Dispositivi di isolamento (isolatori elastomerici ed isolatori a scorrimento)

- **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**



□ **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) →



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

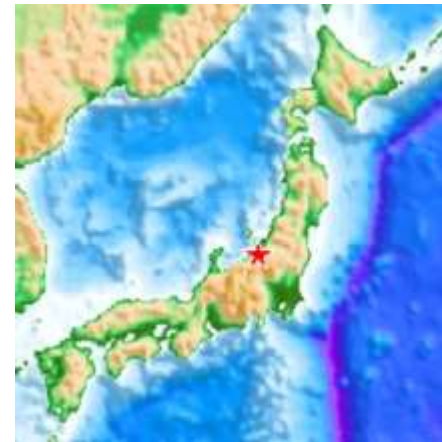


e dissipatori elastoplastici (EPD) →

□ **Isolamento sismico**
Conferme dell'efficacia

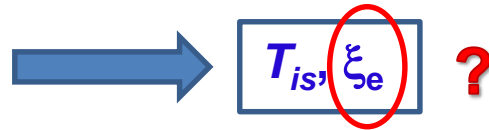


**Terremoto di
Mid Niigata,
ottobre 2004
($M=6,8$ – oltre 40
vittime)**



**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

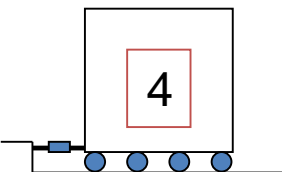
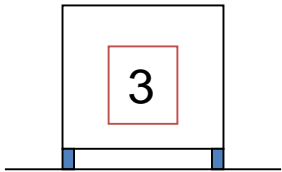
- HDRB (“High Damping Rubber Bearings”);
LRB (“Lead Rubber Bearings”) – edifici regolari
- HDRB o LRB + Appoggi scorrevoli di più tipi
(generalmente in acciaio-PTFE)**



- FPI (“Friction Pendulum Isolators”)**



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



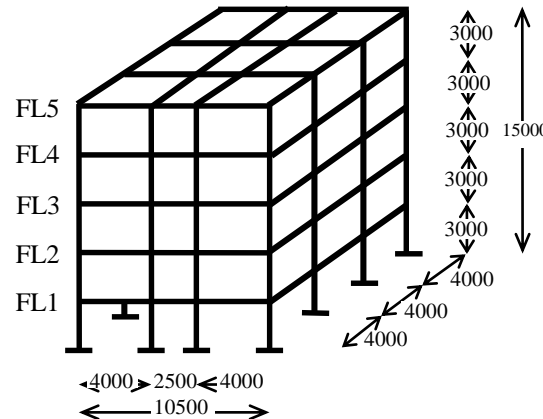


Ruolo della dissipazione nella progettazione di sistemi d'isolamento alla base



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

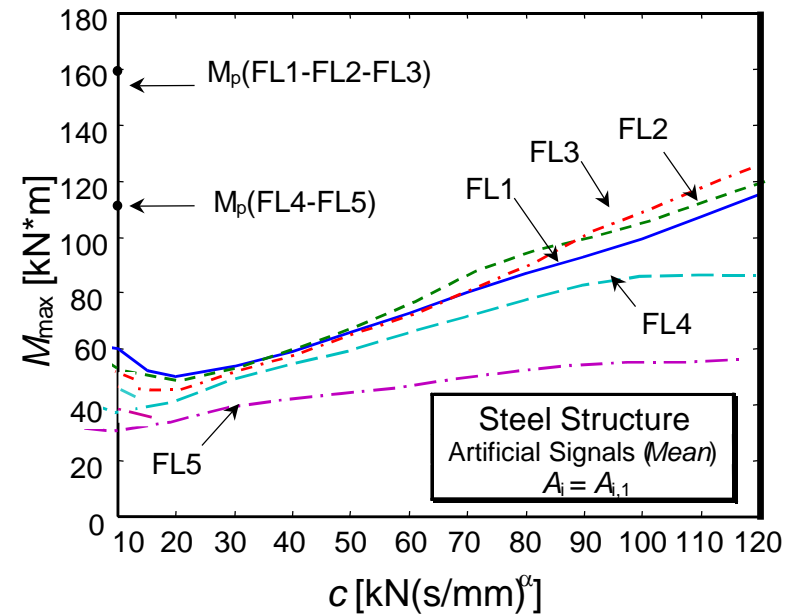
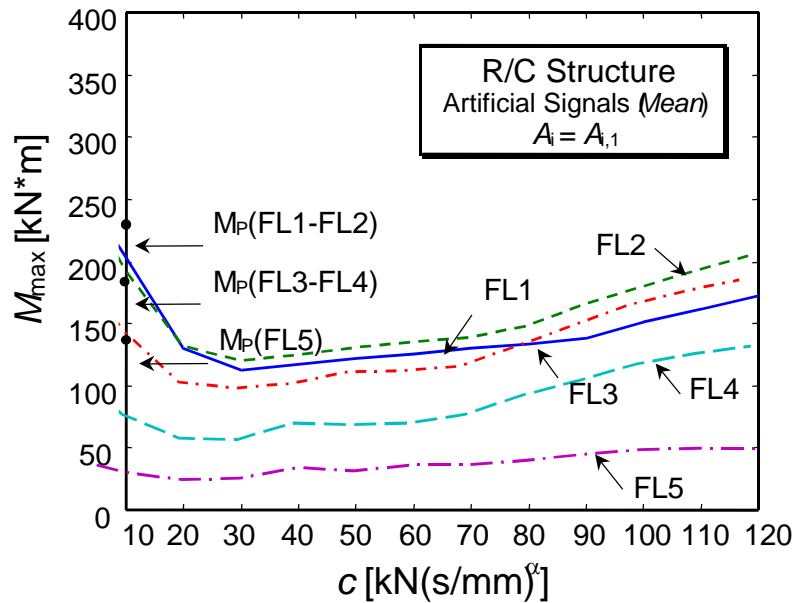
S. Sorace, G. Terenzi (2001). Non-linear dynamic design procedure of FV spring-dampers for base isolation—Frame building applications, *Engineering Structures*, Vol. 23, pp. 1568-1576, Munro Prize Awarded.



Floor	R/C structure	
	Columns (mm x mm)	Beams (mm x mm)
1	□ 400x400	T 500x500x240x200
2	□ 350x350	T 500x500x240x200
3	□ 350x350	T 500x500x240x200
4	□ 300x300	T 500x500x240x200
5	□ 300x300	T 500x500x240x200

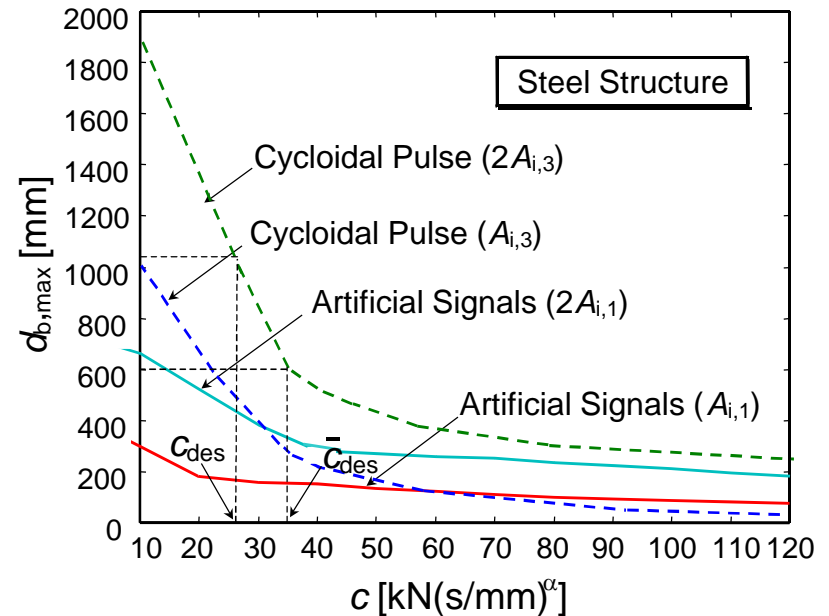
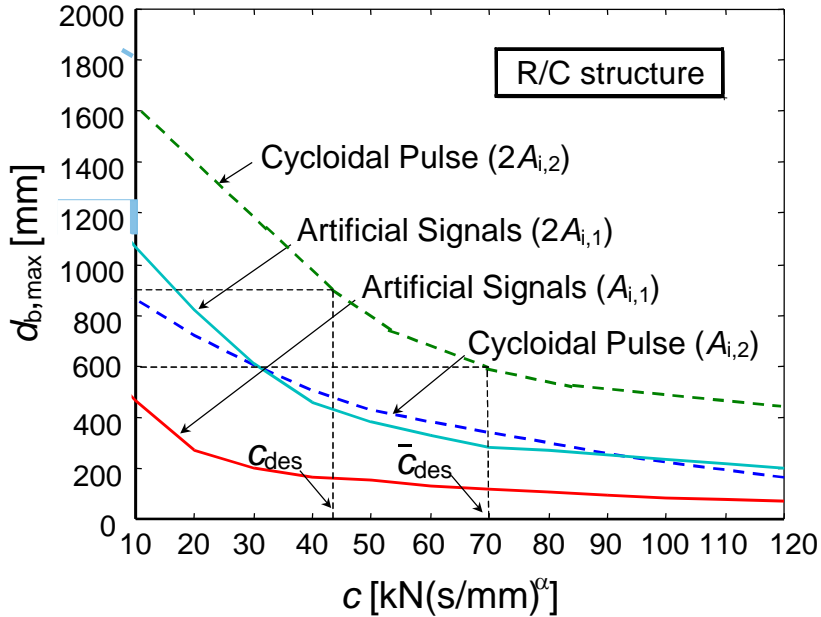
Floor	Steel structure	
	Columns (profile)	Beams (profile)
1	HEB220	HEB180
2	HEB200	HEB180
3	HEB180	HEB180
4	HEB160	HEA180
5	HEB160	HEA180

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



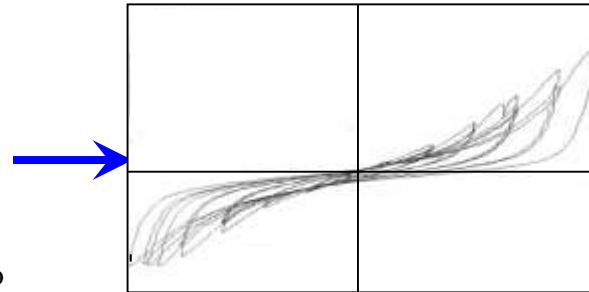
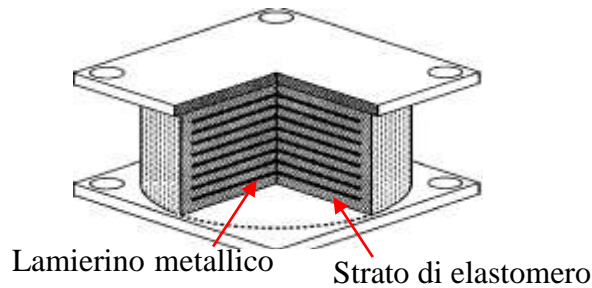
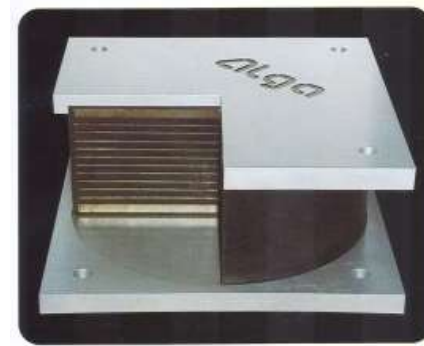
Intervallo di η ottimale = $0,5 \div 1$ ($\xi = 0,25 \div 0,5$)

Valori massimi degli spostamenti alla base

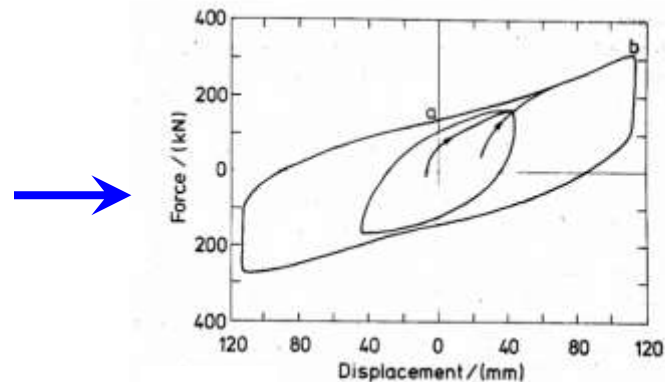
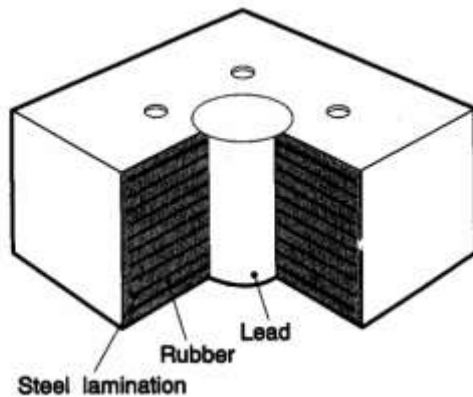


Nota: Oltre un certo valore, l'aumento di c non comporta ulteriori significative riduzioni degli spostamenti alla base, causando invece l'eccitazione di modi di vibrazione superiori al primo sulla sovrastruttura.

➤ **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 _{int} 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	400	1860	0.54	584	300	52	116	166	350	84
SI-S 350/50	700	3010	0.77	779	350	50	109	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	1309	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	2648	650	54	109	159	700	351
SI-S 700/60	4460	11370	2.57	2671	700	60	125	185	750	481
SI-S 800/60	6030	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	17900	26700	5.66	7224	1200	80	156	236	1250	1750

SI-N	V kN	F _{int} 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	9390	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	26700	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

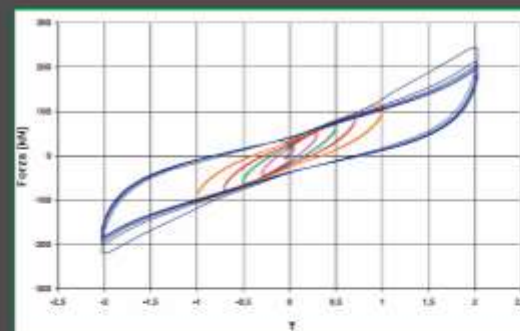
ELASTOMERI

Le mescole elastomeriche utilizzate per la produzione degli isolatori elastomerici della serie SI sono caratterizzate da un modulo dinamico equivalente a taglio G_{30} 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.

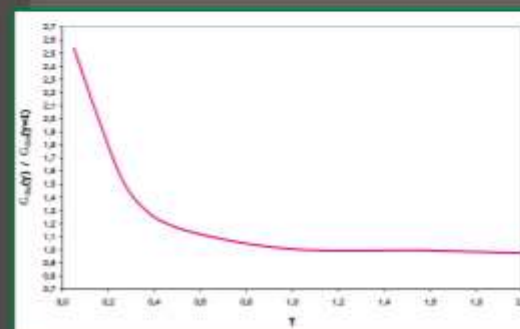
In tabella vengono riportate alcune proprietà fisico-meccaniche relative alle tre mescole standard.

PROPRIETÀ	MESCOLA		
	MORBIDA (SOFT - S)	NORMALE (NORMAL - N)	DURA (HARD - H)
Durezza (Shore A)	40	60	75
Modulo di elasticità tangenziale G_{30} a $\gamma = 1$ (MPa)	0.4	0.8	1.4
Coefficiente di smorzamento viscoso equivalente β 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_{30} 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.

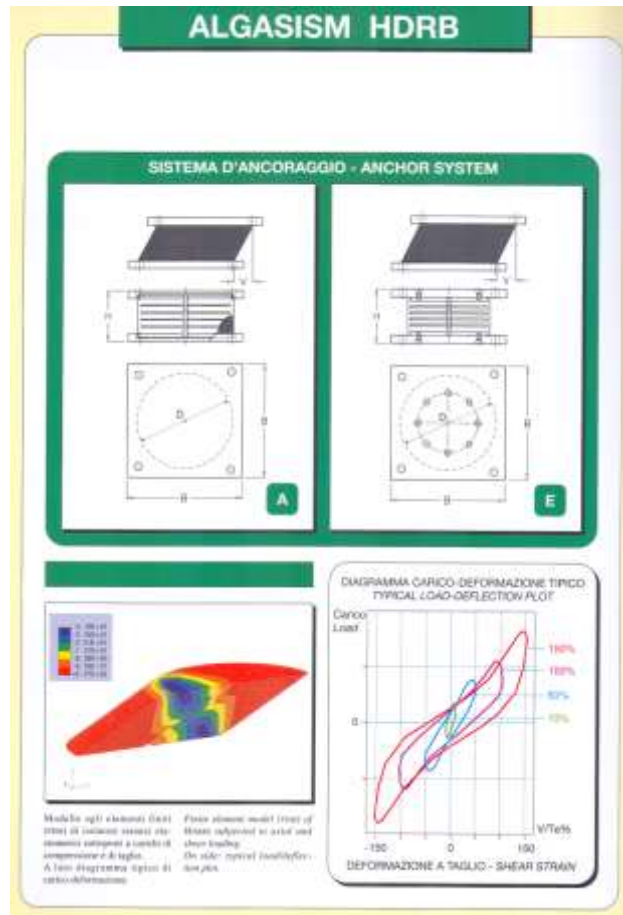


Tipico diagramma isteretico di un isolatore elastomerico ottenuto in prove dinamiche ad ampiezza crescente.



Variazione media del modulo dinamico equivalente a taglio G_{30} in funzione della deformazione di taglio γ .

✓ Metodo di progetto



CARATTERISTICHE FISICO-MECCANICHE HDRB
HDRB PHYSICAL-MECHANICAL CHARACTERISTICS

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

Isolatori elastomerici

Fattori di forma:

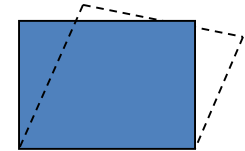
Fattore di forma primario $\Rightarrow S_1 = A'/L$ \longrightarrow



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:

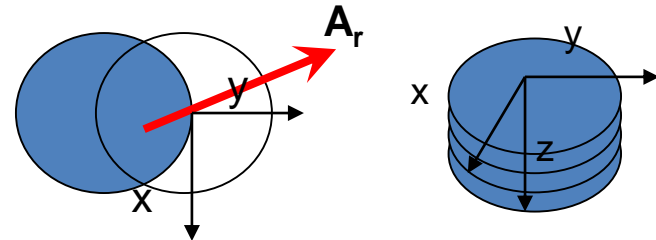
Rigidità equivalente $\Rightarrow K_e = F/d = G_{din} A/t_e$

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

Predimensionamento dei dispositivi elastomerici

1. Valutazione dei carichi complessivi 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):

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

ove:

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

$K_z(V)$ = rigidità verticale connessa alle variazioni di volume = E_cA/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.

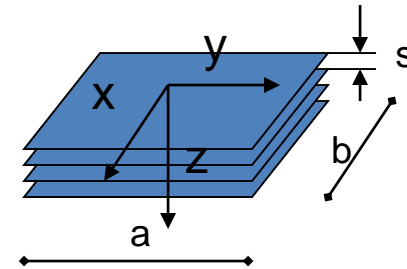
Per evitare fenomeni di dondolamento della sovrastruttura occorre stabilire un valore di S_1 tale che la rigidezza verticale sia $>800 K_b$. Imponendo tale condizione nell'espressione di K_v , si può ottenere il valore di S_1 dalla soluzione della seguente equazione:

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

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

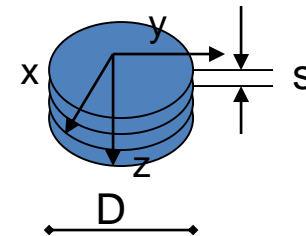
Fattore di forma primario S_1 per apparecchi rettangolari aventi dimensioni in pianta pari ad a e b , e spessore di ogni strato di gomma interno s :

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

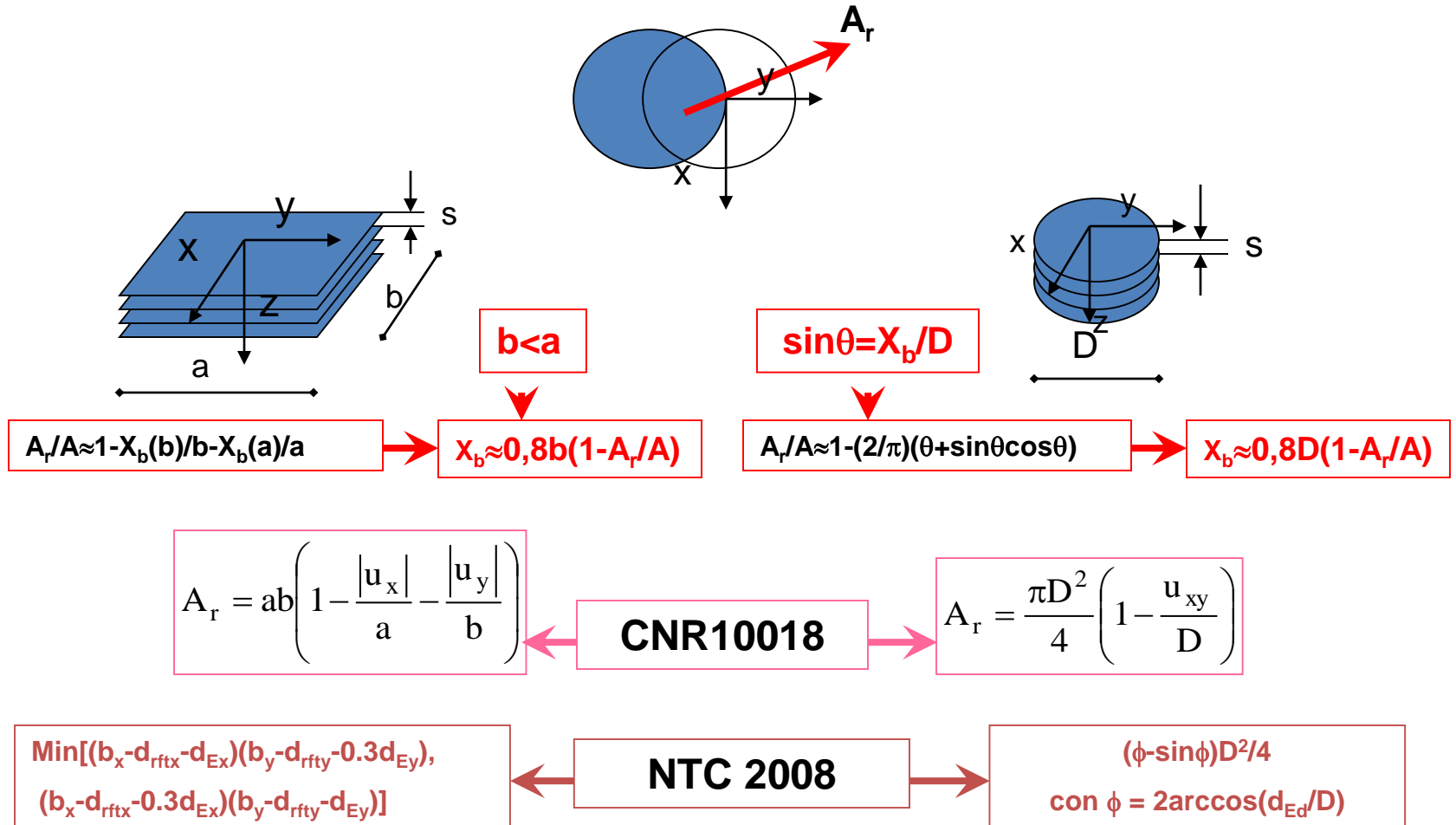


Fattore di forma primario S_1 per apparecchi circolari aventi diametro D , e spessore di ogni strato di gomma interno s :

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



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)

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



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

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.

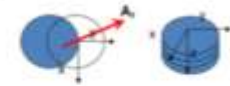
Dimensionamento degli isolatori

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 $S_1=A/S_2$, where S_2 =lateral surface of each rubber layer, is evaluated by imposing that the vertical stiffness $k_{z,des}$ of the isolator:

$$k_{z,des} = \frac{6GS_2^2 E_0 A (1 + 2\beta S_1^2)}{t_e [6GS_2^2 + E_0 (1 + 2\beta S_1^2)]}$$

is no lower than 800 $k_{z,des}$. Fixing $k_{z,des}=800k_{z,des}$, 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_0 , 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.

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 $b_y \Rightarrow$

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

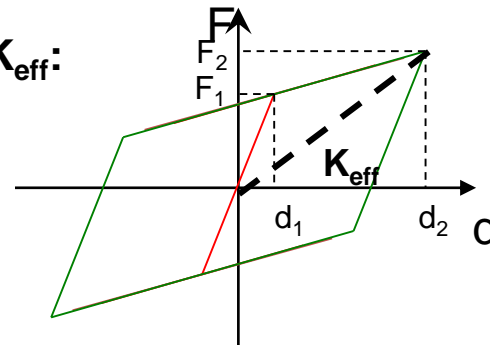
isolatori circolari di diametro $D \Rightarrow$

$$b_{min} = D$$

Predimensionamento dei dispositivi elastomerici con nucleo in piombo

1. Definizione del numero di isolatori, n_{is} , sulla base della distribuzione in pianta dei pilastri della sovrastruttura;
2. Valutazione del carico massimo, V_{max} su ogni isolatore e scelta del periodo di isolamento da indurre;
3. Determinazione della rigidezza efficace K_{eff} :

$$K_{eff} = \frac{4\pi^2}{T_{is}^2} \frac{V_{max}}{g}$$

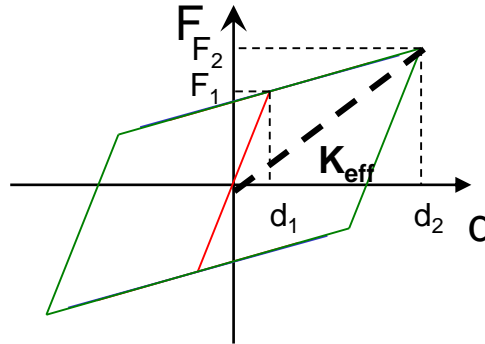


4. Definizione dello spostamento di progetto, ad esempio tramite la relazione:

$$d_{dc} = \frac{F_{tot}}{K_{esi,min}} = \frac{MS_e(T_{is}, \xi_{esi})}{K_{esi,min}}$$

5. Valutazione della forza di taglio trasferita alla sovrastruttura da ogni isolatore:

$$F_2 = K_e d_2 = K_{eff} d$$



6. Assunzione dell'azione del vento come forza di snervamento (Skinner et al. 1992):

$$F_w \leq 0,03 W_{tot} \longrightarrow F_y = \frac{0,03 W_{tot}}{n_{is}} = F_1$$

7. Determinazione del diametro del nucleo in piombo, ϕ_p :

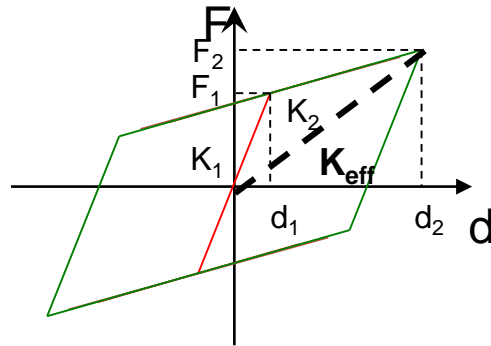
$$\phi_p = \sqrt{\frac{4F_1}{\pi \tau_{p,y}}} \longrightarrow 1,5 \leq h/\phi_p \leq 4$$

Skinner et al., 1992

avendo posto $\tau_{p,y} = 10\text{MPa}$.

8. Definizione dello spostamento allo snervamento $d_1 = (F_1/K_1)$ e della rigidità K_2 , avendo posto $K_1=10K_2$:

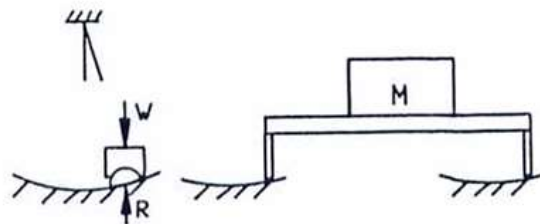
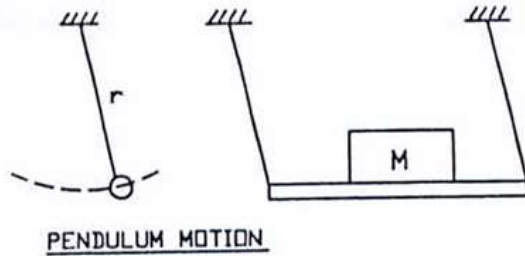
$$K_2 = \frac{F_2 - F_1}{d_2 - F_1/10K_2} \longrightarrow K_2 = \frac{F_2 - 9/10F_1}{d_2}$$



9. Dimensionamento della parte in gomma come visto in precedenza ($K_2=K_b$).

➤ *Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per isolamento sismico*

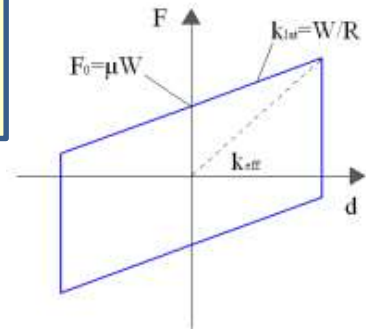
2.1. Superficie di scorrimento curva singola (SCSS)



EQUATIONS PERIOD $T = 2\pi\sqrt{r/g}$
 STIFFNESS $k = W/r$

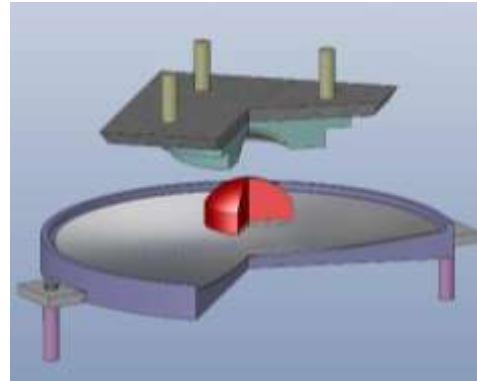
$$k_{eff} = \frac{W}{R} + \mu \frac{W}{d} = W \left(\frac{1}{R} + \frac{\mu}{d} \right)$$

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

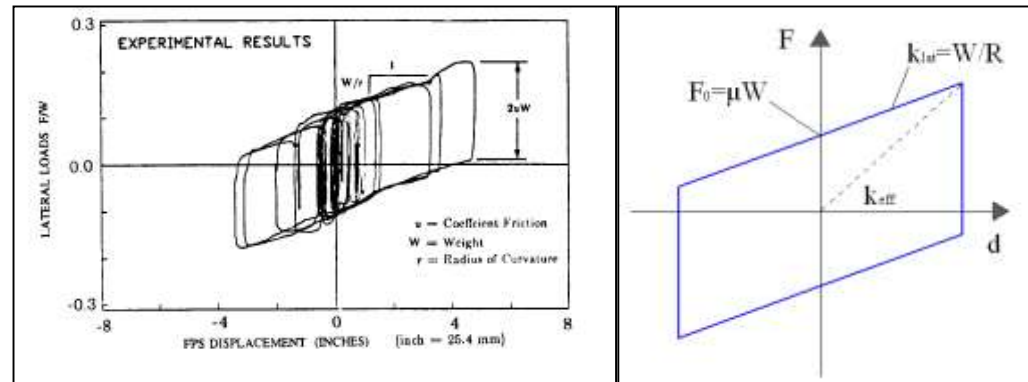


➤ *Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per isolamento sismico*

2.1. Superficie di scorrimento curva singola (SCSS)



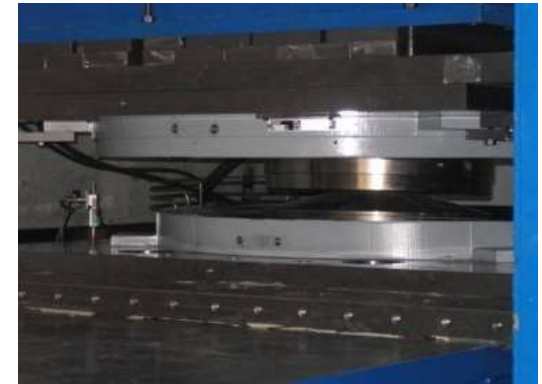
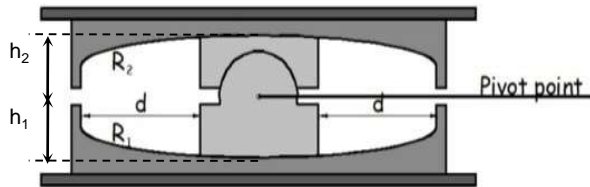
Caratteristiche:
soddisfacente ricentraggio;
grandi dimensioni;
eccitazione dei modi relativi
all'eccitazione verticale



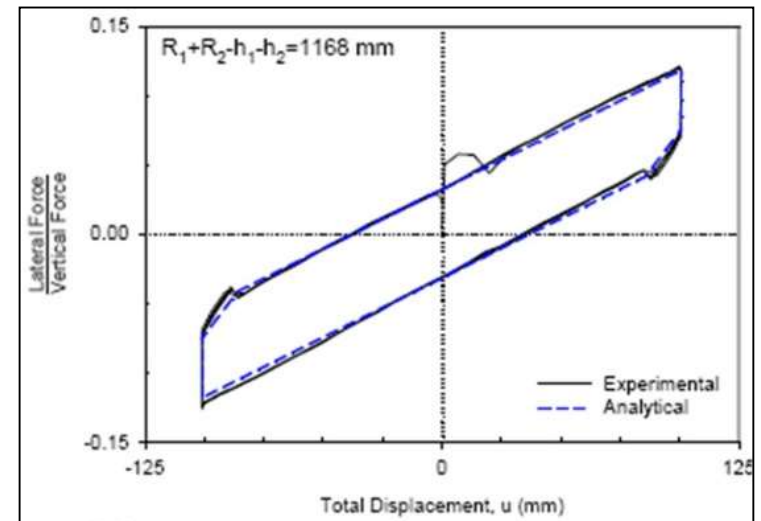
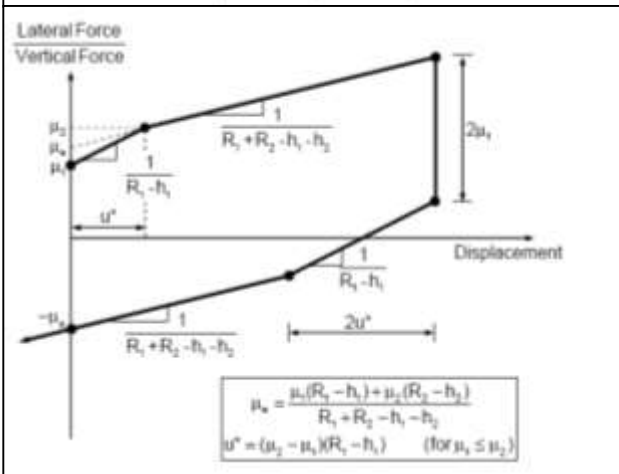
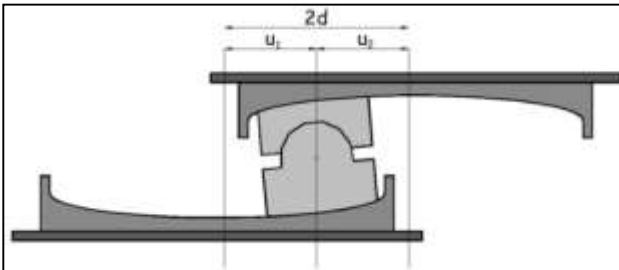
Constantinou M.C., Whittaker A.S., Kalpakidis Y., Fenz D.M., Warn G.P. (2007b). Performance of Seismic Isolation Hardware under Service and Seismic Loading. *Technical Report MCEER 07-0012*, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York.

➤ *Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per isolamento sismico*

2.2. Superficie di scorrimento curva doppia (DCSS)

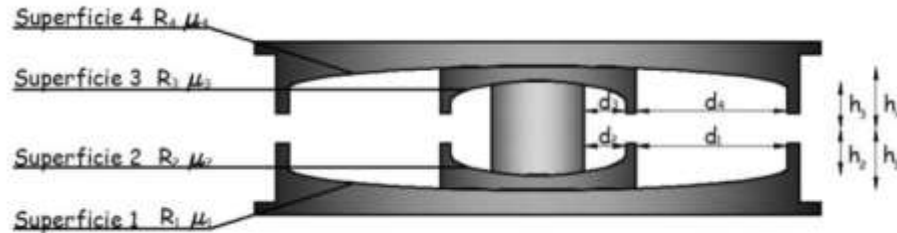


Caratteristiche:
 soddisfacente ricentraggio;
 dimensioni contenute;
 la doppia superficie di scorrimento impedisce l'eccitazione verticale



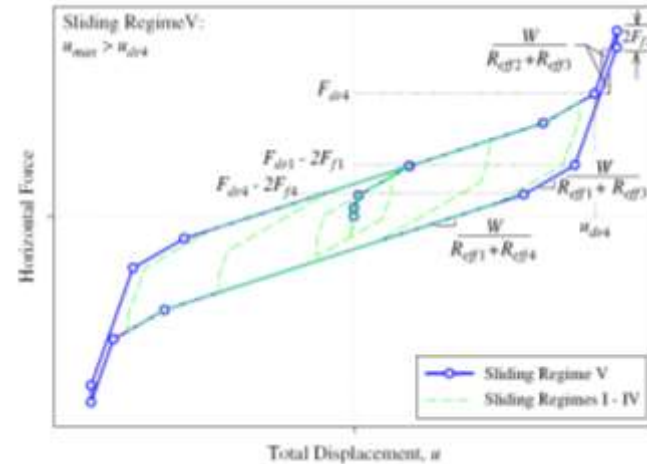
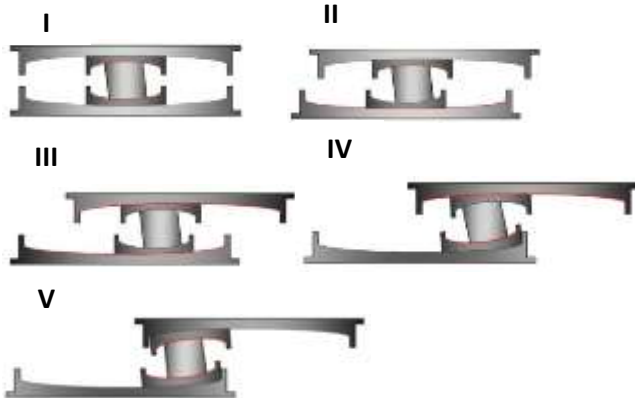
➤ **Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per isolamento sismico**

2.3. Superficie di scorrimento curva tripla (TCSS)



$$\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 < \mu_4$$

$$F_{dri} = \frac{W}{R_i} d_i + F_{fi}$$



Patalano G., Terenzi G., Spinelli P. (2009). Sistemi di tipo pendolare ad attrito per l'isolamento alla base degli edifici. *Bollettino degli ingegneri*, n.5, maggio 2009, 3-12

➤ **Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per isolamento sismico**

2.4. Superficie di scorrimento piana (generalmente utilizzati come semplici appoggi scorrevoli da associare ad isolatori del tipo HDRB, LRB o dispositivi ausiliari nel caso di edifici irregolari)

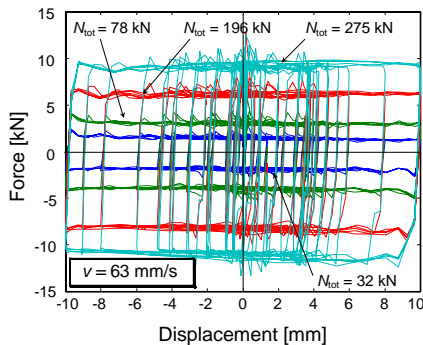
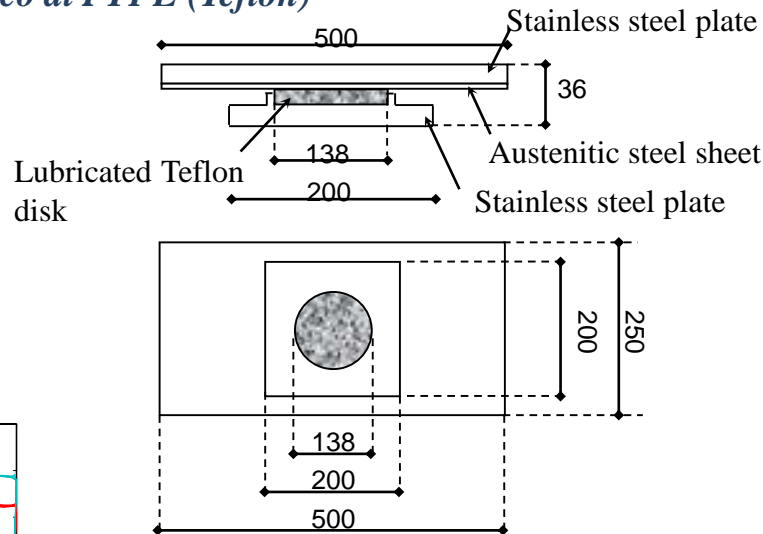
Caratteristiche:

non sono ricentranti ;

dimensioni contenute;

fungono da meri sostegni per carichi verticali e da pattini nei confronti delle azioni orizzontali

Appoggi con solo disco di PTFE (Teflon)



S. Sorace, G. Terenzi G., Magonette, F.J. Molina (2008). "Experimental investigation on a base isolation system incorporating steel-Teflon sliders and pressurized fluid viscous spring-dampers". *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, John Wiley & Sons Ltd, New York, 37(2), 225-242

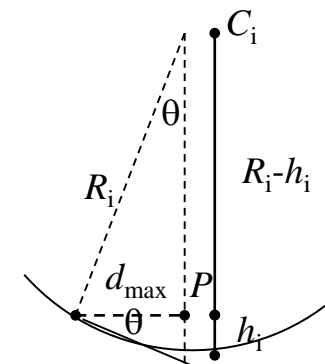
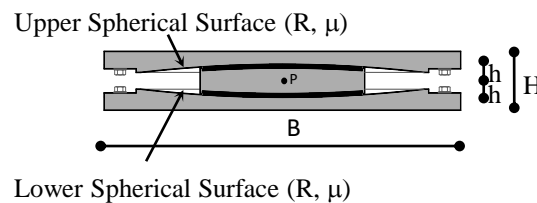
Appoggi con cuscinetto di gomma aggiuntivo



➤ *Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per isolamento sismico*

✓ **Progetto degli isolatori DCSS**

1. Assunzione di un valore di periodo fondamentale di vibrazione T , riferito ad un pendolo semplice avente curvatura R doppia rispetto all'isolatore da dimensionare. Tenendo conto della relazione fra tali parametri nella schematizzazione di pendolo semplice, si può procedere alla definizione di $R_i \approx 2(R-h) = L_{DFP}$:



$$T = 2\pi\sqrt{R/g} \longrightarrow R_i \cong L_{DFP} = \frac{T^2}{4\pi^2} g$$

Sorace, S, Terenzi, G. (2014). Motion control-based seismic retrofit solutions for a R/C school building designed with earlier Technical Standards, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12: 334-345.

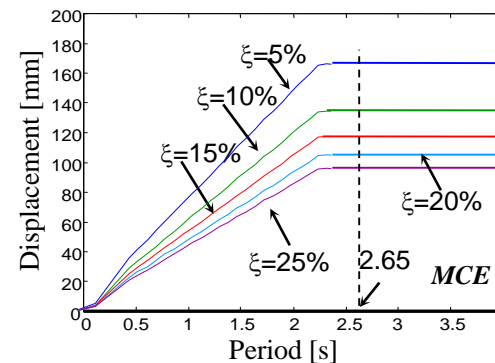
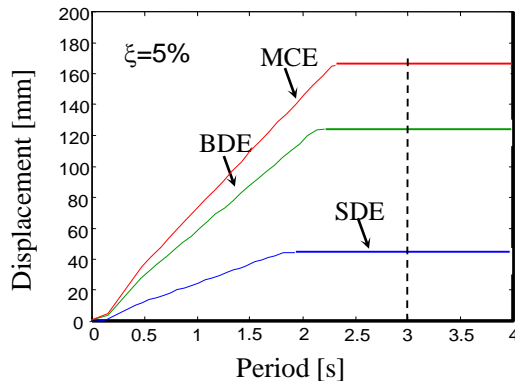
Sorace S., Terenzi G. (2014). Analysis, design and construction of a base-isolated multiple building structure, *Advances in Civil Engineering*, Volume 2014, Hindawi Publishing Corporation, 13 p, ID 585429.

➤ Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per isolamento sismico

✓ Progetto degli isolatori DCSS

2. Assunzione di un coefficiente di attrito medio μ_m pari a 2,5% per ogni dispositivo, essendo questo il valore che generalmente caratterizza le superfici di Teflon dei DCSS in commercio.

Lo spostamento limite di progetto $d_{Des,MCE}$ può conseguentemente essere definito sulla base delle curve spettrali riferite ad un evento di massima intensità (SL4 - MCE) assumendo, a favore di sicurezza, uno smorzamento convenzionale equivalente del 5% per il periodo T già prescelto, arrotondando tale dato fino al 20% in più (il $d_{Des,MCE}$ finale deve comunque essere tale da evitare di avere connessioni impiantistiche speciali e/o contatto con edifici adiacenti).



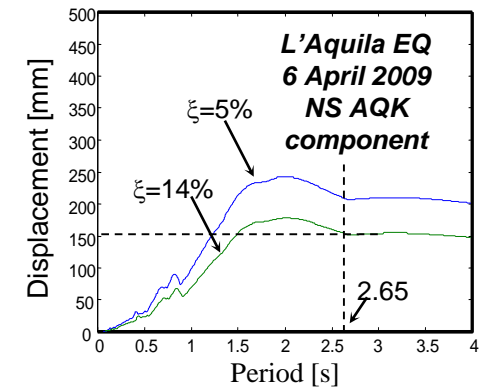
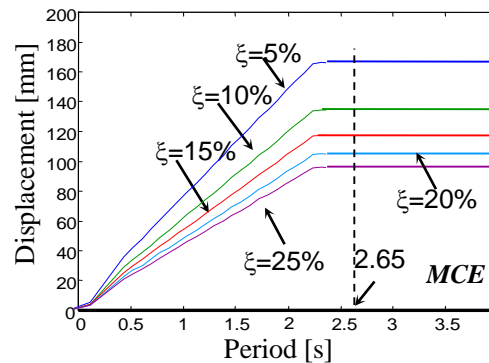
➤ *Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per isolamento sismico*

✓ **Progetto degli isolatori DCSS**

3. Una volta definiti μ e $d_{Des,MCE}$, è possibile valutare, riferendosi ad un oscillatore elastico lineare equivalente, il periodo T_e , e lo smorzamento equivalente ξ_e . Valutando il dato spettrale di spostamento per l'evento MCE, con $T=T_e$ e $\xi=\xi_e$, è possibile verificare il dato $d_{Des,MCE}$ stabilito al passo precedente.

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

$$\xi_e = \frac{2}{\pi} \frac{1}{\frac{d_{max}}{\mu R} + 1}$$



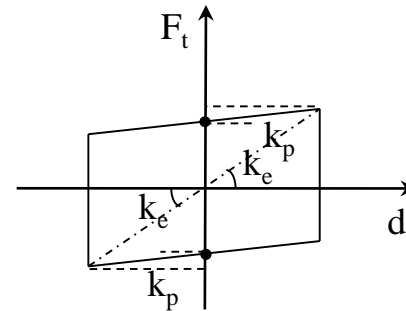
➤ **Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per isolamento sismico**

✓ **Progetto degli isolatori DCSS**

4. Valutazione delle altre componenti di forza e di rigidezza caratterizzanti il ciclo.

$$F_t(t) = \frac{V(t)}{L_{DFP}} d(t) + \mu V(t)$$

$$k_e(t) = \frac{F_{t, \max}}{d_{\max}} = \left(\frac{1}{L_{DFP}} + \frac{\mu}{d_{\max}} \right) \bar{V}$$



5. Definizione della profondità h_i di ciascuna superficie curva. Come emerge dallo schema considerando piccoli angoli di rotazione θ , si possono effettuare le seguenti approssimazioni:

$$R_i \cos \theta = R_i - h_i \cong R_i$$

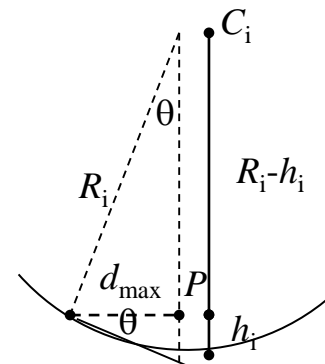
$$R_i \sin \theta = d_{\max} \cong R_i \theta$$

da cui deriva:

$$\theta \cong \frac{d_{\max}}{R_i}$$

$$\text{tg} \theta = \frac{h_i}{d_{\max}} \cong \theta$$

$$h_i \cong \frac{d_{\max}^2}{R_i}$$

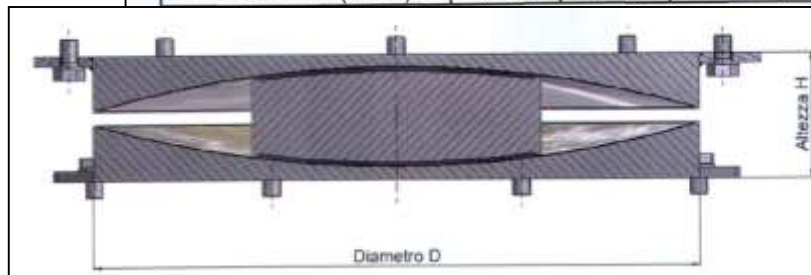


➤ *Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per isolamento sismico*

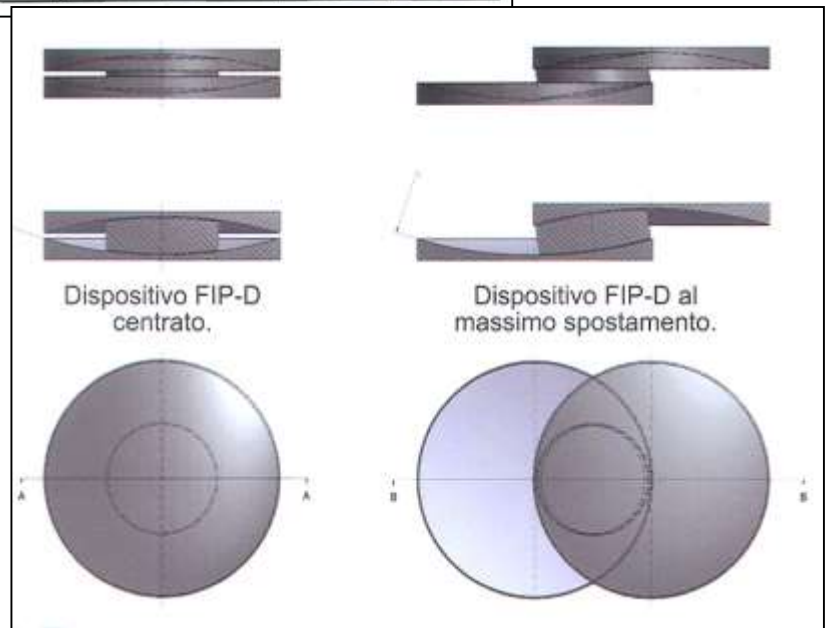
✓ **Progetto degli isolatori DCSS**

FIP INDUSTRIALE
schedatecnica
www.fip-group.it

Spostamento 200 mm	V	F _{zd}	R	μ	ξ _e	T	D	H
	kN	kN	mm		%	s	mm	mm
	per d ₂ ^{SLC} = 200 mm							
FIP-D 90/400 (2535)	500	900	2535	0.025	15.3	2.78	400	84
FIP-D 130/400 (2535)	1000	1300					430	89
FIP-D 260/400 (2535)	2000	2600					485	120
FIP-D 390/400 (2535)	3000	3900					535	141

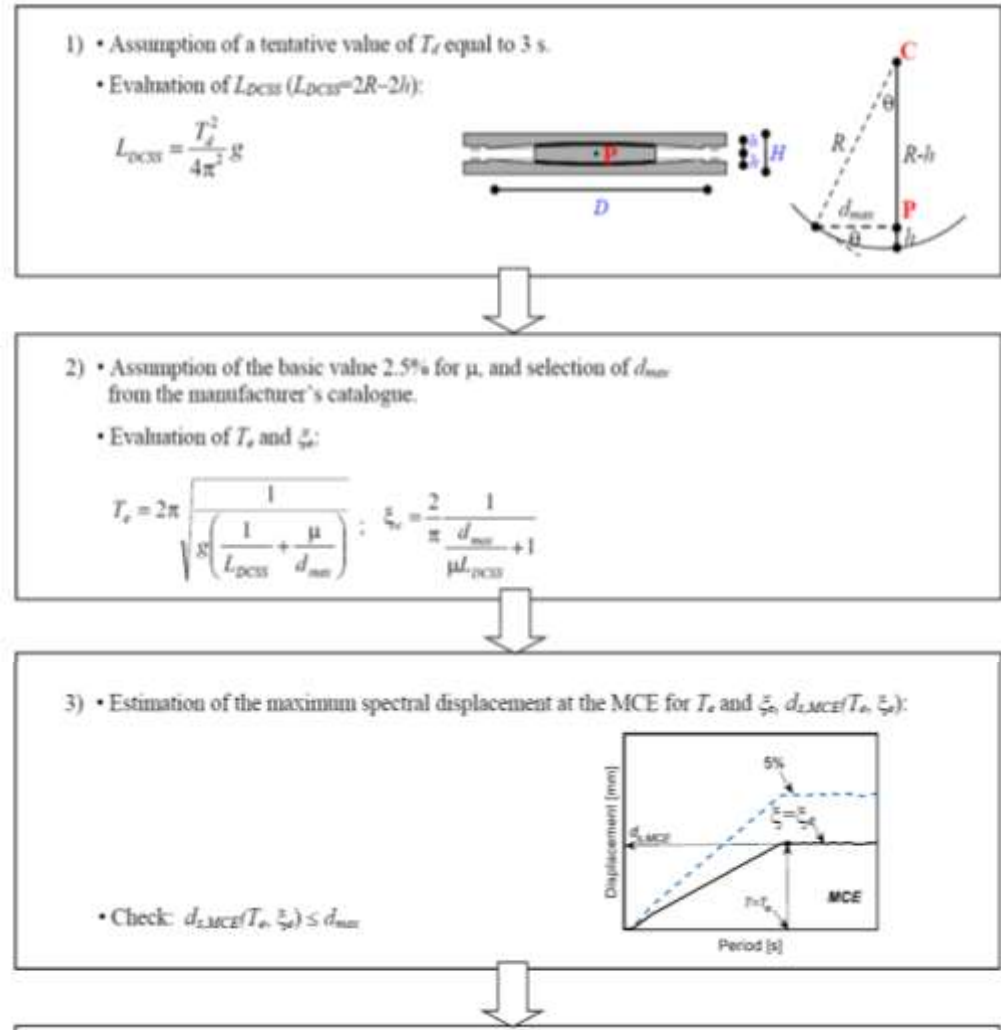


V = carico verticale agente sull'isolatore in presenza di sisma (MCE)
F_{zd} = carico verticale statico agente sull'isolatore



✓ Progetto degli isolatori DCSS

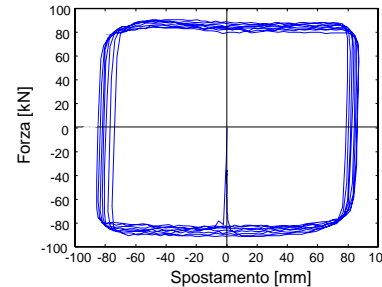
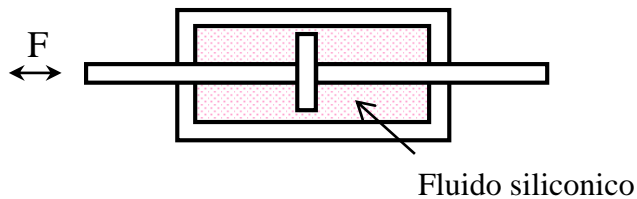
Dimensionamento degli isolatori



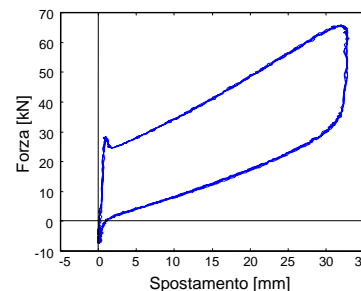
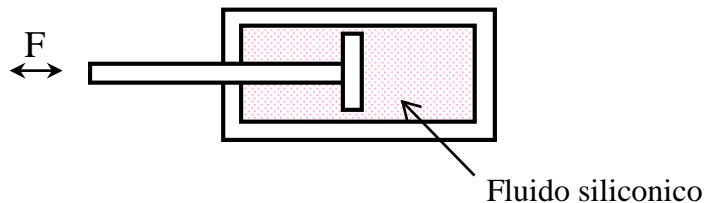
Terenzi G., Rossi E. (2018). Seismic analysis and retrofit of the oldest R/C elevated water tank in Florence, BULLETIN OF EARTHQUAKE ENGINEERING, Vol. 16, Issue 7, pp. 3081-3102, DOI: 10.1007/s10518-017-0306-4.

➤ **Dispositivi fluido-viscosi pressurizzati utilizzati in qualità di dispositivi ausiliari per applicazioni d'isolamento alla base**

✓ **Dissipatore puro a singolo effetto**



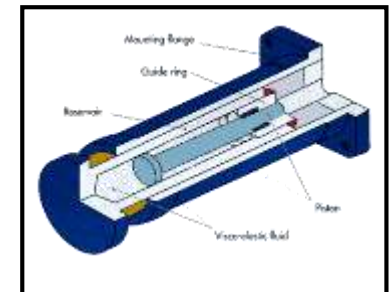
✓ **Dispositivo molla-smorzatore a singolo effetto**



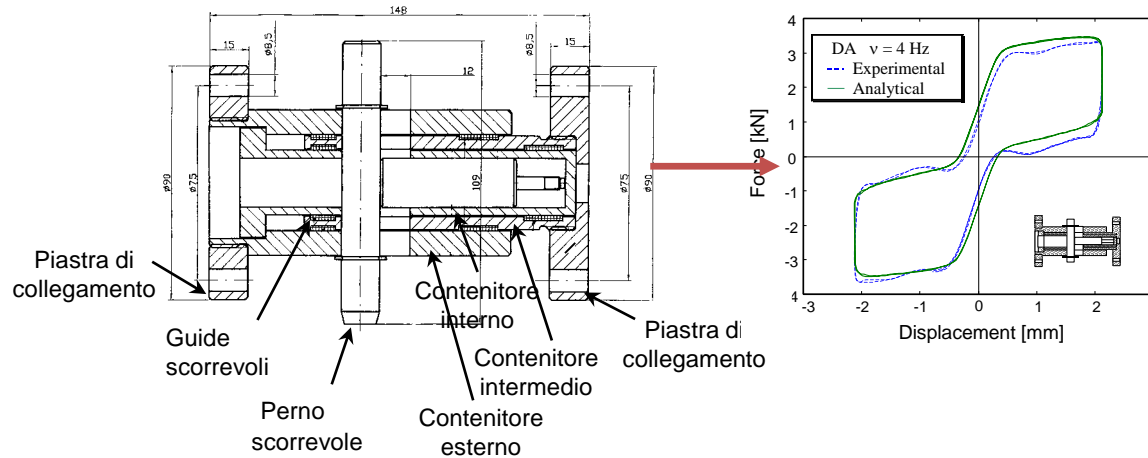
Ricentranti grazie alla pressurizzazione del fluido siliconico nel serbatoio

Terenzi, G. (1999). Dynamics of SDOF systems with nonlinear viscous damping. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 125(8), 956–963

Sorace, S., Terenzi, G. (2001). Non-linear dynamic modelling and design procedure of FV spring-dampers for base isolation. *Engineering Structures*, Vol. 23(12), 1556-1567.



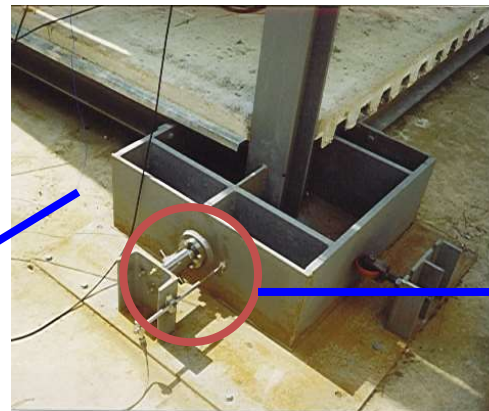
✓ *Dispositivo molla-smorzatore a doppio effetto*



S. Sorace, G. Terenzi (2001). *Non-linear dynamic modelling and design procedure of FV spring-dampers for base isolation*, Engineering Structures, Elsevier Science Ltd, Vol. 23, pp. 1556-1567, Munro Prize Awarded.



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

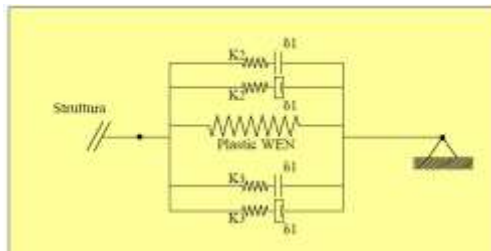
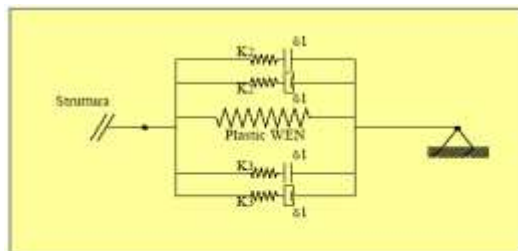


Modellazione di dispositivi e sistemi d'isolamento

Costruzione di modelli computazionali per assemblaggio di elementi non lineari

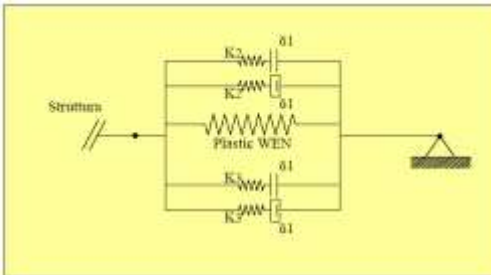
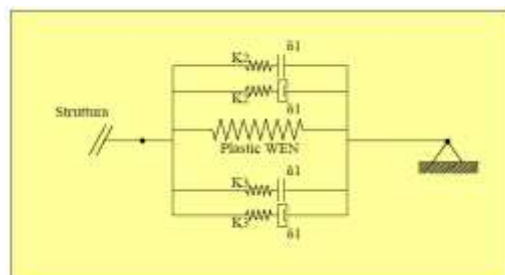
(tipo NLink – SAP2000NL)

➤ Dispositivi elastomerici HDRB



Identificazione del dispositivo [HDS.A500]
 -rigidezza secante: $K_{eq}[0-100] = 0.61 \text{ kN/mm}$
 -rigidezza primo tratto: $K[20] = 1.3672 \text{ kN/mm}$
 -snervamento: $Q20 = 35 \text{ kN}$
 -rigidezza secondo tratto: $K[20-100] = 0.4207 \text{ kN/mm}$
 -rapporto $K[20-100]/K[20] = 0.3077$
 -rigidezza terzo ramo: $K[100-150] = 0.618 \text{ kN/mm}$
 -rigidezza quarto ramo: $K[150-gmax] = 3.199 \text{ kN/mm}$

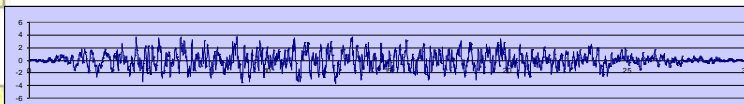
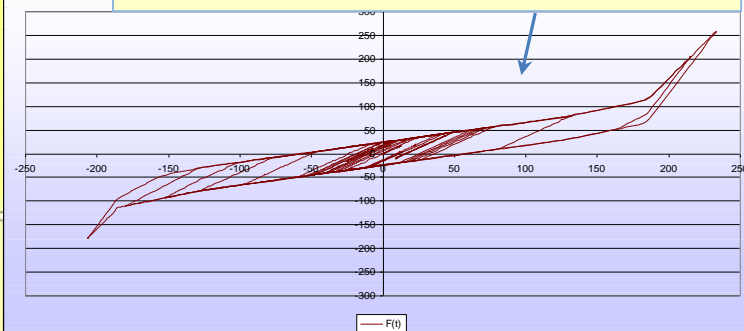
Plastic Wen:
 -rigidezza secante: $K_{eq}[0-100] = 0.61 \text{ kN/mm}$
 -rigidezza primo tratto: $K[20] = 1.3672 \text{ kN/mm}$
 -snervamento: $Q20 = 35 \text{ kN}$
 -rigidezza secondo tratto: $K[20-100] = 0.4207 \text{ kN/mm}$
 -rapporto $K[20-100]/K[20] = 0.3077$



GAP/HOOK terzo ramo:
 -rigidezza terzo ramo: $K[100-150] = 0.618 \text{ kN/mm}$
 -apertura gap/hook: 128 mm
 -rigidezza lineare: nulla
 -rigidezza fase nl: $K[100-150]-K[20-100] = 0.2 \text{ kN/mm}$

GAP/HOOK quarto ramo:
 -rigidezza terzo ramo: $K[150-gmax] = 3.199 \text{ kN/mm}$
 -apertura gap/hook: 185 mm
 -rigidezza lineare: nulla
 -rigidezza fase nl: $K[150-gmax]-K[100-150]-K[20-100] = 2.58 \text{ kN/mm}$

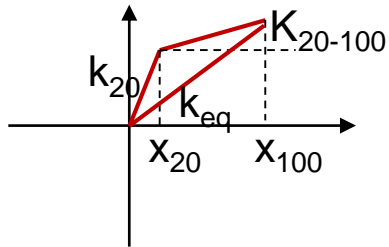
Risposta del modello risultante a 4 rami



G. Terenzi (1994). Effetti dissipativi nell'isolamento sismico, Tesi di Dottorato in Ingegneria delle Strutture, VII Ciclo, Università di Firenze.

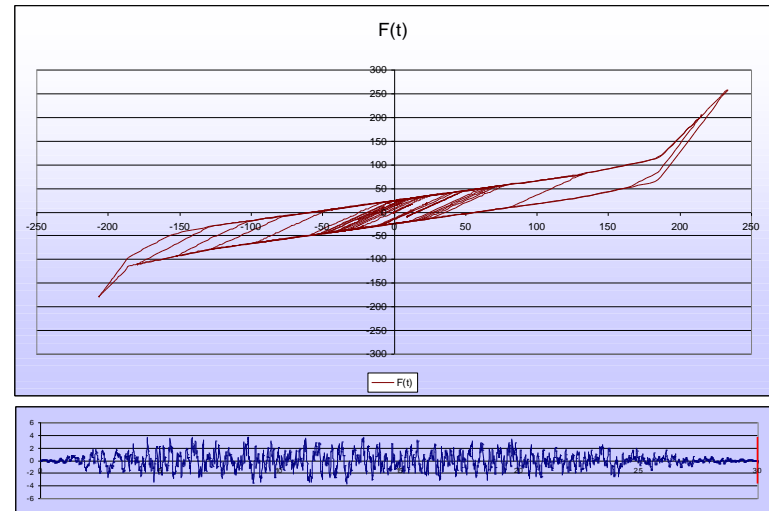
Bandini L. (2006). Metodi di modellazione agli elementi finiti di sistemi di protezione sismica, in: Tecnologie innovative – Ricerca – Applicazioni. A cura di Gaetano Russo – Stefano Sorace AA.VV., CISM 2008, pp. 67-96.

✓ *Modello semplificato*



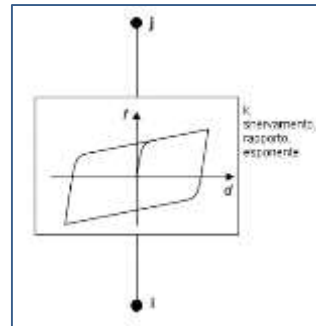
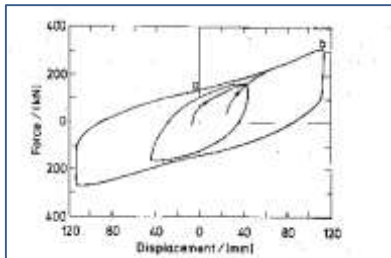
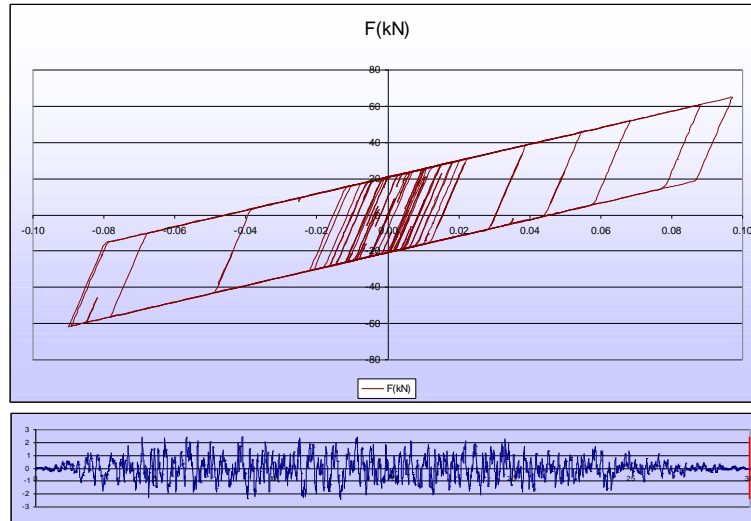
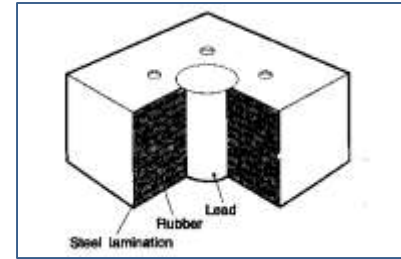
$$K_{20} = 3K_{20-100}$$

$$K_{20-100} = K_{eq} x_{100} / (2x_{20} + x_{100})$$



G. Terenzi (1994). Effetti dissipativi nell'isolamento sismico, *Tesi di Dottorato in Ingegneria delle Strutture*, VII Ciclo, Università di Firenze.

➤ **Dispositivi elastomerici con nucleo in piombo LRB**



**Risposta del modello
costituito da un elemento
“Plastic-WEN”**
 $K_1 = 4555 \text{ N/mm}$
 $K_2 = 455.5 \text{ N/mm}$
 $F_y = 23100 \text{ N}$
 $Exp = 20$

➤ Dispositivi ad attrito

Modello dell'isolatore ad attrito:

Park, Wen ed Ang (1986) ; Nagarajaiah, Reinhorn e Constantinou (1991).

Modello del pendolo:

Zayas e Low (1990).

Direzione locale 1 (verticale): elemento gap.

Il Friction Isolator lavora soltanto a compressione.

$$P \equiv f_{u1} = \begin{cases} \mathbf{k1} d_{u1} & \text{if } d_{u1} < 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Direzioni locali 2 e 3: effetto del pendolo e dell'elemento ad attrito

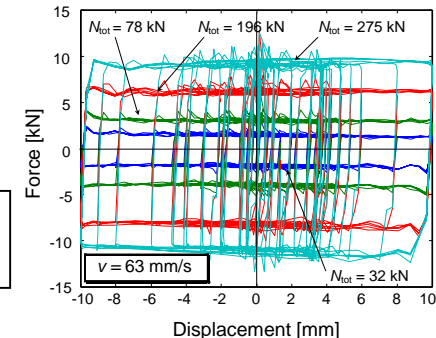
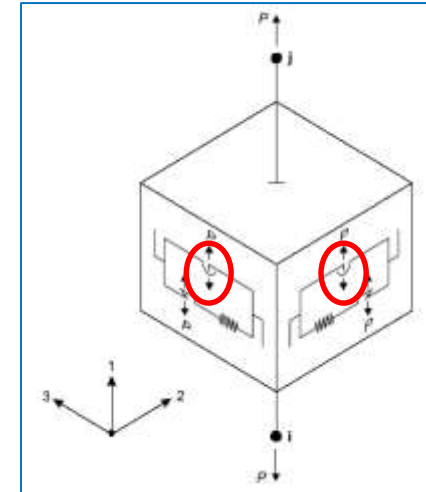
$$\begin{aligned} f_{u2} &= f_{u2f} + f_{u2p} \\ f_{u3} &= f_{u3f} + f_{u3p} \end{aligned} \quad \begin{aligned} f_{u2p} &= -P \frac{d_{u2}}{\text{radius2}} \\ f_{u3p} &= -P \frac{d_{u3}}{\text{radius3}} \end{aligned}$$

Valore "di distacco" del coefficiente d'attrito ($v=0$)

$$\begin{aligned} f_{u2f} &= -P \mu_2 z_2 \\ f_{u3f} &= -P \mu_3 z_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_2 &= \text{fast2} - (\text{fast2} - \text{slow2}) e^{-r v} \\ \mu_3 &= \text{fast3} - (\text{fast3} - \text{slow3}) e^{-r v} \end{aligned}$$

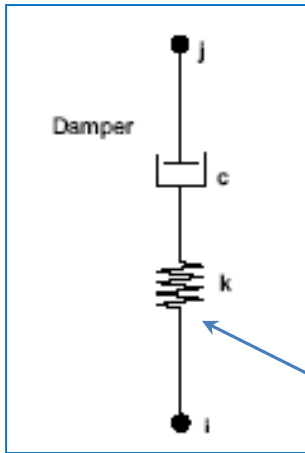
Valore "dinamico" del coefficiente d'attrito in condizioni stabilizzate (velocità elevate)



Il modello di puro scorrimento è ottenibile mediante disattivazione numerica delle componenti "pendolo".

Ciò si realizza annullando il raggio della relativa superficie sferica, cui consegue anche l'annullamento della forza di taglio di risposta dell'elemento.

➤ Dissipatori



Modello viscoelastico di Maxwell (Malven, 1969)

k è la costante elastica della molla,
 c è il coefficiente di smorzamento,
 c_{exp} è l'esponente della velocità,
 d_k è la deformazione della molla
 \dot{d}_c è la velocità di deformazione.

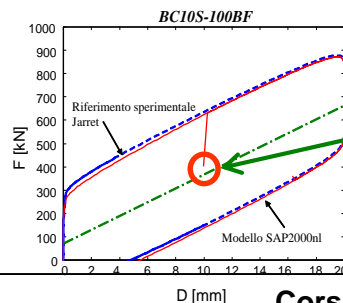
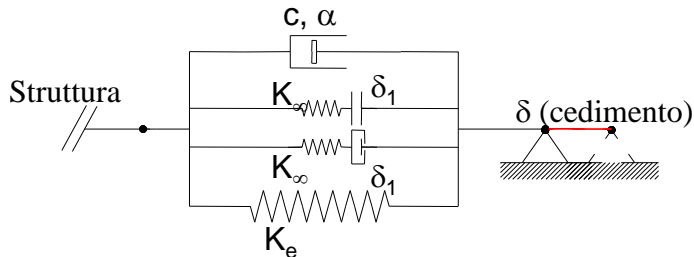
$$f_k = k d_k$$

$$f_c = c \dot{d}_c^{c_{exp}}$$

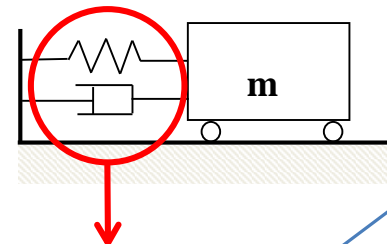
Per uno **smorzatore puro** l'effetto della molla può essere reso trascurabile dotandola di rigidità sufficientemente elevata (comunque, non oltre 10^3 - 10^4 volte la rigidità degli elementi connessi, al fine di non incorrere in errori numerici).

✓ Dispositivi fluido-viscosi pressurizzati a matrice siliconica

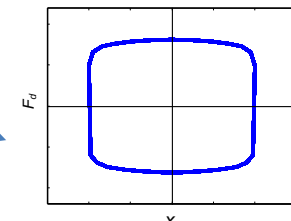
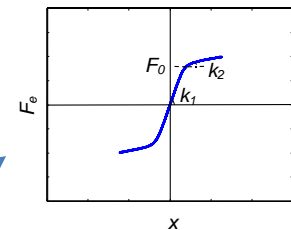
Modello: assemblaggio di elementi damper, gap, Hook e spring.



Dispositivi montati a metà corsa



$$F(t) = F_d(t) + F_e(t)$$



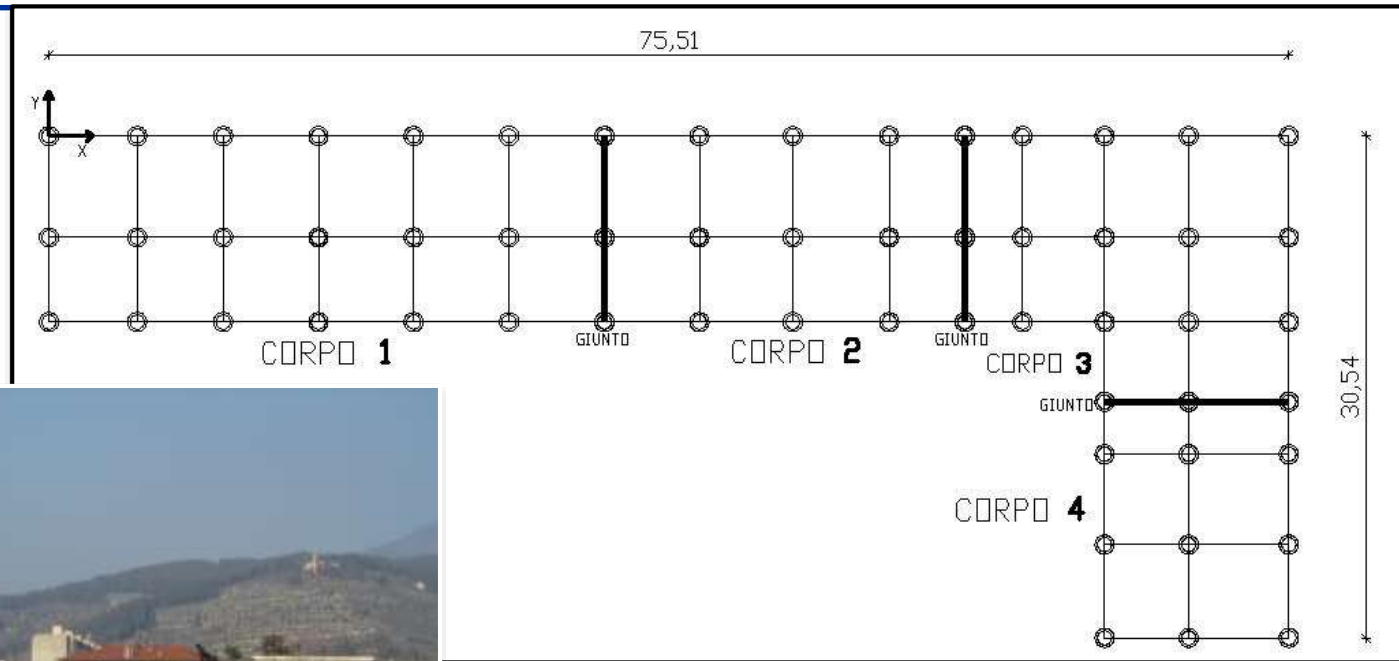
$$F_e(t) = k_2 x(t) + \frac{(k_1 - k_2) x(t)}{\left[1 + \left| \frac{k_1 x(t)}{F_0} \right|^R \right]^{1/R}}$$

$$F_d(t) = c \cdot \text{sgn}[\dot{x}(t)] \cdot |\dot{x}(t)|^\alpha$$

➤ *Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per isolamento sismico*

❖ **Quando è preferibile intervenire con un sistema d'isolamento alla base?**

✓ **Sempre (nel nuovo e nel costruito) per strutture rigide ($T_1 < 0,8s$), complessi strutturali di grandi dimensioni (artificial ground)**



Edificio ad uso residenziale situato a Sesto Fiorentino (Firenze) – Intervento di edilizia sovvenzionata (committente: CASA SpA)

➤ *Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per isolamento sismico*

❖ Perché prescegliere l'applicazione dell'isolamento alla base rispetto alla progettazione tradizionale?

✓ **Innalzamento delle capacità di prestazione**

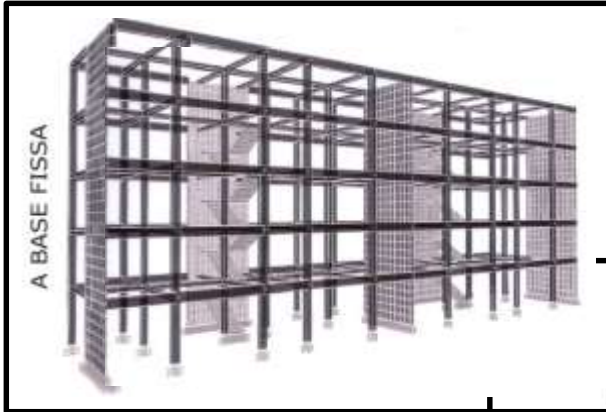
✓ **Riduzione delle azioni sulla sovrastruttura per ciascuno degli stati limite di riferimento**

	SLO	SLD	SLV	SLC
LS1	X			
LS2	X			
LS3	X			
LS4		X		

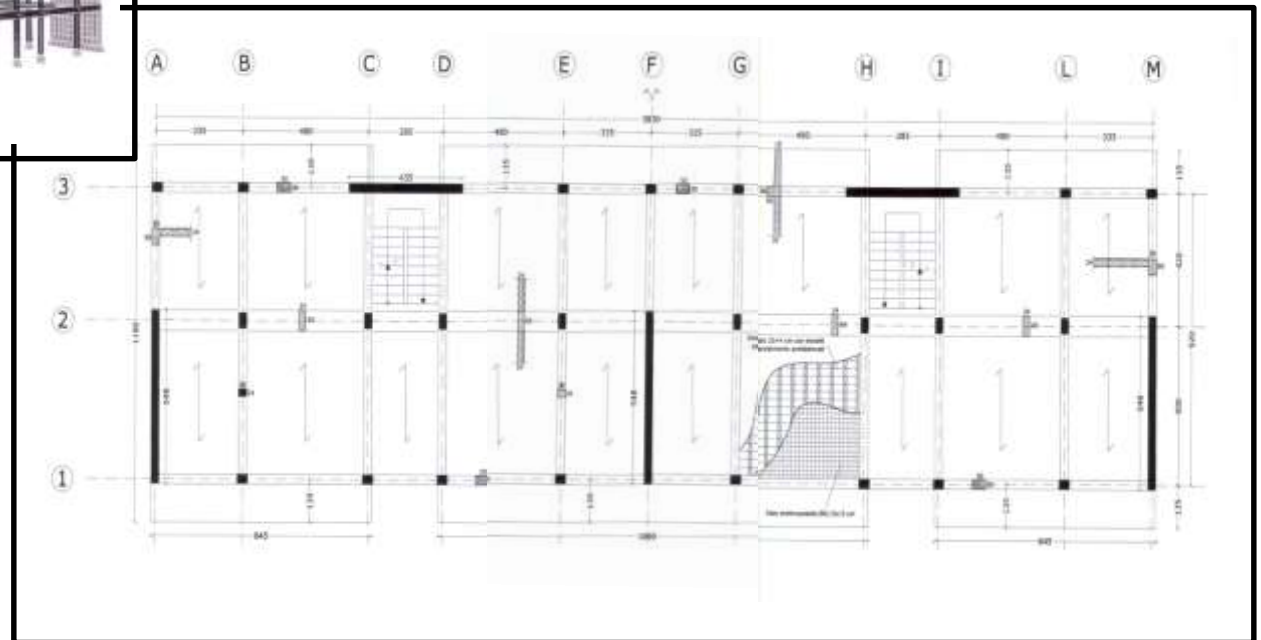
➤ *Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per isolamento sismico*

❖ Perché prescegliere l'applicazione dell'isolamento alla base rispetto alla progettazione tradizionale?

✓ **Convenienza economica per riduzione di setti e nuclei**

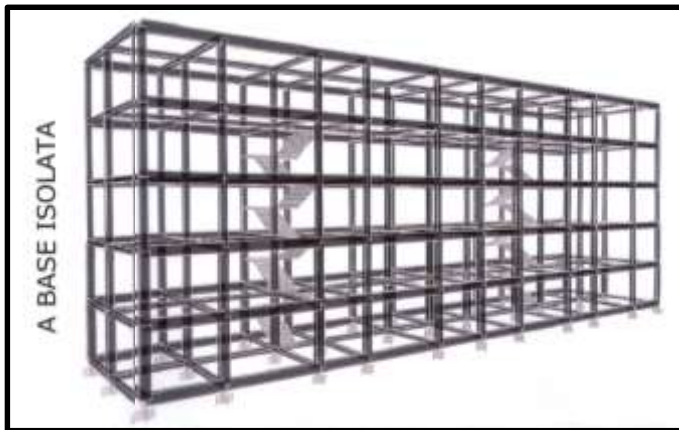


Soluzione progettuale tradizionale

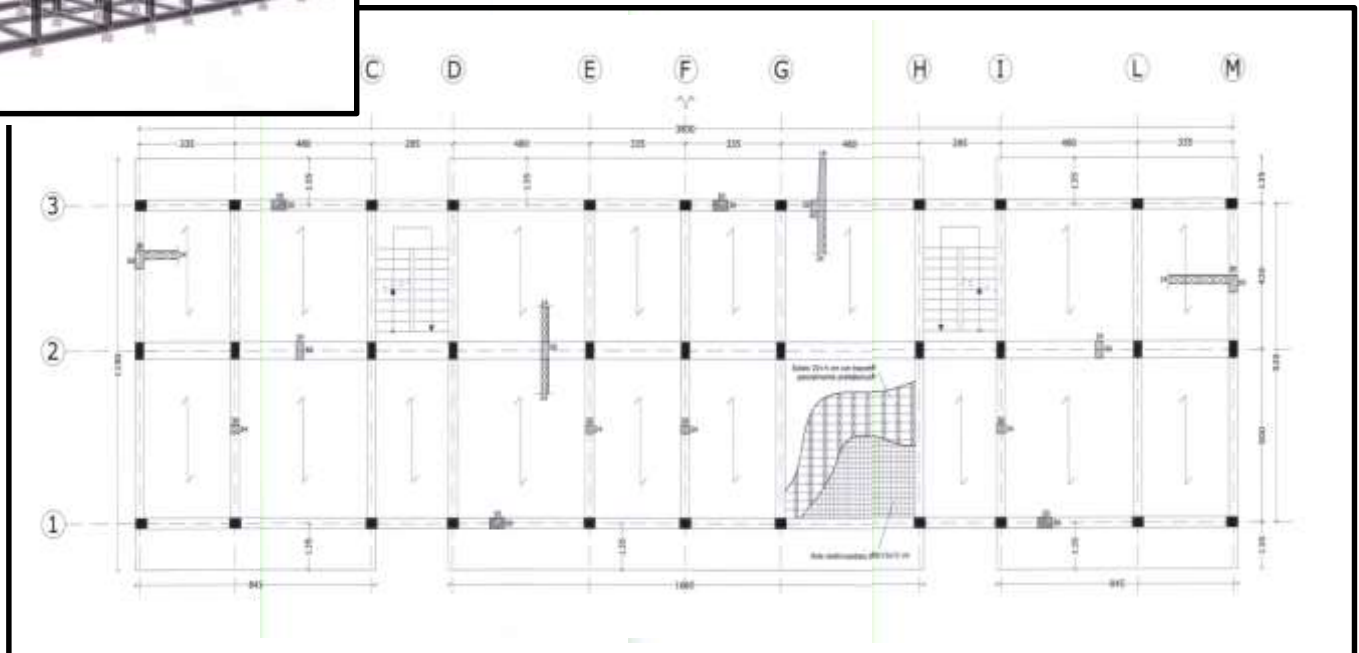


➤ *Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per isolamento sismico*

✓ **Convenienza economica per riduzione di setti e nuclei**



Soluzione progettuale con isolamento



NTC 14/01/2008

7.10.4 Indicazioni progettuali

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

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

Ove necessario, **gli isolatori devono essere protetti** da possibili effetti derivanti da attacchi del fuoco, chimici o biologici. In alternativa, occorre prevedere dispositivi che, in caso di distruzione degli isolatori, siano idonei a trasferire il carico verticale alla sottostruttura.”

NTC 14/01/2008

7.10.4.2 Controllo di movimenti indesiderati

Minimizzazione degli effetti torsionali per sovrapposizione della proiezione del centro di massa della sovrastruttura sul piano degli isolatori ed il centro di rigidità del sistema sottostruttura-isolamento.

Minimizzazione delle differenze di comportamento degli isolatori: le tensioni di compressione a cui lavorano devono essere più possibile uniformi.

Minimizzazione delle azioni di trazione sugli isolatori: gli interassi della maglia strutturale devono essere scelti in modo tale che il carico verticale “V” di progetto agente sul singolo isolatore sotto le azioni sismiche e quelle concomitanti, risulti essere di compressione o, al più, nullo ($V \geq 0$). Nel caso in cui dall’analisi risulti $V < 0$, occorre che la tensione di trazione sia in modulo inferiore al minore tra $2G$ (G modulo di taglio del materiale elastomerico) e 1 MPa , negli isolatori elastomerici, oppure, per gli isolatori di altro tipo, dimostrare, attraverso adeguate prove sperimentali, che l’isolatore è in grado di sostenere tale condizione, oppure predisporre opportuni dispositivi in grado di assorbire integralmente la trazione.

7.10.4.3 Controllo degli spostamenti sismici differenziali del terreno

Gli isolatori devono essere interposti fra due diaframmi rigidi (solaio in c.a. oppure griglia di travi progettata tenendo conto di possibili instabilità).

I dispositivi del sistema d’isolamento devono essere fissati ad entrambi i diaframmi o direttamente o attraverso elementi verticali il cui spostamento orizzontale in condizioni sismiche sia minore di $1/20$ dello spostamento relativo del sistema d’isolamento. Tali sistemi devono essere progettati in modo da rispondere in campo elastico.

NTC 14/01/2008

7.10.5.1 Proprietà del sistema d'isolamento

Le proprietà meccaniche del sistema di isolamento da adottare nelle analisi di progetto, derivanti dalla combinazione delle proprietà meccaniche dei singoli dispositivi che le costituiscono, sono le più sfavorevoli che si possano verificare durante la vita utile, tenendo conto di:

- entità delle deformazioni;
- variabilità nell'ambito della fornitura;
- velocità massima di deformazione;
- entità del carico verticale agente simultaneamente al sisma;
- entità dei carichi e delle deformazioni in direzione trasversale a quella considerata;
- temperatura;
- invecchiamento.

7.10.5.2 Modellazione

La sovrastruttura e la sottostruttura sono modellate come sistemi a comportamento elastico lineare.

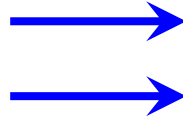
Il sistema d'isolamento può essere modellato in relazione alle caratteristiche meccaniche.

La deformabilità verticale degli isolatori deve essere tenuta in conto quando il rapporto fra la rigidezza verticale del sistema d'isolamento K_v e la rigidezza equivalente orizzontale K_{esi} è inferiore a 800 ($K_v \geq 800 K_{esi}$).

NTC 14/01/2008

7.10.5.3 Analisi

- 1. Analisi statica lineare**
- 2. Analisi dinamica lineare**
- 3. Analisi dinamica non lineare**



Il sistema d'isolamento può essere modellabile come sistema a comportamento visco-elastico

7.10.5.3.1 Analisi statica lineare

Condizioni di applicazione:

Regolarità in pianta;

Sovrastruttura: $H \leq 20$ m, non più di 5 piani e massima dimensione in pianta < 50 m;

La sottostruttura può essere considerata infinitamente rigida ($T \leq 0.05$ s);

Periodo equivalente $3T_{bf} \leq T_{is} \leq 3$ s;

$T_v \leq 0.1$ s e $K_v / K_{esi} \geq 800$;

Nessun isolatore in trazione;

Eccentricità baricentri di massa e rigidezza $\leq 3\%$;

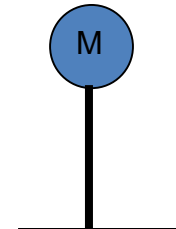
7.10.5.3.1 Analisi statica lineare

L'analisi statica lineare considera due traslazioni orizzontali indipendenti, cui sovrappone gli effetti torsionali.

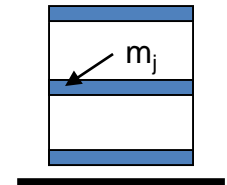
Spostamento del centro di rigidezza
in direzione orizzontale (SLU)



$$d_{dc} = \frac{F_{tot}}{K_{esi.min}} = \frac{MS_e(T_{is}, \xi_{esi})}{K_{esi.min}}$$



$$d_{dc} = \frac{\sum_j m_j S_e(T_{is}, \xi_{esi})}{K_{esi.min}}$$



Effetti torsionali (accidentali)



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

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

Raggio torsionale
del sistema di isolamento

$$r_x^2 = \frac{\sum_i (x_i^2 K_{yi} + y_i^2 K_{xi})}{\sum_i K_{yi}}$$

(x_i, y_i) = coordinate del dispositivo rispetto al centro di rigidezza

$e_{tot,x,y}$ = eccentricità totale nelle direzioni x ed y, inclusa quella accidentale

Sulla sovrastruttura, ai fini delle verifiche, gli effetti torsionali andranno valutati applicando il seguente fattore amplificativo delle sollecitazioni: $\delta = 1 + 0.6x / L_e$

7.10.5.3.2 Analisi dinamica lineare

Quando è possibile applicare questo tipo di analisi (ovvero quando il comportamento del sistema isolato è modellabile elasticamente, nel rispetto delle condizioni di cui al punto 7.10.5.2) la si può svolgere mediante:

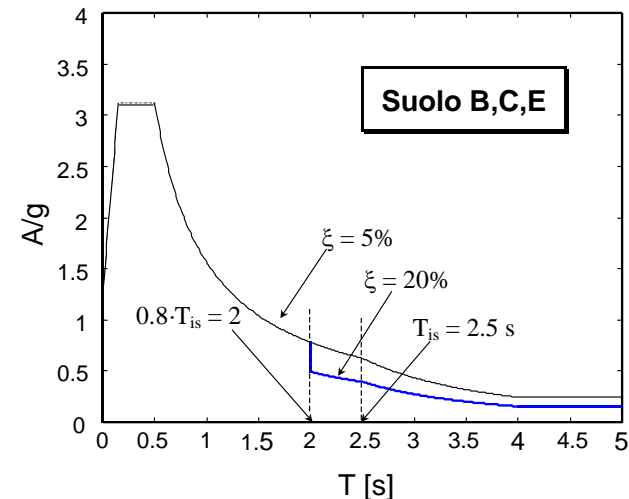
- **Analisi modale con spettro di risposta** (le due componenti si considerano agenti simultaneamente, adottando, ai fini della combinazione degli effetti quanto specificato in §7.3.3.1);

$$E = E_x + 0,3E_y + 0,3E_z$$

Per l'applicazione del metodo dello spettro di risposta lo spettro elastico va ridotto per tutto il campo di periodi $T \geq 0.8 T_{is}$
Assumendo per il coefficiente riduttivo η ($\eta \neq 1$ per $\xi \neq 5\%$) il valore corrispondente al coefficiente di smorzamento viscoso equivalente ξ_{esi} del sistema di isolamento

Smorzamento viscoso equivalente $\Rightarrow \xi_{esi} = \Sigma W_{di} / (2\pi F_i d_i)$

- **Integrazione al passo delle equazioni del moto**



Analisi della risposta sotto l'azione sismica: **analisi dinamica non lineare**

□ **Analisi per integrazione diretta al passo**

□ **Analisi “FNA”**

Sorace S., Terenzi G., Bandini L. (2006). *Le potenzialità della “FNA” nell'analisi dinamica non lineare di strutture dotate di sistemi avanzati di protezione sismica*, 16° Convegno Italiano di Meccanica Computazionale GIMC 2006, Articolo 46.

Il metodo “FNA” (Fast Nonlinear Analysis, Ibrahimbegovic e Wilson, 1989; Wilson, 1993) opera non attraverso l'integrazione diretta delle equazioni del moto, bensì **per estensione al campo non lineare del metodo dell'analisi per sovrapposizione modale**, mediante l'uso di vettori di Ritz dipendenti dal carico.

Conseguentemente, ad ogni passo temporale nel quale è discretizzata l'analisi, **soltanto la risposta degli elementi a non linearità concentrata viene sottoposta ad un processo solutivo di tipo incrementale-iterativo**, mentre le matrici di rigidità e di smorzamento viscoso lineare relative alla parte del modello caratterizzata da una risposta di tipo elastico non sono assoggettate ad aggiornamenti al passo.

Il metodo prevede di **separare il vettore complessivo delle forze nodali associato alle reazioni esercitate dagli elementi non lineari**, $\mathbf{R}_{nl}(t)$, dal termine delle forze di reazione elastiche della restante parte del modello, nelle equazioni del moto del sistema strutturale:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}_1\mathbf{u}(t) + \mathbf{R}_{nl}(t) = \mathbf{R}(t)$$

Wilson E., *Static and Dynamic Analysis of Structures*, 4th edition, CSI, Berkeley, CA, 2004

Riepilogando, il metodo FNA è suggerito quando:

- **le non linearità meccaniche siano concentrate** in specifici elementi del modello;
- **non entrino in gioco effetti del 2° ordine** (grandi spostamenti, instabilità) o **modifiche della rigidezza** prodotte da effetti deformativi globali

Analisi dinamica non lineare

➤ **Problema di predimensionamento e verifica del sistema isolato**

- ✓ Fase preliminare basata sulla schematizzazione della struttura come oscillatore semplice

- ✓ Fase di verifica finale sul modello completo della struttura



Assunzione degli obiettivi “prestazionali”



Accertamento delle capacità di risposta del sistema sulla base di tali obiettivi

NTC 14/01/2008

7.10.6.1 Verifiche agli stati limite di esercizio

Il livello di protezione richiesto per la sottostruttura e le fondazioni nei confronti dello SLD è da ritenere conseguito se sono soddisfatte le relative verifiche nei confronti dello SLV, di cui al §7.10.6.2.

Le verifiche allo SLD della sovrastruttura devono essere effettuate controllando che gli spostamenti interpiano ottenuti dall'analisi siano inferiori ai $2/3$ dei limiti indicati per lo SLD nel § 7.3.7.2.

I dispositivi del sistema d'isolamento non devono subire danni che possano comprometterne il funzionamento nelle condizioni di servizio. Tale requisito si ritiene normalmente soddisfatto se sono soddisfatte le verifiche allo SLV dei dispositivi. In caso di sistemi a comportamento non lineare, eventuali spostamenti residui al termine dell'azione sismica allo SLD devono essere compatibili con la funzionalità della costruzione.

7.10.6.2.1 Verifiche allo SLV

...

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

In caso contrario, essi devono essere verificati rispetto alle sollecitazioni prodotte dalle forze trasmesse dal sistema d'isolamento combinate con le sollecitazioni prodotte dalle accelerazioni del terreno direttamente applicate alla sottostruttura.

Nel caso in cui la sottostruttura possa essere assunta infinitamente rigida ($T_{st} < 0.05$ s) le forze d'inerzia direttamente applicate ad essa possono essere assunte pari al prodotto delle masse della sottostruttura per l'accelerazione del terreno a_g . La combinazione delle sollecitazioni può essere effettuata mediante la regola della radice quadrata della somma dei quadrati.

Le condizioni di resistenza **degli elementi strutturali della sovrastruttura** possono essere soddisfatte considerando gli effetti dell'azione sismica divisi del fattore $q = 1,5$ combinati con le altre azioni secondo le regole del §3.2.4.

Nelle condizioni di massima sollecitazione **le parti dei dispositivi** non impiegate nella funzione dissipativa devono rimanere in campo elastico, nel rispetto delle norme relative ai materiali di cui sono costituite, e comunque con un coefficiente di sicurezza almeno pari ad 1,5.

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

NTC 14/01/2008

7.10.6.2 Verifiche allo SLC

I dispositivi del sistema d'isolamento debbono essere in grado di sostenere, senza rotture, gli spostamenti d_2 , valutati per un terremoto avente probabilità di superamento pari a quella prevista per lo SLC.

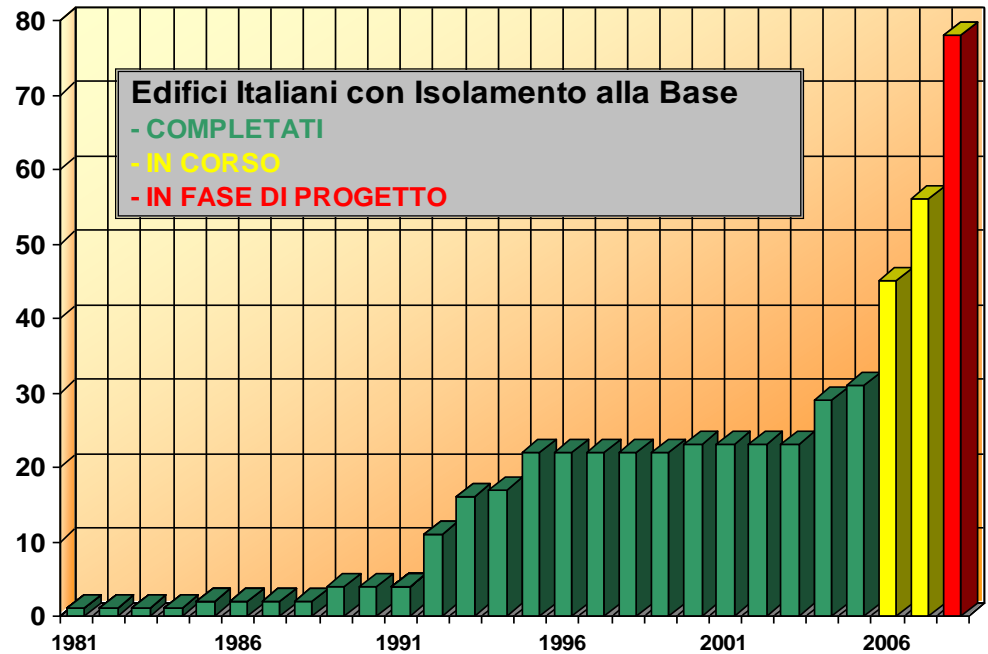
Nel caso di sistemi a comportamento non lineare, allo spostamento ottenuto con l'azione sismica detta, occorre aggiungere il maggiore tra lo spostamento residuo allo SLD ed il 50% dello spostamento corrispondente all'annullamento della forza, seguendo il ramo di scarico a partire dal punto di massimo spostamento raggiunto allo SLD.

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

□ Isolamento sismico

Andamento delle applicazioni agli edifici in Italia

*Con il Progetto C.A.S.E. ed altre successive applicazioni
si sta arrivando attualmente a circa 300 edifici*



*(si noti la lunga stasi dovuta
ad assenza di normativa)*

Il sistema d'isolamento e dissipazione supplementare alla base

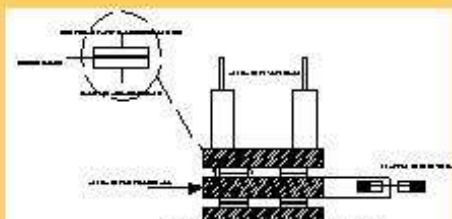
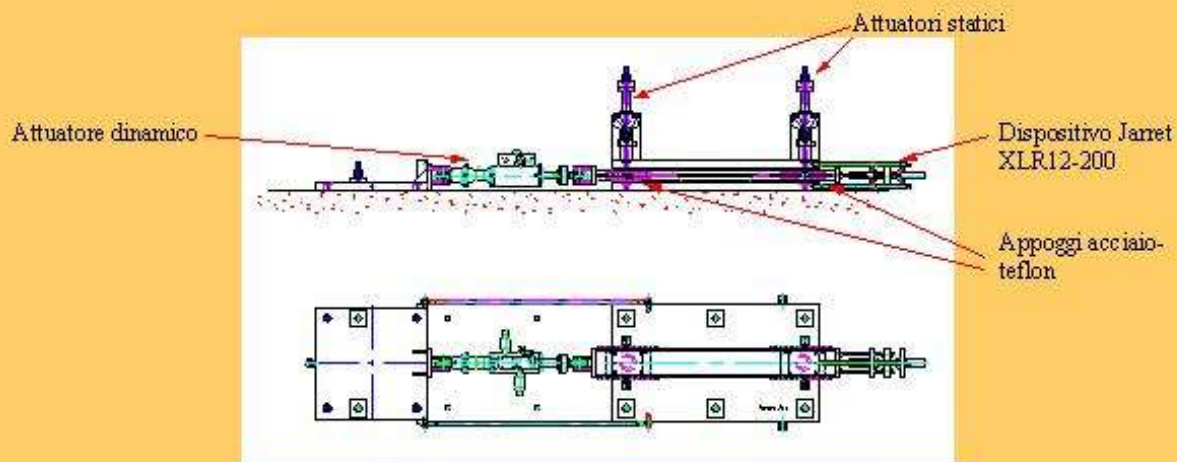
Prima applicazione reale

Edificio destinato a nuova sede di Pubblica Assistenza
“Fratellanza popolare”, in località Grassina – Firenze



Il sistema d'isolamento e dissipazione supplementare alla base Progetto Europeo "DISPASS" Verifica sperimentale delle prestazioni di un edificio di acciaio in scala 2:3 Prove pseudodinamiche "con sottostrutturazione"

Apparato sperimentale

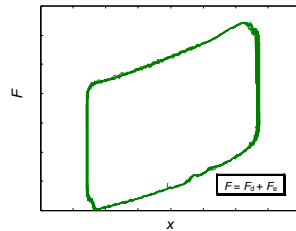
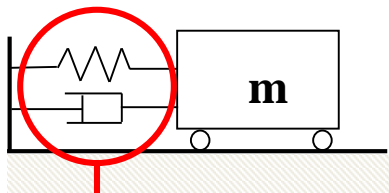


➤ Dispositivi fluido-viscosi (a matrice siliconica)

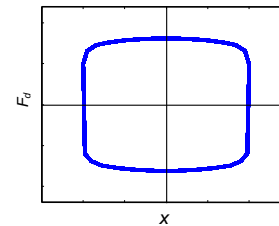
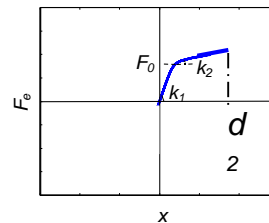
Metodologia di valutazione preliminare del coefficiente di smorzamento da attribuire ai dissipatori fluido-viscosi nell'ambito del sistema BISD

S. Sorace, G. Terenzi (2001). Non-linear dynamic modelling and design procedure of FV spring-dampers for base isolation, *Engineering Structures*, Vol. 23, pp. 1556-1567. Awarded Munro Prize 2001

Modello ad un grado di libertà



$$F(t) = F_d(t) + F_e(t)$$



$$F_e(t) = k_2 x(t) + \frac{(k_1 - k_2) x(t)}{\left[1 + \left|\frac{k_1 x(t)}{F_0}\right|^R\right]^{1/R}}$$

$$F_d(t) = c \cdot \text{sgn}[\dot{x}(t)] \cdot |\dot{x}(t)|^\alpha$$

Parametri da stabilire

a) Caratteristiche elastiche del dispositivo

$$\cdot T_{is} \Rightarrow k_2 = 4\pi^2 m / T_{is} \Rightarrow k_1 = 15 k_2$$

$$\cdot F_0 = F_{\max} / n \rightarrow n = 2 \div 7$$

b) Caratteristiche di smorzamento del dispositivo

$$c(\eta, \varphi, A_i) = c_{0.1}(\eta, A_i) \frac{(1 + \mathcal{G})^\mu}{[(1 - \varphi^2)^2 + \eta^2]^\mu}$$

$c_{0.1}$ = coefficiente di smorzamento calcolato come valore tale da ottenere il prestabilito “loss factor” η per azioni sinusoidali con ampiezza A_i , e frequenza f_g pari ad 1/10 di quella fondamentale di vibrazione f_{is} della struttura isolata alla base;

A_i = ampiezza massima dell’azione;

$\varphi = f_g/f_{is}$; θ, μ = coefficienti di calibrazione.

$$\eta = \frac{E_d}{2\pi E_e}$$

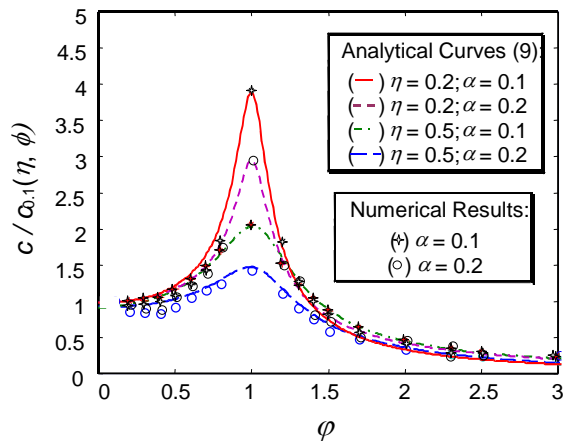


Table 1
Calibrated values of coefficients θ and μ

α	η	θ	μ
0.1	0.1	0	0.45
0.2	0.1	0	0.38
0.1	0.2	$-\varphi/8$	0.44
0.2	0.2	$-\varphi/8$	0.35
0.1	0.3	$+\varphi/8$	0.44
0.2	0.3	$-\varphi/8$	0.30
0.1	0.4	$+\varphi/8$	0.44
0.2	0.4	$-\varphi/8$	0.30
0.1	0.5	$+\varphi/4$	0.44
0.2	0.5	$-\varphi/4$	0.35
0.1	≥ 0.6	$+\varphi/4$	0.44
0.2	≥ 0.6	$-\varphi/4$	0.35

Progetto preliminare dei dispositivi fluido-viscosi

$$c(\eta, \varphi, A_i) = c_{0,1}(\eta, A_i) \frac{(1 + \vartheta)^\gamma}{[(1 - \varphi^2)^2 + \eta^2]^\gamma}$$

Fissati: $\eta = 0,5$ ($\Leftrightarrow \xi_{eq} = 0,25$)

$\varphi = 1,6$

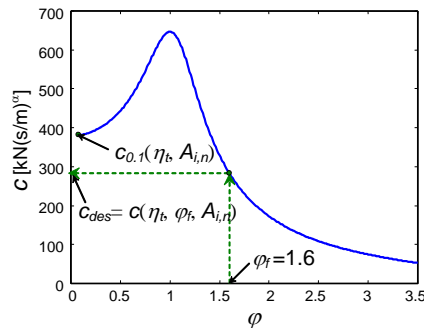
Essendo: $A_i = 0,3 \text{ g}$



$$c(\eta(\varphi, A_i)) = 287 \text{ kN} \cdot (\text{s/m})^\alpha$$



$$F_d(t) = c \cdot |\dot{x}(t)|^\alpha \cdot \text{sign}(x(t)) \quad (\alpha = 0,15)$$

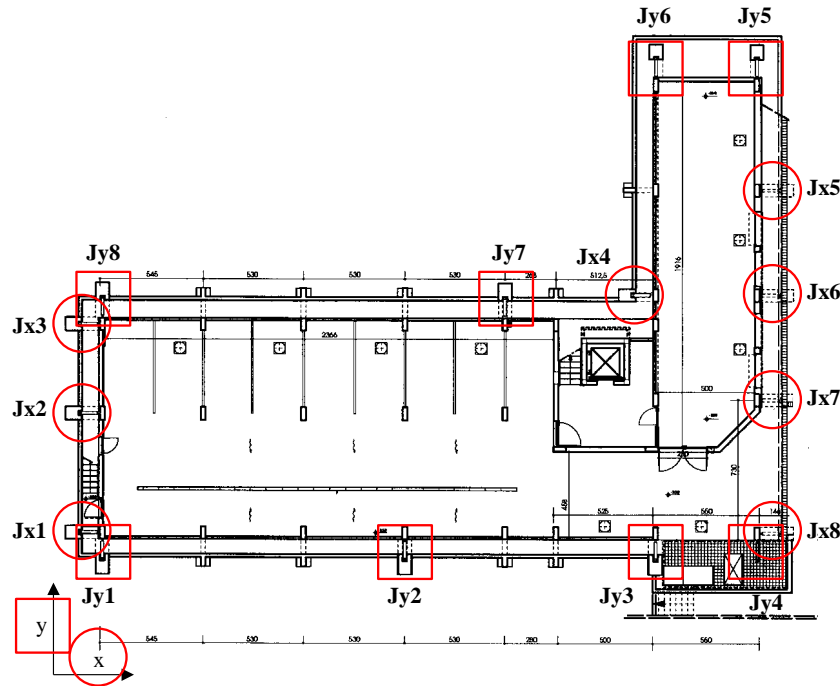


Sorace, S., Terenzi, G. (2005). Application of a combined base isolation/supplemental damping seismic protection strategy to a public building in Florence. *Proc., International Conference "250th Anniversary of the 1755 Lisbon Earthquake"*, Lisbon, Portugal, November 2005, LNEC Press, Lisbon, 481-486.

S. Sorace, G. Terenzi (2008). Analysis and demonstrative application of a base isolation/supplemental damping technology, *Earthquake Spectra*, 24(3), 2008, 775-793

Scelta e posizionamento dei dispositivi siliconici e degli appoggi scorrevoli

Verifica dei valori finali dei parametri di progetto



*Dispositivi Jarret
BC10S-100BF*

$$k_{2f} \equiv k_{2pr}$$

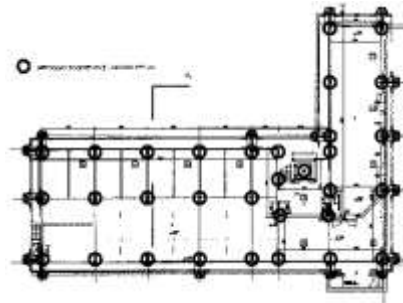
$$k_{1f} \equiv k_{1pr}$$

$$T_{is,x,f} = 2,22 \text{ s}$$

$$T_{is,y,f} = 2 \text{ s}$$

$$c_f \equiv c_{pr}$$

$$F_{0f} = 85 \text{ kN}$$



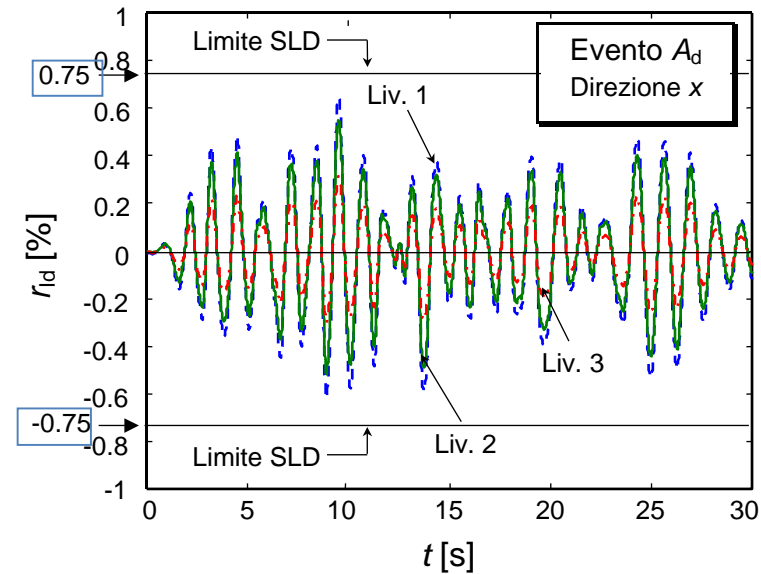
Appoggi scorrevoli ALGA

N.10 – portata 600 kN

N.18 – portata 1000 kN

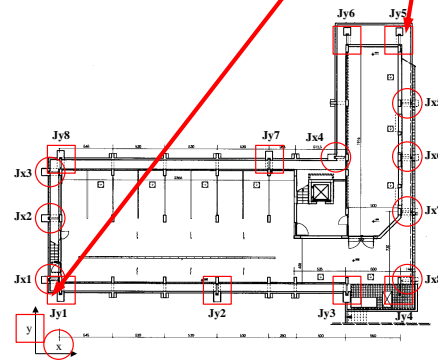
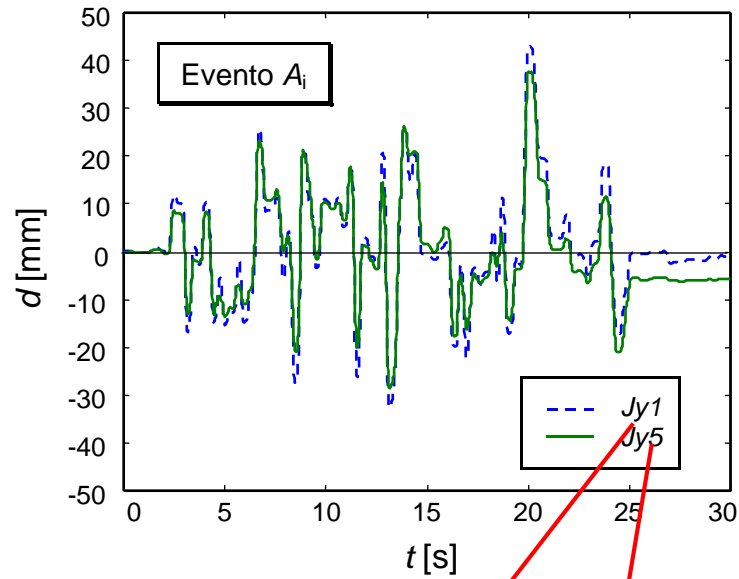
N. 4 – portata 1400 kN

Risultati – Evento di servizio ($A_d = 0,12$ g)

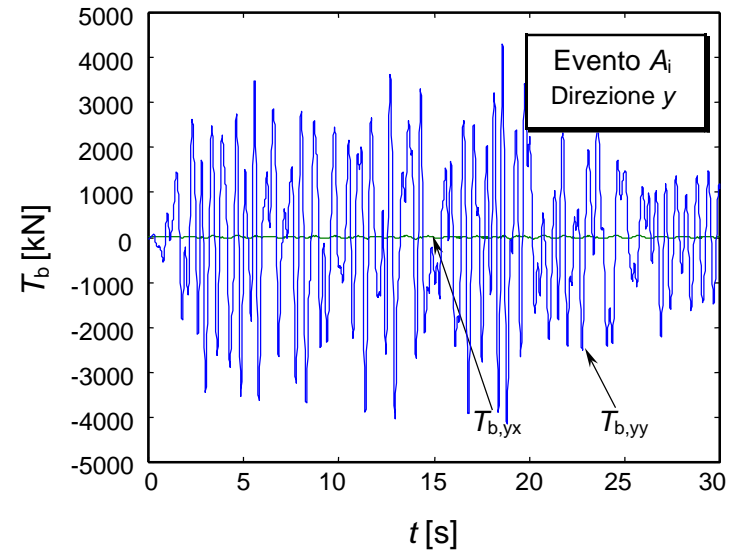
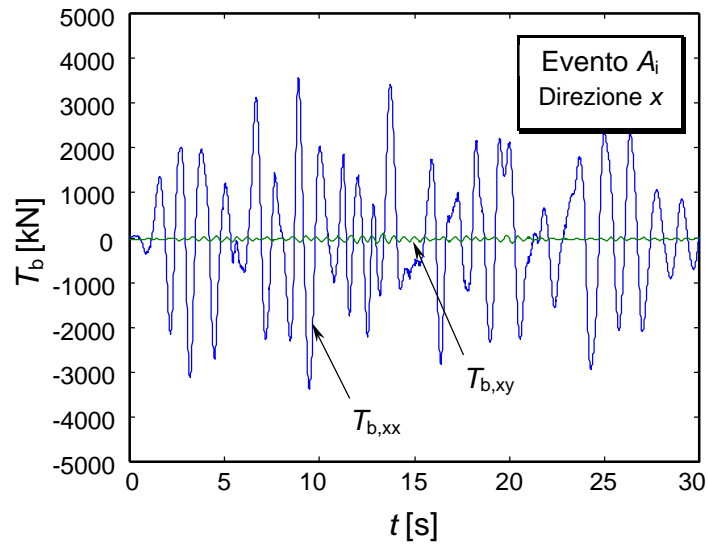


r_{id} = spostamento relativo di piano normalizzato all'altezza interpiano

Risultati – Evento base ($A_i = 0,3 \text{ g}$)



Risultati – Evento base ($A_i = 0,3 \text{ g}$)

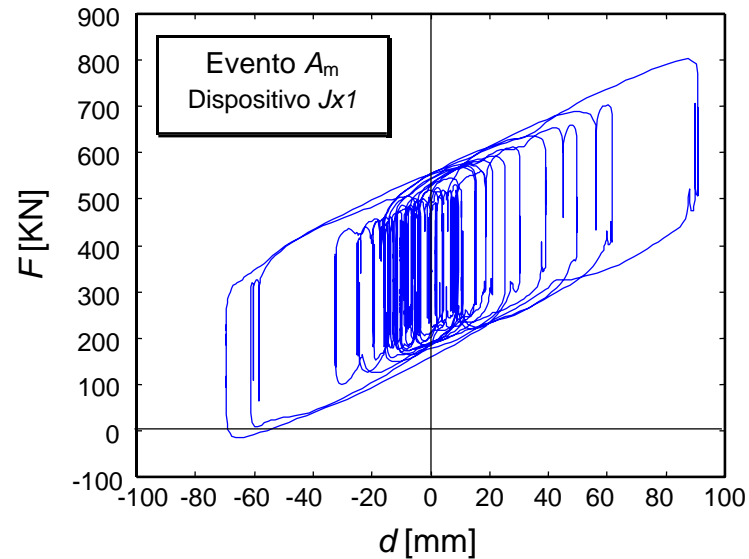


1. $T_{b,xy}, T_{b,yx}$ trascurabili rispetto a $T_{b,xx}, T_{b,yy}$

2. $T_{p1,x} = 0,093 W_s$; $T_{p1,y} = 0,121 W_s$

(valori da dividere per 1,5 ai fini delle verifiche di progetto)

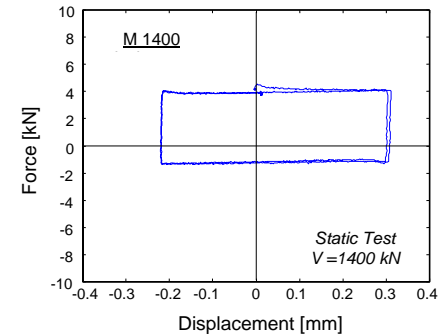
Risultati – Evento massimo considerato ($A_m = 0,45 \text{ g}$)



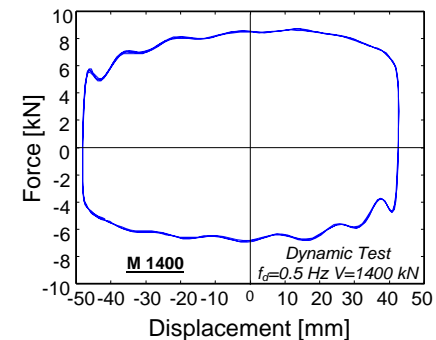
$|d_{\max}|$ inferiore al fondo corsa dei dispositivi

Prove di qualificazione e di accettazione degli appoggi scorrevoli in acciaio-PTFE

Le prove sono state condotte presso il Laboratorio del CESI-ISMES a Seriate, utilizzando macchine di prova specificatamente progettate dall'ENEA per campagne sperimentali su isolatori



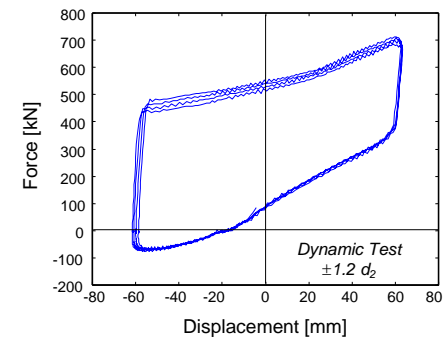
Risposta ciclica ottenuta dalla prova statica di qualificazione sul dispositivo M 1400, per $V = 1400$ kN



Risposta ciclica ottenuta dalla prova dinamica di qualificazione sul dispositivo M 1400, alla frequenza di progetto pari a 0.5 Hz, e per un carico verticale $V = 1400$ kN

Prove di qualificazione e di accettazione sui dissipatori fluido-viscosi

Le prove sono state condotte presso il Laboratorio Prove materiali e strutture dell'Università della Basilicata, a Potenza



Risposta ciclica ottenuta dalla prova dinamica di qualificazione per uno spostamento di ampiezza pari a $\pm 1.2 d_2$

✓ *Selezione di immagini dal cantiere: gli impianti*

NTC 14/01/2008 (§ 7.10.6.2.2 Verifiche allo SLC)

- **Tutte le condutture degli impianti** che attraversano i giunti intorno alla struttura isolata dovranno **non subire danni e rimanere funzionanti per i valori di spostamento corrispondenti allo SLD.**
- **Quelle del gas** e di altri impianti pericolosi che attraversano i giunti di separazione dovranno essere progettati per **consentire gli spostamenti relativi della sovrastruttura isolata corrispondenti allo SLU**, con lo stesso livello di sicurezza adottato per il progetto del sistema d'isolamento.

Raccordo flessibile
impianto del gas



Raccordo flessibile
pluviale

Raccordo flessibile
impianto idraulico



✓ *Selezione di immagini dal cantiere*



Posizionamento degli isolatori in acciaio-PTFE sui rispettivi baggioli



Vista dell'isolatore in acciaio-PTFE posizionato al disotto del vano ascensore, prima del getto della soletta intradossale dello stesso



Vista delle armature dei contrafforti di reazione dei dispositivi siliceosi



Vista di una delle dime d'acciaio posizionate, in qualità di distanziatori sostitutivi dei dispositivi fluido-viscosi, prima del getto dell'impalcato mobile



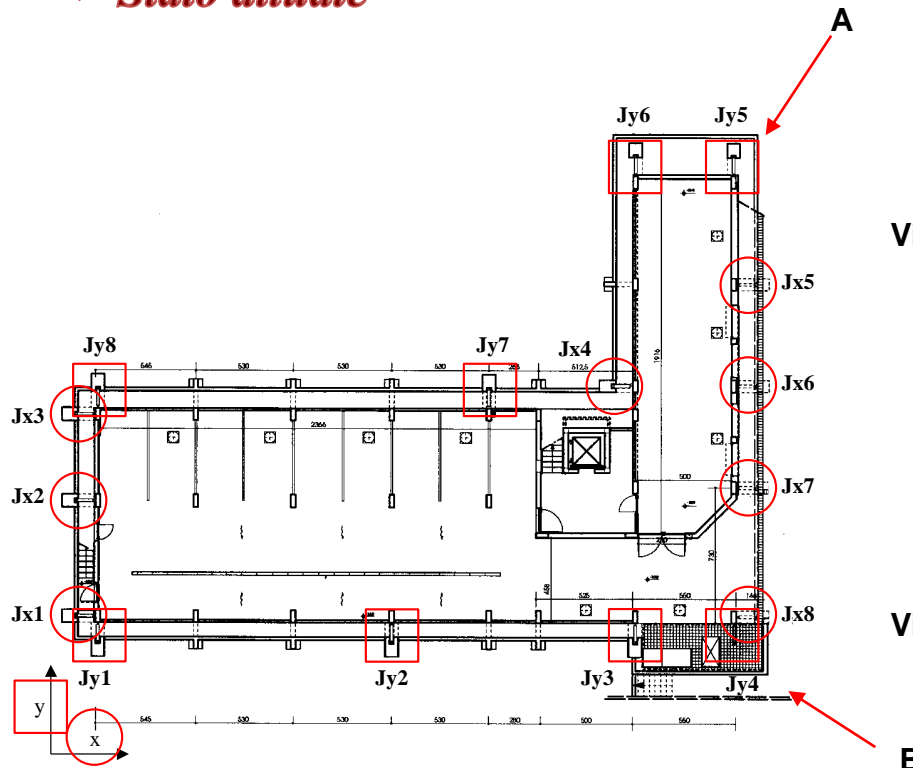
Vista di un dispositivo durante la fase di completamento della sovrastruttura



Raccordo flessibile impianto del gas

Raccordi flessibili impianto idraulico

✓ *Stato attuale*



Vista A

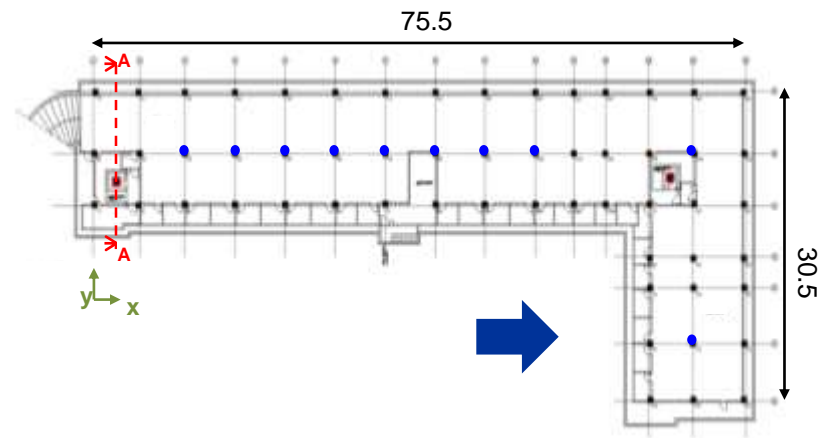
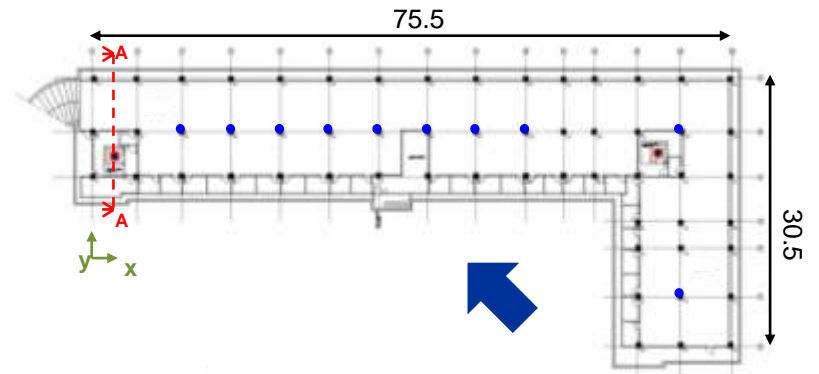


Vista B

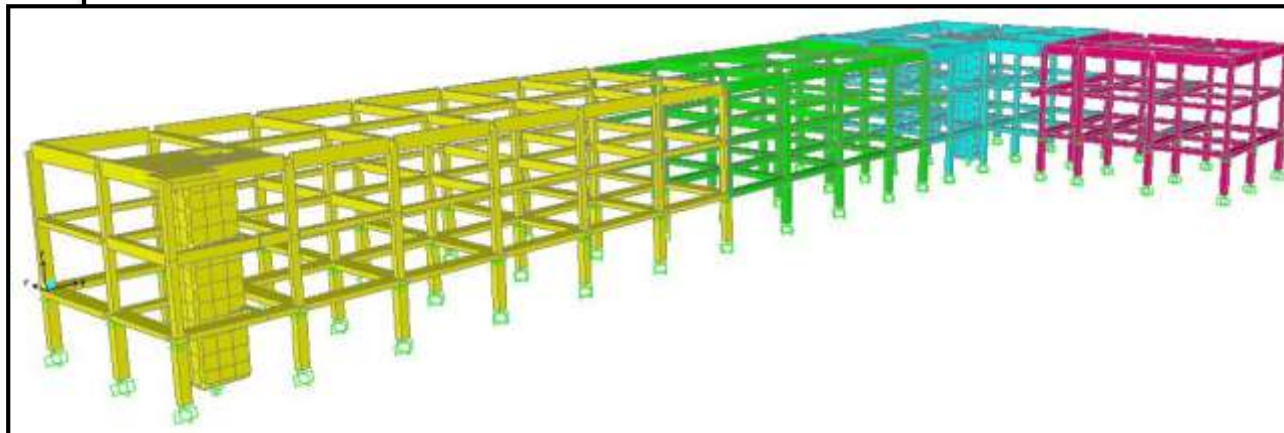
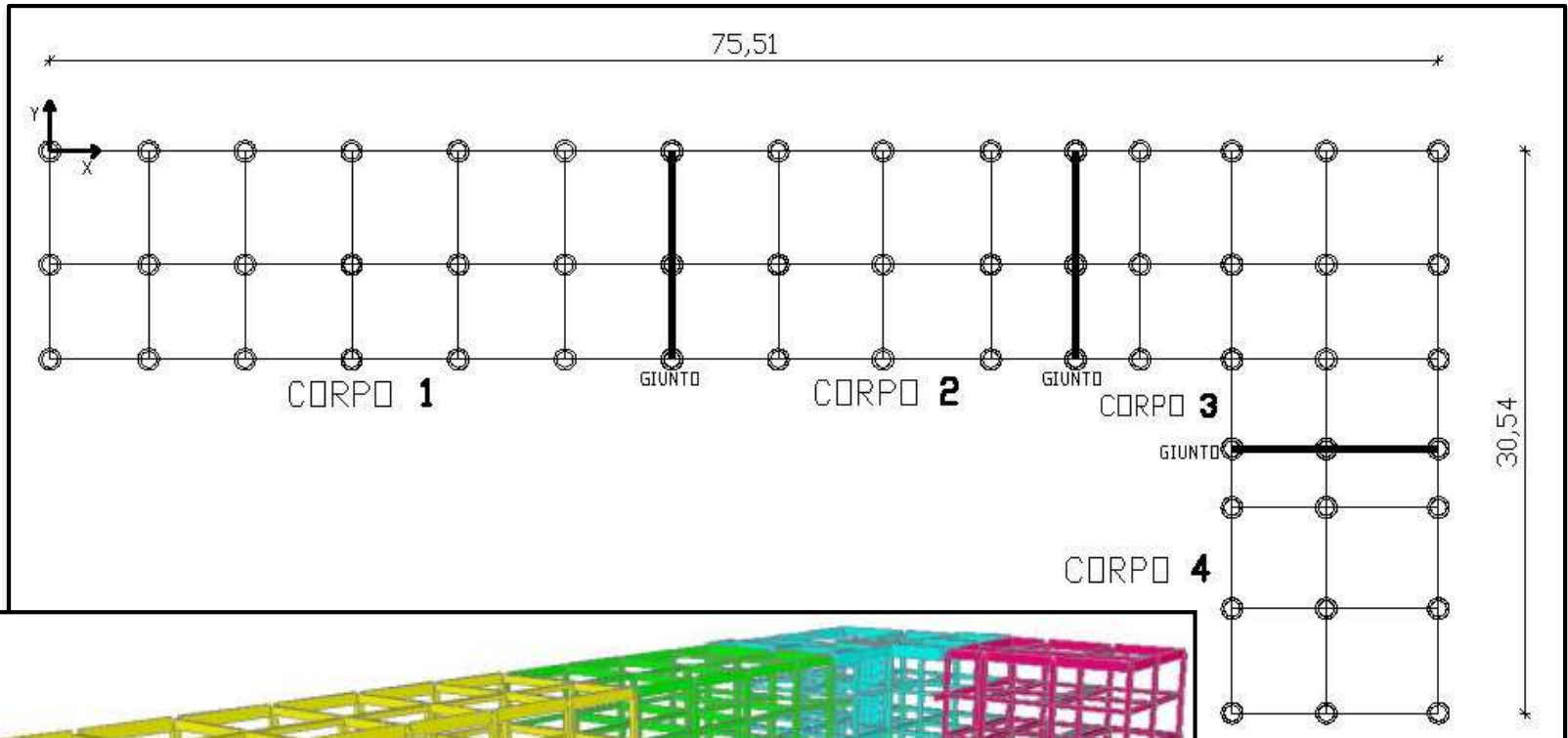


➤ *Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per isolamento sismico*

- **Realizzazione: edificio ad uso residenziale situato a Sesto Fiorentino (FI)
Intervento di edilizia sovvenzionata (committente: CASA SpA)**



➤ **Edificio ad uso residenziale situato a Sesto Fiorentino (Firenze)
Intervento di edilizia sovvenzionata (committente: CASA SpA)**



CSI (2007). *SAP2000NL, Structural Analysis Programs – Theoretical and Users Manual. Version No. 11.9, Berkeley, CA*

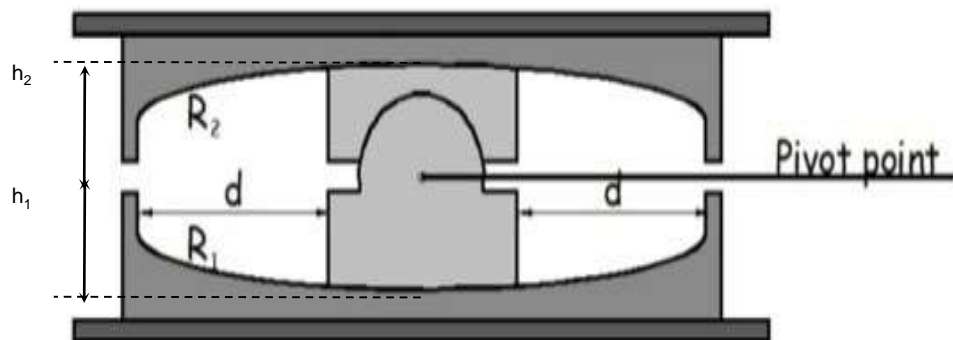
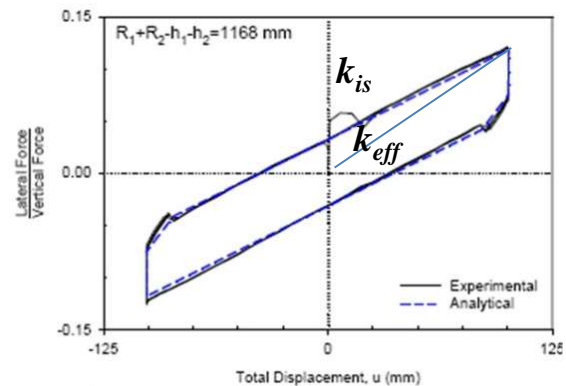
✓ Dati di progetto dei dispositivi

$$T_{is} \cong 3 \text{ s}; T_{eff} \cong 2,5 \text{ s}; \eta = 0,44 (\Leftrightarrow \zeta_{eq} = 0.22)$$

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

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

$$\zeta_{eq} = \frac{2}{\pi} + \frac{1}{\frac{d}{\mu R} + 1}$$



➤ *Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per isolamento sismico*

- **Realizzazione: edificio ad uso residenziale situato a Sesto Fiorentino (FI)
Intervento di edilizia sovvenzionata (committente: CASA SpA)**

Caratteristiche dei dispositivi:

I dispositivi impiegati sono distinti, per la sola capacità di carico verticale, allo stato SLU *statico* ed SLV *sismico*:

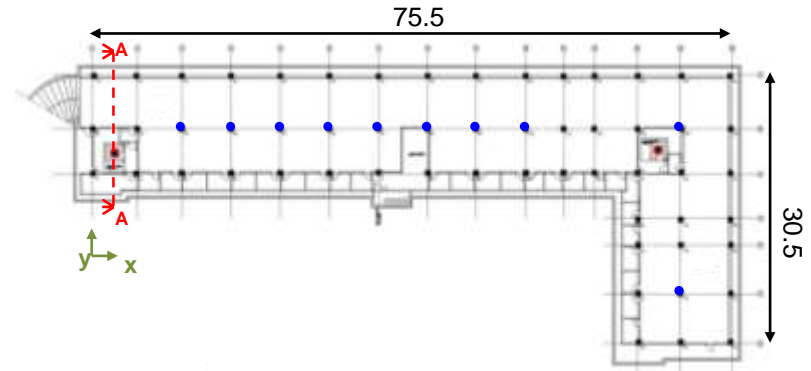
**14 Dispositivi del tipo FIP-D130/400 (2535)
con rotula centrale più grande:**

$N_{st_1}(SLU)=1600KN$, $N_{sis_1}(SLV)=1200KN$

45 Dispositivi del tipo FIP-D130/400 (2535):

$N_{st_2}(SLU)=1300KN$, $N_{sis_2}(SLV)=1000KN$.

Sono tutti a doppia superficie di scorrimento, con raggio equivalente di 2535 mm, attrito $\mu=0,025$, identico per le due superfici, e spostamento utile massimo di $\pm 200mm$.



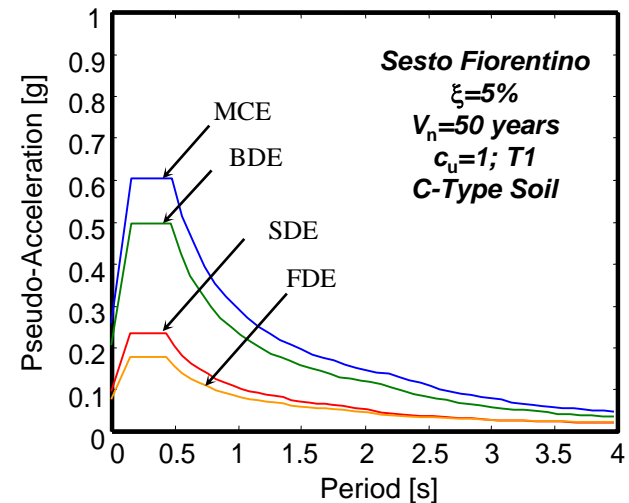
Sorace S., Terenzi G. (2014). Analysis, design and construction of a base-isolated multiple building structure, *Advances in Civil Engineering*, Volume 2014, Hindawi Publishing Corporation, 13 p, ID 585429.

➤ *Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per isolamento sismico*

- **Realizzazione: edificio ad uso residenziale situato a Sesto Fiorentino (FI)
Intervento di edilizia sovvenzionata (committente: CASA SpA)**

Dati sismici del Comune di Sesto Fiorentino

FDE=L1: PGA = 0,073 g
SDE=L2: PGA = 0,088 g
BDE=L3: PGA = 0,203 g
MCE=L4: PGA = 0,251 g



➤ *Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per isolamento sismico*

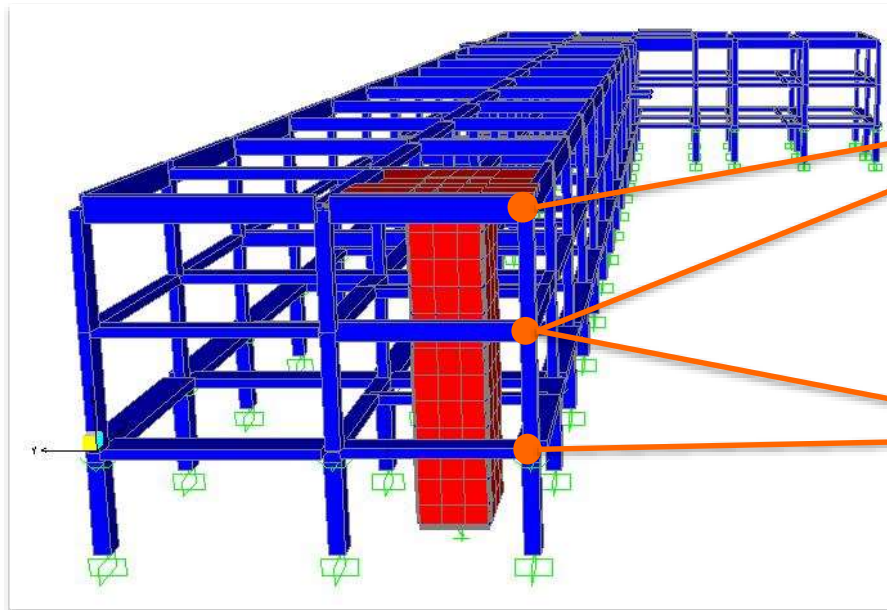
- **Realizzazione: edificio ad uso residenziale situato a Sesto Fiorentino (FI)
Intervento di edilizia sovvenzionata (committente: CASA SpA)**

✓ **Innalzamento delle capacità di prestazione**

$$\text{SDE=L2: } A_d = 0,2 \text{ g}$$

Verifica degli spostamenti interpiano

$$d_r < 2/3(0,005 h)$$



Nodi: 657 - 504

$$0,07 < 1,1 \text{ cm}$$

$$0,08 < 1,1 \text{ cm}$$

Nodi: 504 - 345

$$0,04 < 1,1 \text{ cm}$$

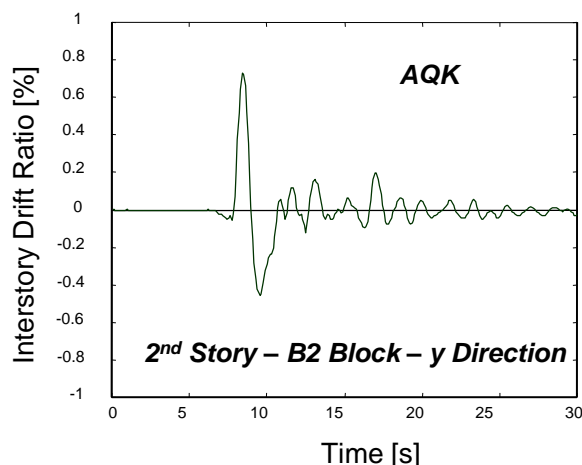
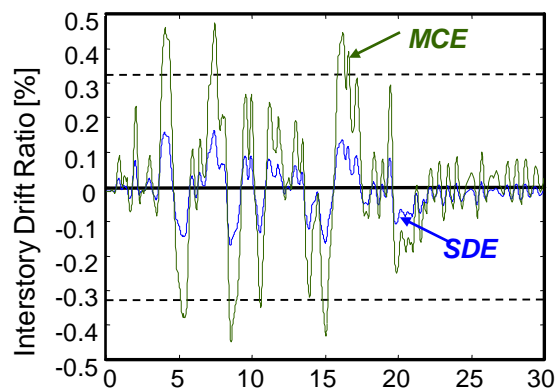
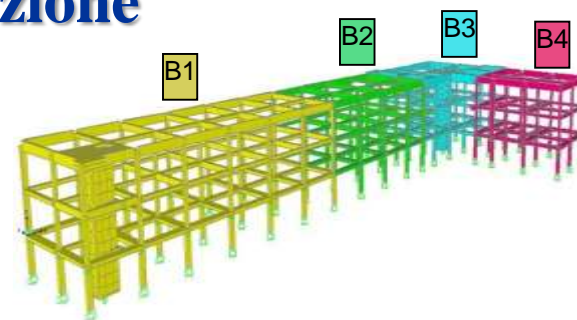
$$0,05 < 1,1 \text{ cm}$$

➤ **Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per isolamento sismico**

- **Realizzazione: edificio ad uso residenziale situato a Sesto Fiorentino (FI)
Intervento di edilizia sovvenzionata (committente: CASA SpA)**

✓ **Innalzamento delle capacità di prestazione**

MCE=L4: PGA = 0,251 g; $A_c = 0,6$ g



BLOCCO B2: i massimi di spostamento per l'SDE (azioni di livello L2) e l'MCE (L4) sono minori dello 0,33% di spostamento interpiano (limite per lo SLO) e dello 0,5% (limite per lo stato limite ION).

Per la componente AQK del terremoto dell'Aquila, caratterizzata da una PGA pari a 0,353 g gli spostamenti interpiano superano il limite di ION (0,5%) ma non quello di IO strutturale (1%).

Sorace S., Terenzi G. (2014). Analysis, design and construction of a base-isolated multiple building structure, Advances in Civil Engineering, Volume 2014, Hindawi Publishing Corporation, 13 p, ID 585429.

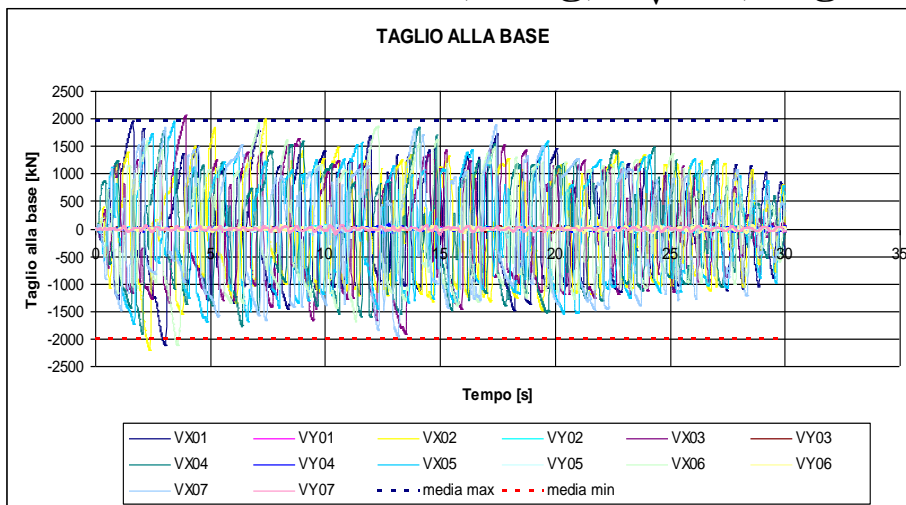
➤ *Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per isolamento sismico*

- Realizzazione: edificio ad uso residenziale situato a Sesto Fiorentino (FI)
Intervento di edilizia sovvenzionata (committente: CASA SpA)

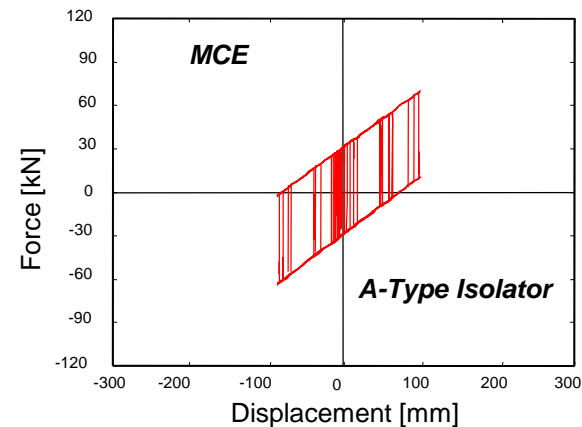
✓ **Innalzamento delle capacità di prestazione**

✓ **Riduzione delle azioni sulla sovrastruttura per ciascuno degli Stati limite di riferimento**

BDE=L3: PGA = 0,203 g; $A_V = 0,49$ g



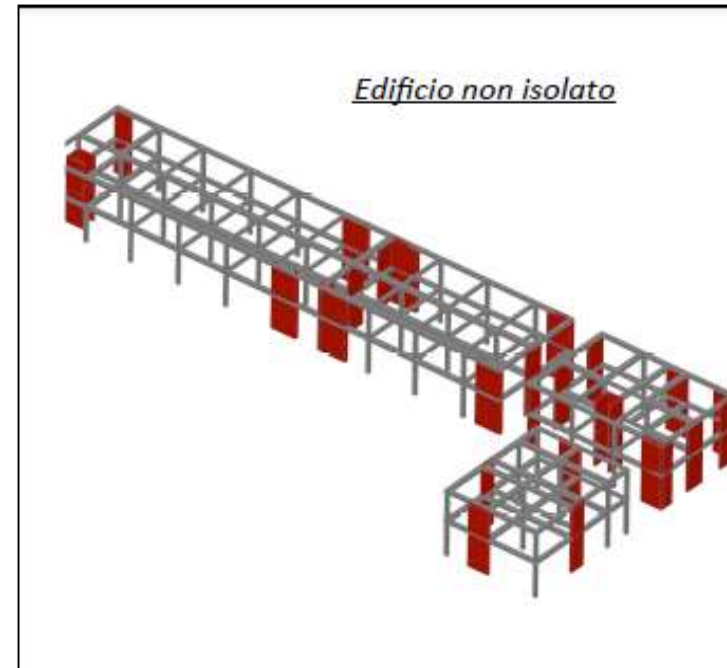
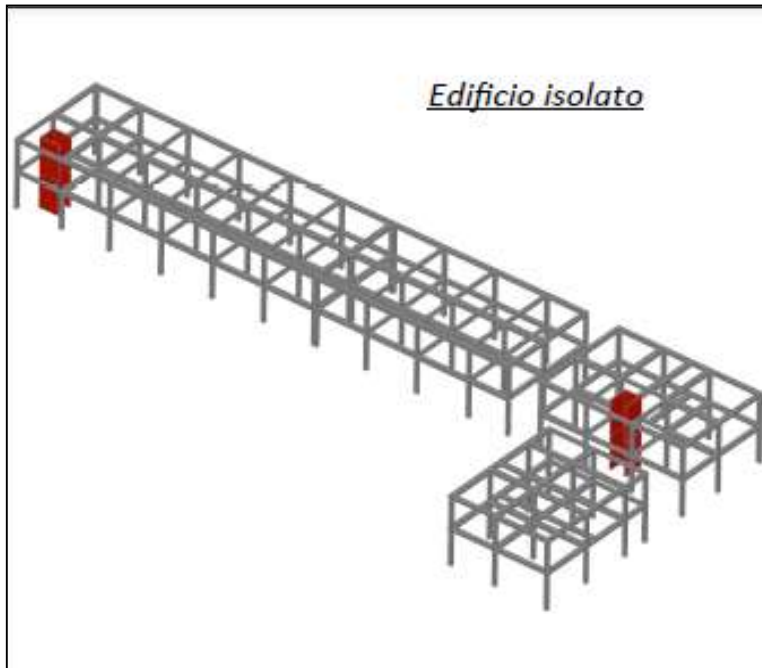
MCE=L4: PGA = 0,251 g; $A_c = 0,6$ g



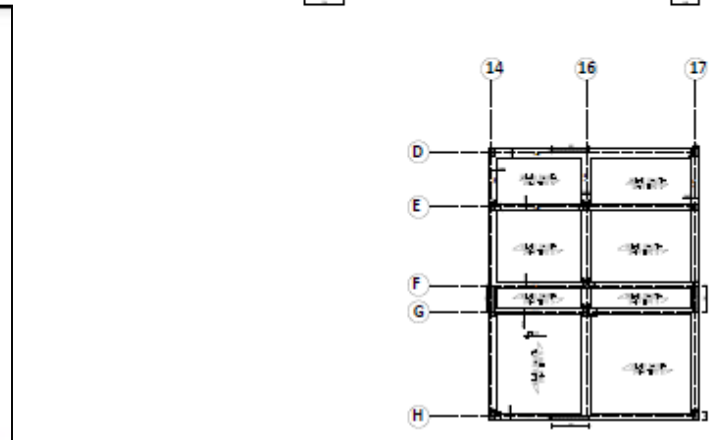
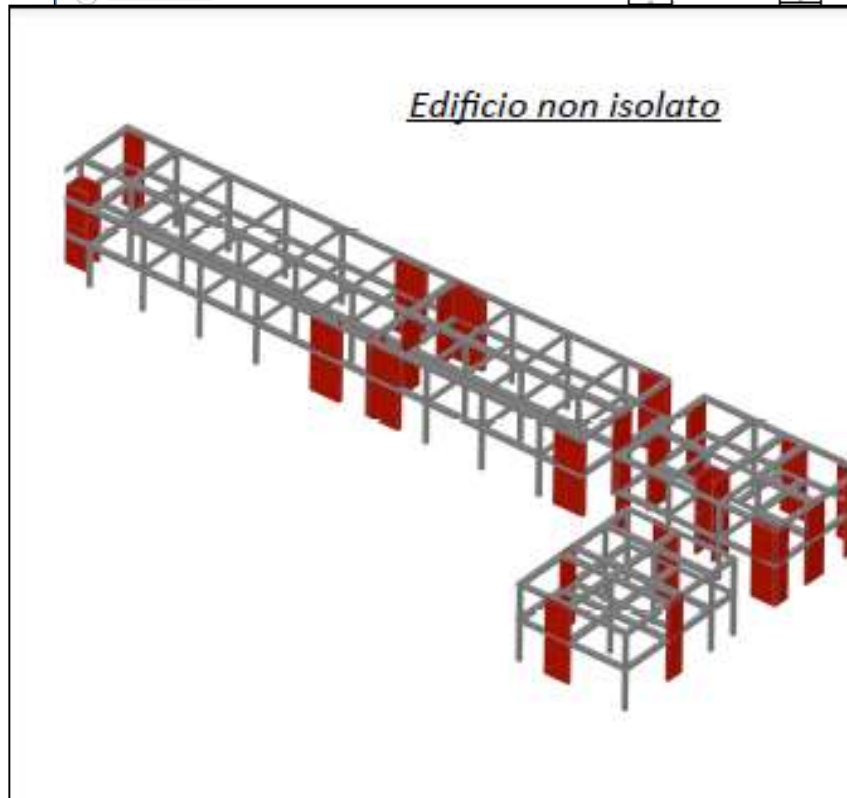
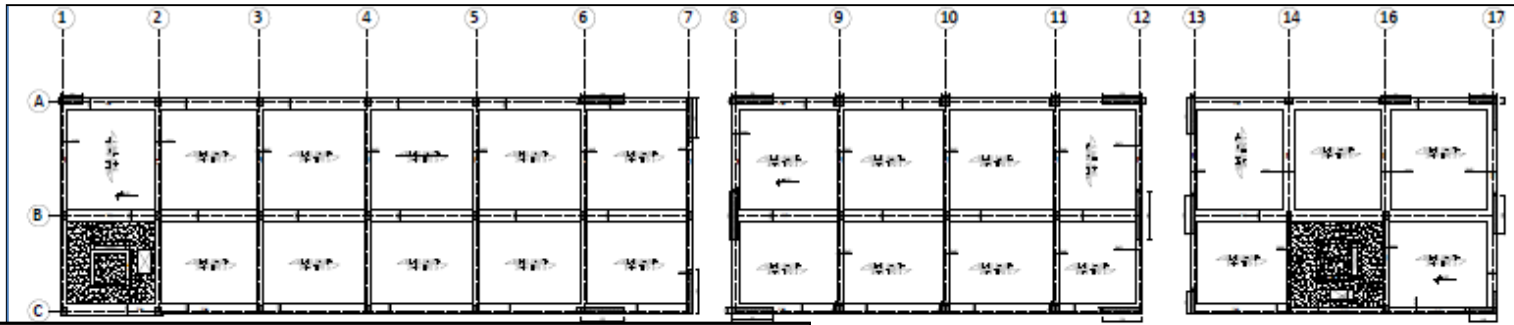
➤ *Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per isolamento sismico*

- **Realizzazione: edificio ad uso residenziale situato a Sesto Fiorentino (FI)
Intervento di edilizia sovvenzionata (committente: CASA SpA)**

✓ **Convenienza economica per riduzione di setti e nuclei**



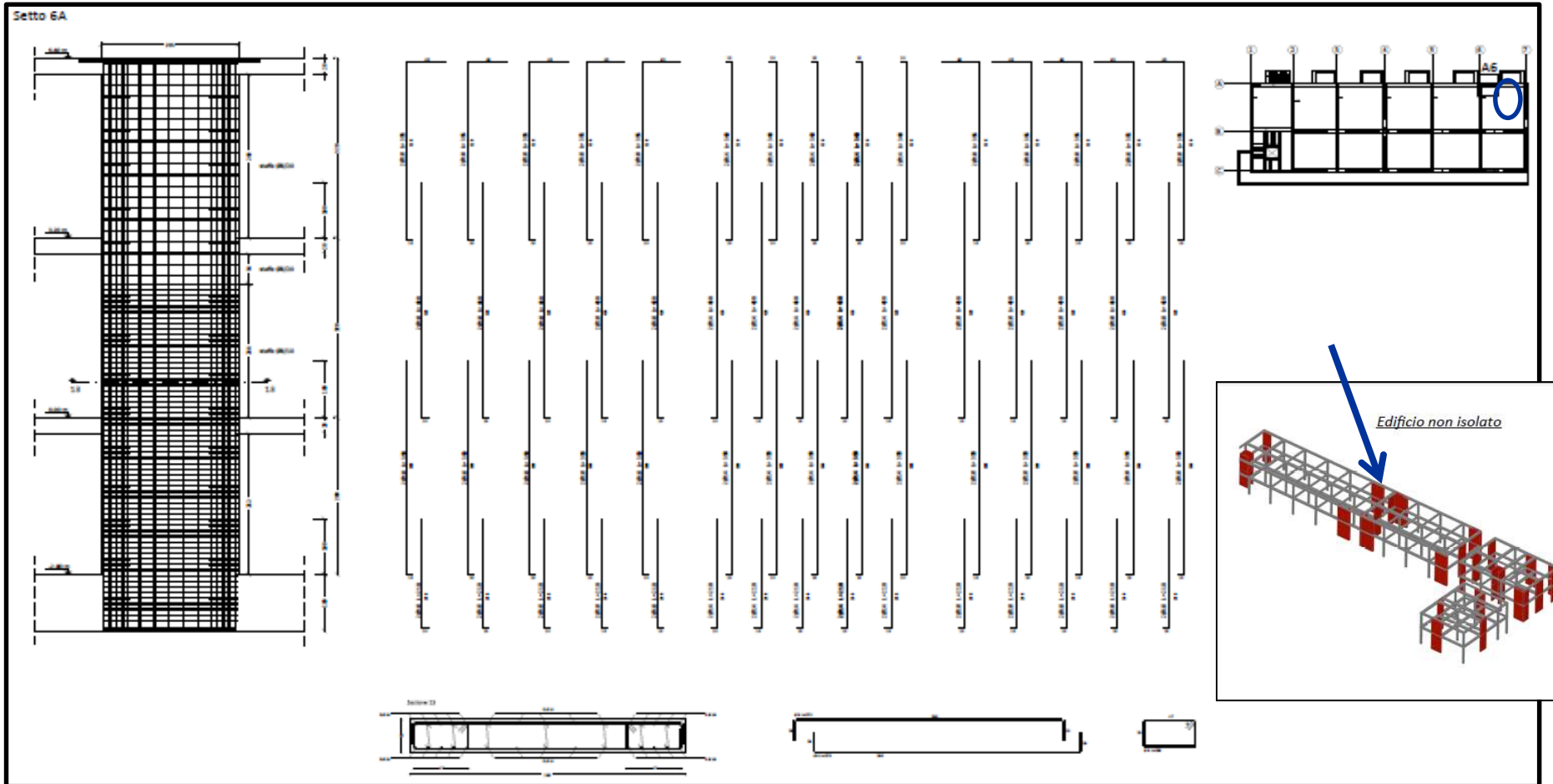
➤ *Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per isolamento sismico*



Ipotesi progettuale tradizionale

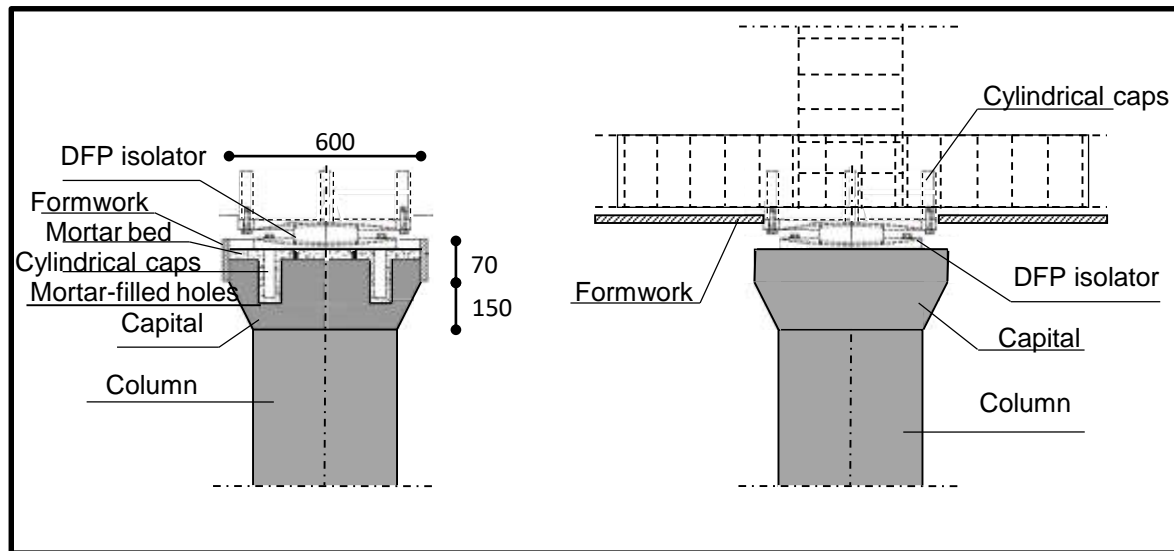
➤ *Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per isolamento sismico*

Ipotesi progettuale tradizionale



➤ *Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per isolamento sismico*

- **Realizzazione: edificio ad uso residenziale situato a Sesto Fiorentino (FI)
Intervento di edilizia sovvenzionata (committente: CASA SpA)**



Sorace S., Terenzi G. (2014). Analysis, design and construction of a base-isolated multiple building structure, *Advances in Civil Engineering*, Volume 2014, Hindawi Publishing Corporation, 13 p, ID 585429.

➤ *Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per isolamento sismico*

- **Realizzazione: edificio ad uso residenziale situato a Sesto Fiorentino (FI)
Intervento di edilizia sovvenzionata (committente: CASA SpA)**



Posa in opera degli isolatori sul baggiolo

➤ *Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per isolamento sismico*

- **Realizzazione: edificio ad uso residenziale situato a Sesto Fiorentino (FI)
Intervento di edilizia sovvenzionata (committente: CASA SpA)**



Immagini delle tubazioni del gas all'interfaccia fra impalcato mobile e sottostruttura



Immagini relative alle tubazioni dell'impianto idrico all'interfaccia, e di due colonne prima e dopo la realizzazione di un carter di protezione degli isolatori

7.10. COSTRUZIONI CON ISOLAMENTO E/O DISSIPAZIONE**7.10.1. SCOPO**

Il presente capitolo fornisce criteri e regole per il progetto di costruzioni nuove e per l'adeguamento di quelle esistenti, nelle quali un sistema d'isolamento sismico sia 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.

La riduzione della risposta sismica orizzontale, qualunque siano la tipologia e i materiali strutturali della costruzione, può essere ottenuta mediante una delle seguenti strategie d'isolamento, o mediante una loro appropriata combinazione:

- a) incrementando il periodo fondamentale della costruzione per portarlo nel campo delle minori accelerazioni di risposta;
- b) limitando la massima forza orizzontale trasmessa.

In entrambe le strategie le prestazioni dell'isolamento possono essere migliorate attraverso la dissipazione nel sistema di isolamento di una consistente aliquota dell'energia meccanica trasmessa dal terreno alla costruzione.

Le prescrizioni del presente capitolo non si applicano ai sistemi di protezione sismica basati sull'impiego di elementi dissipativi distribuiti, a vari livelli, all'interno della costruzione.

7.10.2. REQUISITI GENERALI E CRITERI PER IL LORO SODDISFACIMENTO

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

- sostegno dei carichi verticali con elevata rigidità in direzione verticale e bassa rigidità 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 rigidità 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).

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 in campo sostanzialmente elastico. Per questo la struttura può essere progettata con riferimento ai particolari costruttivi richiesti per le costruzioni caratterizzate, allo *SLV*, da $a_g S \leq 0,075g$, con deroga, per le strutture in c.a., a quanto previsto al § 7.4.6 e al § 7.9.6.

Un'affidabilità superiore è richiesta al sistema 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.

7.10.3. CARATTERISTICHE E CRITERI DI ACCETTAZIONE DEI DISPOSITIVI

I dispositivi si possono utilizzare solo qualora posseggano le caratteristiche e soddisfino integralmente le prescrizioni riportate nel § 11.9 delle presenti norme.

7.10.4. INDICAZIONI PROGETTUALI

7.10.4.1 INDICAZIONI RIGUARDANTI I DISPOSITIVI

L'alloggiamento dei dispositivi d'isolamento e di dissipazione ed il loro collegamento alla struttura devono essere concepiti in modo da assicurarne l'accesso e rendere i dispositivi stessi ispezionabili e sostituibili. È necessario anche prevedere adeguati sistemi di contrasto, idonei a consentire l'eventuale ricentraggio dei dispositivi qualora, a seguito di un sisma, si possano avere spostamenti residui incompatibili con la funzionalità della costruzione e/o con il corretto comportamento del sistema d'isolamento.

Ove necessario, i dispositivi devono essere protetti da possibili effetti derivanti da attacchi del fuoco, chimici o biologici. In alternativa, occorre prevedere dispositivi che, in caso di distruzione degli isolatori, siano idonei a trasferire il carico verticale alla sottostruttura.

7.10.4.2 CONTROLLO DI MOVIMENTI INDESIDERATI

Per minimizzare gli effetti torsionali, la proiezione del centro di massa della sovrastruttura sul piano degli isolatori ed il centro di rigidità dei dispositivi o, nel caso di sottostruttura flessibile, il centro di rigidità del sistema sottostruttura-isolamento devono essere, per quanto possibile, coincidenti. Inoltre, nei casi in cui il sistema di isolamento affidi a pochi dispositivi le sue capacità dissipative e ricentranti rispetto alle azioni orizzontali, occorre che tali dispositivi siano, per quanto possibile, disposti in maniera da minimizzare gli effetti torsionali (ad esempio perimetralmente) e siano in numero staticamente ridondante. Nel caso dei ponti, si potranno trascurare gli effetti dell'eccentricità accidentale delle masse.

Per minimizzare le differenze di comportamento dei dispositivi, le tensioni di compressione a cui lavorano devono essere per quanto possibile uniformi. Nel caso di sistemi d'isolamento che utilizzino dispositivi di diverso tipo, particolare attenzione deve essere posta sui possibili effetti della differente deformabilità verticale sotto le azioni sia statiche che sismiche.

Per evitare o limitare azioni di trazione nei dispositivi, gli interassi della maglia strutturale devono essere scelti in modo tale che il carico verticale "V" di progetto agente sul singolo isolatore sotto le azioni sismiche e quelle concomitanti risulti essere di compressione o, al più, nullo ($V \geq 0$). Nel caso in cui dall'analisi risultasse $V < 0$, occorre che la tensione di trazione sia in modulo inferiore al minore tra $2G$ (G modulo di taglio del materiale elastomerico) e 1 MPa , negli isolatori elastomerici, oppure, per i dispositivi di altro tipo, dimostrare, attraverso adeguate prove sperimentali, che il dispositivo è in grado di sostenere tale condizione, oppure predisporre opportuni vincoli in grado di assorbire integralmente la trazione.

7.10.4.3 CONTROLLO DEGLI SPOSTAMENTI SISMICI DIFFERENZIALI DEL TERRENO

Negli edifici, sia le strutture del piano di posa dei dispositivi sia le strutture del piano da cui spicca la sovrastruttura devono essere dimensionate in modo da assicurare un comportamento rigido nel piano suddetto, così da limitare gli effetti di spostamenti sismici differenziali. Altrimenti la variabilità spaziale del moto del terreno deve essere messa in conto secondo quanto specificato nel § 3.2.4.

La condizione precedente si considera soddisfatta se un diaframma rigido costituito da un solaio in c.a., oppure da una griglia di travi progettata tenendo conto di possibili fenomeni di instabilità, è presente sia al di sopra sia al di sotto del sistema di isolamento e se i dispositivi del sistema di isolamento sono fissati ad entrambi i diaframmi o direttamente o attraverso elementi verticali il cui spostamento orizzontale in condizioni sismiche sia minore di $1/20$ dello spostamento relativo del sistema di isolamento. Tali elementi devono essere progettati per rispondere in campo rigorosamente elastico, tenendo anche conto della maggiore affidabilità richiesta ai dispositivi di isolamento e dissipazione.

7.10.4.4 CONTROLLO DEGLI SPOSTAMENTI RELATIVI AL TERRENO E ALLE COSTRUZIONI CIRCOSTANTI

Adeguate spazio deve essere previsto tra la sovrastruttura isolata e il terreno o le costruzioni circostanti, per consentire liberamente gli spostamenti sismici in tutte le direzioni. Per i ponti, i giunti di separazione tra le diverse porzioni di impalcato e tra l'impalcato e la sottostruttura devono essere dimensionati in modo da permettere il corretto funzionamento del sistema d'isolamento, senza impedimenti al libero spostamento delle parti isolate.

Occorre anche attuare adeguati accorgimenti affinché l'eventuale malfunzionamento delle connessioni a cavallo dei giunti non possa compromettere l'efficienza dell'isolamento.

7.10.5. MODELLAZIONE E ANALISI STRUTTURALE

7.10.5.1 PROPRIETÀ DEL SISTEMA DI ISOLAMENTO

Le proprietà meccaniche del sistema di isolamento da adottare nelle analisi di progetto, derivanti dalla combinazione delle proprietà meccaniche dei singoli dispositivi che lo costituiscono, sono le più sfavorevoli che si possono verificare durante il periodo di riferimento V_R considerato. Esse devono tener conto, ove pertinente, di:

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

Inoltre, si deve tener conto dell'eventuale variazione nel tempo delle caratteristiche meccaniche durante la vita utile del dispositivo.

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

Nel caso in cui i valori estremi (massimo oppure minimo) differiscano di non più del 20% dal valor medio, si potranno adottare i valori medi delle proprietà meccaniche del sistema di isolamento.

7.10.5.2 MODELLAZIONE

La sovrastruttura e la sottostruttura devono essere modellate come sistemi a comportamento elastico lineare aventi rigidità corrispondente al comportamento strutturale non dissipativo. Il sistema di isolamento può essere modellato, in relazione alle sue caratteristiche meccaniche, come avente comportamento visco-elastico lineare oppure con legame costitutivo non lineare. La deformabilità verticale degli isolatori dovrà essere messa in conto quando il rapporto tra la rigidità verticale del sistema di isolamento K_v e la rigidità equivalente orizzontale K_{eq} è inferiore a 800.

Se è utilizzato un modello lineare, si deve adottare una rigidità equivalente riferita allo spostamento totale di progetto per lo stato limite in esame di ciascun dispositivo facente parte del sistema di isolamento. La rigidità totale equivalente del sistema di isolamento, K_{eq} , è pari alla somma delle rigidità equivalenti dei singoli dispositivi. L'energia dissipata dal sistema d'isolamento deve essere espressa in termini di coefficiente di smorzamento viscoso equivalente del sistema d'isolamento ξ_{eq} , valutato con riferimento all'energia dissipata dal sistema di isolamento in cicli con frequenza nell'intervallo delle frequenze naturali dei modi considerati. Per i modi superiori della struttura, al di fuori di tale intervallo, il rapporto di smorzamento del modello completo deve essere quello della sovrastruttura nella condizione di base fissa.

Quando la rigidità e/o lo smorzamento equivalenti del sistema di isolamento dipendono significativamente dallo spostamento di progetto, deve applicarsi una procedura iterativa fino a che la differenza tra il valore assunto e quello calcolato non sia inferiore al 5%.

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

- la rigidità equivalente del sistema d'isolamento è almeno pari al 50% della rigidità secante per cicli con spostamento pari al 20% dello spostamento di riferimento;
- lo smorzamento lineare equivalente del sistema di isolamento, come definito in precedenza, è inferiore al 30%;
- le caratteristiche forza-spostamento del sistema d'isolamento non variano di più del 10% per effetto di variazioni della velocità di deformazione in un campo del $\pm 30\%$ intorno al valore di progetto, e dell'azione verticale sui dispositivi, nel campo di variabilità di progetto;
- l'incremento della forza nel sistema d'isolamento per spostamenti tra $0,5 d_c$ e d_{dc} , essendo d_{dc} lo spostamento del centro di rigidità dovuto all'azione sismica, è almeno pari al 2,5% del peso totale della sovrastruttura.

Nel caso in cui si adotti un modello non lineare, il legame costitutivo dei singoli dispositivi del sistema d'isolamento deve riprodurre adeguatamente il loro comportamento nel campo di deformazioni e velocità che si verificano durante l'azione sismica, anche in relazione alla corretta rappresentazione dell'energia dissipata nei cicli di isteresi.

Se ritenuta rilevante ai fini della risposta sismica della struttura isolata, è opportuno tenere in conto l'eventuale interazione terreno-struttura come indicato al § 7.9.3.1.

7.10.5.3 ANALISI

Per le costruzioni isolate alla base si applicano le prescrizioni di cui ai §§ 7.3.3 e 7.3.4 integrate o, se del caso, sostituite da quelle contenute nei successivi punti. Per esse non può essere usata l'analisi statica non lineare.

7.10.5.3.1 Analisi lineare statica

Per le costruzioni dotate di isolamento alla base, il metodo dell'analisi statica lineare può essere applicato se la struttura isolata soddisfa i requisiti seguenti:

- a) il sistema d'isolamento può essere modellato come lineare, in accordo con il precedente § 7.10.5.2;
- b) il periodo equivalente T_{ie} della costruzione isolata ha un valore compreso fra $3 \cdot T_{bf}$ e 3,0 s, in cui T_{bf} è il periodo della sovrastruttura assunta a base fissa, stimato con un'espressione approssimata;
- c) la rigidezza verticale del sistema di isolamento K_v è almeno 800 volte più grande della rigidezza equivalente orizzontale del sistema di isolamento K_{est} ;
- d) il periodo in direzione verticale T_v , calcolato come $T_v = 2\pi\sqrt{M/K_v}$, è inferiore a 0,1 s;
- e) nessun isolatore risulta in trazione per l'effetto combinato dell'azione sismica e dei carichi verticali;
- f) il sistema resistente all'azione sismica possiede una configurazione strutturale regolare in pianta, come è definita al § 7.2.1.

Ai requisiti da a) ad f) si aggiungono, per gli edifici civili ed industriali, i seguenti:

- la sovrastruttura ha altezza non maggiore di 20 m e non più di 5 piani
- la sottostruttura può essere considerata infinitamente rigida, per cui il suo periodo proprio è non maggiore di 0,05s.
- la dimensione maggiore in pianta della sovrastruttura è inferiore a 50 m;
- in ciascuna delle direzioni principali orizzontali, l'eccentricità totale tra il centro di rigidezza del sistema di isolamento e la proiezione verticale del centro di massa non è superiore al 3% della dimensione della sovrastruttura trasversale alla direzione orizzontale considerata.

Ai requisiti da a) ad f) si aggiungono, per i ponti, i seguenti:

- lo schema statico è ad impalcati semplicemente appoggiati, oppure lo schema statico è a impalcati continui con geometria regolare, caratterizzata da: sostanziale rettilineità dell'impalcato, luci uguali, rapporto massimo tra le rigidezze delle pile inferiore a 2, lunghezza totale dell'impalcato continuo inferiore a 150 m;
- la massa della metà superiore delle pile è inferiore a 1/5 della massa dell'impalcato;
- le pile hanno altezza inferiore a 20 m;
- in direzione trasversale la distanza tra il centro di rigidezza del sistema di isolamento e il centro di massa dell'impalcato non è superiore al 5% della dimensione trasversale della sovrastruttura.

Se le condizioni dette sono rispettate, il calcolo può essere svolto su due modelli separati, per ciascuno dei quali si assume il valore corrispondente dello smorzamento, uno per la sovrastruttura più sistema d'isolamento ed uno per la sottostruttura. Su quest'ultimo agiscono le forze ricavate dal primo modello e le forze d'inerzia prodotte direttamente dal moto del terreno.

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:

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

dove $S_e(T_{is}, \xi_{esi})$ è l'accelerazione spettrale definita nel § 3.2.3 per la categoria di suolo di fondazione appropriata e $K_{esi,min,min}$ è la rigidità equivalente minima in relazione alla variabilità delle proprietà meccaniche del sistema di isolamento, per effetto dei fattori definiti nel § 7.10.5.1.

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

$$d_{de} = \frac{M \cdot S_e(T_{is}, \xi_{esi})}{K_{esi,min}} \quad [7.10.2]$$

Le forze orizzontali da applicare a ciascun livello della sovrastruttura devono essere calcolate, in ciascuna direzione orizzontale, mediante la seguente espressione:

$$f_j = m_j \cdot S_e(T_{is}, \xi_{esi}) \quad [7.10.3]$$

in cui m_j è la massa del livello j-esimo.

Gli effetti della torsione d'insieme della sovrastruttura sui singoli dispositivi di isolamento possono essere messi in conto amplificando in ciascuna direzione gli spostamenti e le forze precedentemente definiti mediante i fattori δ_{xi} e δ_{yi} da applicare, rispettivamente, alle azioni in direzione x e y:

$$\delta_{xi} = 1 + \frac{e_{tot,y}}{r_y^2} y_i \quad \delta_{yi} = 1 + \frac{e_{tot,x}}{r_x^2} x_i \quad [7.10.4]$$

in cui:

(x_i, y_i) sono le coordinate del dispositivo rispetto al centro di rigidità;

$e_{tot,x}$ $e_{tot,y}$ è l'eccentricità totale nella direzione x, y;

r_x r_y sono le componenti, in direzione x e y del raggio torsionale del sistema di isolamento, date dalle seguenti espressioni:

$$r_x^2 = \frac{\sum (x_i^2 \cdot K_{yi} + y_i^2 \cdot K_{xi})}{\sum K_{yi}} \quad [7.10.5]$$

$$r_y^2 = \frac{\sum (x_i^2 \cdot K_{yi} + y_i^2 \cdot K_{xi})}{\sum K_{xi}}$$

K_{xi} , K_{yi} sono le rigidità equivalenti del dispositivo i-esimo rispettivamente nelle direzioni x e y.

Ai fini della verifica degli elementi strutturali, gli effetti torsionali sulla sovrastruttura sono valutati come specificato in § 7.3.3.

7.10.5.3.2 Analisi lineare dinamica

Per le costruzioni con isolamento alla base l'analisi dinamica lineare è ammessa quando risulta possibile modellare elasticamente il comportamento del sistema di isolamento, nel rispetto delle condizioni di cui al § 7.10.5.2. Per il sistema complessivo, formato dalla sottostruttura, dal sistema d'isolamento e dalla sovrastruttura, si assume un comportamento elastico lineare. Qualora il sistema di isolamento non sia immediatamente al di sopra delle fondazioni, il modello deve comprendere sia la sovrastruttura sia la sottostruttura, a meno che la sottostruttura non sia assimilabile ad una struttura scatolare rigida come definita al § 7.2.1. L'analisi può essere svolta mediante analisi modale con spettro di risposta o mediante integrazione al passo delle equazioni del moto, eventualmente previo disaccoppiamento modale, considerando un numero di modi tale da portare in conto anche un'aliquota significativa della massa della sottostruttura, se inclusa nel modello.

Nel caso si adotti l'analisi modale con spettro di risposta, questa deve essere svolta secondo quanto specificato in § 7.3.3.1, salvo diverse indicazioni fornite nel presente paragrafo. Le due componenti orizzontali dell'azione sismica si considerano in generale agenti simultaneamente, adottando, ai fini della combinazione degli effetti, le regole riportate in § 7.3.3.1. La componente verticale deve essere messa in conto nei casi previsti in § 7.2.2 e, in ogni caso, quando il rapporto tra la rigidezza verticale del sistema di isolamento K_v e la rigidezza equivalente orizzontale K_{eq} risulti inferiore a 800. In tali casi si avrà cura che la massa eccitata dai modi in direzione verticale considerati nell'analisi sia significativa.

Lo spettro elastico definito in § 3.2.3.2 va ridotto per tutto il campo di periodi $T \geq 0,8 T_{1s}$, assumendo per il coefficiente riduttivo η il valore corrispondente al coefficiente di smorzamento viscoso equivalente ξ_{eq} del sistema di isolamento.

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

7.10.6. VERIFICHE

7.10.6.1 VERIFICHE DEGLI STATI LIMITE DI ESERCIZIO

Il livello di protezione richiesto per la sottostruttura e le fondazioni nei confronti dello *SLD* è da ritenere conseguito se sono soddisfatte le relative verifiche nei confronti dello *SLV*, di cui al § 7.10.6.2.

La verifica dello *SLD* della sovrastruttura deve essere effettuata controllando che gli spostamenti d'interpiano ottenuti dall'analisi siano inferiori ai 2/3 dei limiti indicati per lo *SLD* nel § 7.3.6.1.

I dispositivi del sistema d'isolamento non devono subire danni che possano comprometterne il funzionamento nelle condizioni di servizio. Tale requisito si ritiene normalmente soddisfatto se sono soddisfatte le verifiche dello *SLV* dei dispositivi. In caso di sistemi a comportamento non lineare, eventuali spostamenti residui al termine dell'azione sismica allo *SLD* devono essere compatibili con la funzionalità della costruzione.

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

7.10.6.2 VERIFICHE DEGLI STATI LIMITE ULTIMI

Per le costruzioni particolarmente esposte all'azione del vento e per i ponti in generale sarà condotta la verifica dello *SLU* dei dispositivi di isolamento e/o dissipazione di energia sottoposti alle combinazioni inerenti le azioni variabili orizzontali.

7.10.6.2.1 Verifiche dello *SLV*

La capacità della sottostruttura e della sovrastruttura deve essere valutata adottando i valori di γ_M utilizzati per le costruzioni non isolate.

Gli elementi della sottostruttura devono essere verificati rispetto alle sollecitazioni ottenute direttamente dall'analisi quando il modello include anche la sottostruttura. In caso contrario, essi devono essere verificati rispetto alle sollecitazioni prodotte dalle forze trasmesse dal sistema d'isolamento combinate con le sollecitazioni prodotte dalle accelerazioni di risposta direttamente applicate alla sottostruttura. Nel caso in cui la sottostruttura possa essere assunta infinitamente rigida (periodo proprio inferiore a 0,05s) le forze d'inerzia direttamente applicate ad essa possono essere assunte pari al prodotto delle masse della sottostruttura per l'accelerazione del terreno $a_g S$. La combinazione delle sollecitazioni deve essere eseguita adottando le regole riportate in § 7.3.5, tenendo in conto gli effetti pseudo-statici indotti dagli spostamenti relativi prodotti dalla variabilità spaziale del moto unicamente nei casi previsti ai §§ 3.2.4.1 e 3.2.4.2.

La domanda sugli elementi strutturali della sovrastruttura e della sottostruttura e sul terreno deve essere valutata, nel caso di analisi lineare, considerando un fattore di comportamento $q \leq 1,50$ nel caso degli edifici e $q = 1$ nel caso dei ponti ed adottando le regole di combinazione di cui al § 2.5.3.

Nelle condizioni di massima sollecitazione, le parti dei dispositivi non impegnate nella funzione dissipativa devono rimanere in campo elastico, nel rispetto delle norme relative ai materiali di cui sono costituite, e comunque con un coefficiente di sicurezza almeno pari a 1,5.

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

Al fine di evitare il martellamento tra diverse parti tra loro contigue si dovranno rispettare i criteri enunciati al § 7.2.1, nella sezione “*Distanza tra costruzioni contigue*”, e, per i ponti, al § 7.9.5.2.

7.10.6.2.2 Verifiche dello SLC

I dispositivi del sistema d’isolamento devono essere in grado di sostenere, senza rotture, gli spostamenti d_2 , valutati per una azione sismica riferita allo SLC. Nel caso di sistemi a comportamento non lineare, allo spostamento ottenuto con l’azione sismica detta occorre aggiungere il maggiore tra lo spostamento residuo allo SLD e il 50% dello spostamento corrispondente all’annullamento della forza, seguendo il ramo di scarico a partire dal punto di massimo spostamento raggiunto allo SLD.

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

Per i ponti e le costruzioni dotate anche di appoggi mobili devono essere rispettati i requisiti enunciati rispettivamente nei §§ 7.9.5.3.2 e 7.2.1.

I dispositivi di fine corsa, se previsti, devono permettere liberamente gli spostamenti massimi dei dispositivi di isolamento e/o dissipazione di energia e devono essere dimensionati secondo i criteri indicati nel § 7.9.5.3.3. Gli spostamenti massimi sono definiti al primo capoverso del presente paragrafo.

7.10.7. ASPETTI COSTRUTTIVI, MANUTENZIONE, SOSTITUIBILITÀ

Il progetto deve contenere la descrizione delle modalità di messa in opera dei dispositivi ed il relativo piano di manutenzione. I documenti di progetto devono indicare i dettagli, le dimensioni e le prescrizioni sulla qualità, come pure eventuali dispositivi di tipo speciale e le tolleranze concernenti la messa in opera. Elementi di elevata importanza, che richiedano particolari controlli durante le fasi di costruzione e messa in opera, devono essere indicati negli elaborati grafici di progetto, insieme alle procedure di controllo da adottare.

Il piano di qualità deve prevedere, inoltre, la descrizione delle modalità di installazione dei dispositivi durante la fase di costruzione dell'opera da isolare, nonché il programma dei controlli periodici, degli interventi di manutenzione e di sostituzione, durante la vita nominale della struttura, la cui durata deve essere specificata nei documenti di progetto.

Ai fini della qualità della posa in opera, gli isolatori devono essere installati da personale specializzato, sulla base di un disegno planimetrico recante le coordinate e la quota di ciascun dispositivo, l'entità e la preregolazione degli eventuali dispositivi mobili a rotolamento, le dimensioni delle eventuali nicchie predisposte nei getti di calcestruzzo per accogliere staffe o perni di ancoraggio, le caratteristiche delle malte di spianamento e di sigillatura.

Ai fini della sostituzione degli isolatori, il progetto delle strutture deve prevedere la possibilità di trasferire temporaneamente i carichi verticali dalla sovrastruttura alla sottostruttura per il tramite di martinetti oleodinamici, adiacenti all'isolatore da sostituire. A tale scopo il progetto delle strutture può prevedere nicchie per l'inserimento dei martinetti tra la sottostruttura e la sovrastruttura oppure altre disposizioni costruttive equivalenti.

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

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

7.10.8. ACCORGIMENTI SPECIFICI IN FASE DI COLLAUDO

Ai fini del collaudo statico, di fondamentale importanza è il controllo della posa in opera dei dispositivi, nel rispetto delle tolleranze e delle modalità di posa prescritte dal progetto, nonché la verifica della completa separazione tra sottostruttura e sovrastruttura e tra quest'ultima ed altre strutture adiacenti, con il rigoroso rispetto delle distanze di separazione previste in progetto.

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

11.9. DISPOSITIVI ANTISISMICI E DI CONTROLLO DI VIBRAZIONI

Per dispositivi antisismici e di controllo delle vibrazioni si intendono gli elementi che contribuiscono a modificare la risposta sismica, o in generale dinamica, di una struttura, ad esempio incrementandone il periodo fondamentale, modificando la forma dei modi di vibrare fondamentali, incrementando la dissipazione di energia, limitando la forza trasmessa alla struttura e/o introducendo vincoli permanenti o temporanei che migliorano la risposta sismica o dinamica.

Tutti i dispositivi devono avere una vita di servizio maggiore di 10 anni nel campo di temperatura di riferimento indicato nelle specifiche tecniche applicabili a ciascun dispositivo. In assenza di indicazioni riportate nelle suddette specifiche tecniche il campo di temperatura di riferimento deve essere almeno compreso fra $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Per opere particolari, per le quali le temperature prevedibili non rientrano nel suddetto intervallo, potrà farsi riferimento a campi di temperatura diversi da quello sopra citato; per dispositivi operanti in luoghi protetti, si può assumere un campo di temperatura ridotto in relazione ai valori estremi di temperatura ambientale.

Devono essere previsti piani di manutenzione e di sostituzione allo scadere della vita di servizio, senza significativi effetti sull'uso delle strutture in cui sono installati.

Nei casi in cui si applica la norma europea armonizzata UNI EN 15129, le grandezze di riferimento ivi citate andranno desunte da quanto prescritto nelle presenti Norme Tecniche per le Costruzioni; in particolare si intende per d_{bd} lo spostamento valutato per un terremoto riferito allo SLV, e per $\gamma_x \cdot d_{bd}$ lo spostamento valutato per un terremoto riferito allo SLC (d_{bd} e γ_x sono i simboli utilizzati nella UNI EN 15129 rispettivamente per lo spostamento di progetto di un dispositivo e per il fattore di amplificazione di al § 4.1.2 della stessa UNI EN 15129).

11.9.1. TIPOLOGIE DI DISPOSITIVI

In generale, ai fini della presente norma, si possono individuare le seguenti tipologie di dispositivi:

DISPOSITIVI DI VINCOLO TEMPORANEO: questi dispositivi sono utilizzati per obbligare i movimenti in uno o più direzioni secondo modalità differenziate a seconda del tipo e dell'entità dell'azione. Si distinguono in :

Dispositivi di vincolo del tipo "a fusibile": caratterizzati dall'impedire i movimenti relativi fra le parti collegate sino al raggiungimento di una soglia di forza oltre la quale, al superamento della stessa, consentono tutti i movimenti. Abitualmente sono utilizzati per escludere il sistema di protezione sismica nelle condizioni di servizio, consentendone il libero funzionamento durante il terremoto di progetto, senza modificarne il comportamento.

Dispositivi (dinamici) di vincolo provvisorio: caratterizzati dalla capacità di solidarizzare gli elementi che collegano, in presenza di movimenti relativi rapidi, quali quelli sismici, e di lasciarli liberi, o quasi, in presenza di movimenti relativi lenti imposti o dovuti ad effetti termici.

DISPOSITIVI DIPENDENTI DALLO SPOSTAMENTO, a loro volta suddivisi in:

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

DISPOSITIVI DIPENDENTI DALLA VELOCITÀ detti anche *Dispositivi a comportamento viscoso o "Viscosi":* 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 DI ISOLAMENTO o "Isolatori": svolgono fundamentalmente la funzione di sostegno dei carichi verticali, con elevata rigidità in direzione verticale e bassa rigidità o resistenza in direzione orizzontale, permettendo notevoli spostamenti orizzontali. A tale funzione possono essere associate o no quelle di dissipazione di energia, di ricentraggio del sistema, di vincolo laterale sotto carichi orizzontali di servizio (non sismici). Essendo fundamentalmente degli apparecchi di appoggio, essi debbono rispettare le relative norme per garantire la loro piena funzionalità rispetto alle azioni di servizio.

In generale, ai fini della presente norma, si possono individuare le seguenti tipologie di isolatori:

Isolatori elastomerici: costituiti da strati alternati di materiale elastomerico (gomma naturale o materiali artificiali idonei) e di acciaio, quest'ultimo con funzione di confinamento dell'elastomero, risultano fortemente deformabili per carichi paralleli alla giacitura degli strati (carichi orizzontali).

Isolatori a scorrimento: costituiti da appoggi a scorrimento, con superficie piana o curva, caratterizzati da bassi valori delle resistenze per attrito.

DISPOSITIVI costituiti da una **COMBINAZIONE DELLE PRECEDENTI CATEGORIE.**

11.9.2. PROCEDURA DI QUALIFICAZIONE

I dispositivi antisismici, per i quali si applica quanto specificato al punto A) del § 11.1, devono essere conformi alla norma europea armonizzata UNI EN 15129 e recare la Marcatura CE. Si applica il sistema di valutazione e verifica della costanza della prestazione previsto nella suddetta norma europea armonizzata per le applicazioni critiche.

Nel caso di dispositivi antisismici non ricadenti, o non completamente ricadenti, nel campo di applicazione della norma europea armonizzata UNI EN 15129, si applica il caso C) del §11.1.

In aggiunta a quanto previsto ai punti A) o C) del § 11.1, ogni fornitura deve essere accompagnata da un manuale contenente le specifiche tecniche per la posa in opera e la manutenzione.

Le procedure di qualificazione hanno lo scopo di dimostrare che il dispositivo è in grado di mantenere la propria funzionalità nelle condizioni d'uso previste durante tutta la vita di progetto.

11.9.3. PROCEDURA DI ACCETTAZIONE

I controlli di accettazione in cantiere sono obbligatori per tutte le tipologie di dispositivi e sono demandati al Direttore dei Lavori il quale, prima della messa in opera, è tenuto ad accertare e a verificare la prescritta documentazione di qualificazione, e a rifiutare le eventuali forniture non conformi. Il Direttore dei Lavori dovrà inoltre effettuare la verifica geometrica e delle tolleranze dimensionali, nonché le prove di accettazione di seguito specificate.

Le prove di accettazione devono essere eseguite e certificate da un laboratorio di cui all'articolo 59 del DPR 380/2001, dotato di adeguata competenza, attrezzatura ed organizzazione.

Per i dispositivi rientranti nel campo di applicazione della norma europea armonizzata UNI EN 15129, le metodologie per le prove di accettazione ed i relativi criteri di valutazione, ove non diversamente specificato nel seguito, sono quelli indicati, per ciascun tipo di dispositivo, nella suddetta norma europea armonizzata con riferimento alle prove di Controllo di Produzione in Fabbrica (*Factory Production Control tests*). Il numero dei dispositivi da sottoporre a prove di accettazione è di seguito specificato per ciascun tipo di dispositivo.

E' possibile impiegare, ai fini delle prove di accettazione, le prove di Controllo di Produzione in Fabbrica effettuate nell'ambito del mantenimento della qualificazione dei dispositivi stessi ai sensi della norma europea sopra detta, nel numero che la stessa norma prevede, a condizione che:

- il campionamento dei dispositivi sia stato effettuato, sui lotti destinati allo specifico cantiere, dal Direttore dei Lavori del cantiere stesso;
- le prove siano eseguite e certificate da un laboratorio di cui all'articolo 59 del DPR 380/2001, dotato di adeguata competenza, attrezzatura ed organizzazione.
- I suddetti certificati riportino esplicitamente l'indicazione del o dei cantieri ove viene utilizzata la fornitura.

Per dispositivi non ricadenti nel campo di applicazione della norma europea armonizzata UNI EN 15129 le prove di accettazione, che rimangono obbligatorie, saranno eseguite secondo le modalità e con i criteri di valutazione riportate nelle specifiche tecniche europee, oppure nella Certificazione di valutazione tecnica, di riferimento.

Qualora i risultati dei controlli di accettazione non risultassero soddisfacenti, il Direttore dei lavori rifiuta la fornitura.

I dispositivi sottoposti a prove di qualificazione o di accettazione potranno essere utilizzati nella costruzione solo se gli elementi sollecitati in campo non lineare vengono sostituiti o se la loro resistenza alla fatica oligociclica è almeno di un ordine di grandezza superiore al numero dei cicli delle prove, e comunque previo accertamento della loro perfetta integrità e piena funzionalità a seguito delle prove, da accertare attraverso la successiva effettuazione delle prove di accettazione ed il controllo dei relativi parametri di verifica.

11.9.4. DISPOSITIVI A COMPORTAMENTO LINEARE

Il comportamento dei dispositivi a comportamento lineare è definito tramite la rigidezza equivalente K_e e il coefficiente di smorzamento viscoso equivalente ξ_e , che devono rispettare le limitazioni

$$\xi_e < 15\% \quad [11.9.1]$$

$$|K_e - K_{in}| / K_{in} < 20\% \quad [11.9.2]$$

essendo K_{in} la rigidezza iniziale valutata come rigidezza secante tra i valori corrispondenti al 10% ed il 20% della forza di progetto.

Per assicurare un comportamento ciclico stabile, le variazioni in una serie di cicli di carico riferiti allo stesso spostamento massimo devono essere limitate nel modo seguente:

$$|K_{e,(i)} - K_{e,(3)}| / K_{e,(3)} \leq 10\% \quad [11.9.3]$$

$$|\xi_{e,(i)} - \xi_{e,(3)}| / \xi_{e,(3)} \leq 10\% \quad [11.9.4]$$

dove il pedice "(3)" si riferisce a quantità determinate nel terzo ciclo di carico ed il pedice "(i)" si riferisce a quantità relative all'iesimo ciclo, escluso il primo ($i \geq 2$).

Le massime differenze tra le caratteristiche meccaniche ottenute nelle prove di qualificazione ed i valori di progetto o le normali condizioni d'uso devono essere contenute entro limiti riportati in Tab. 11.9.I

Le variazioni devono essere valutate con riferimento al 3° ciclo di prova.

Tab. 11.9.I

	Fornitura	Invecchiamento	Temperatura	Frequenza di prova
K_e	$\pm 15\%$	$\pm 20\%$	$\pm 40\%$	$\pm 10\%$
ξ_e	$\pm 15\%$	$\pm 15\%$	$\pm 15\%$	$\pm 10\%$

11.9.4.1 PROVE DI ACCETTAZIONE SUI DISPOSITIVI

Le prove di accettazione devono essere effettuate su almeno il 20% dei dispositivi, comunque non meno di 4 e non più del numero di dispositivi da mettere in opera.

Su almeno un dispositivo verrà anche condotta una prova "quasi statica", imponendo almeno 5 cicli completi di deformazioni alternate, con ampiezza massima pari a $\pm d_2$.

Qualora il dispositivo abbia caratteristiche costruttive analoghe a quelle di un isolatore elastomerico, geometricamente simile e soggetto ad azione tagliante senza però svolgere funzione portante dei carichi verticali, le prove di accettazione dovranno essere condotte secondo le modalità e numerosità previste per le prove su isolatori elastomerici, ma con la seguente variante:

- caratterizzazione dei dispositivi in assenza di carico iniziale, riproducendo le condizioni di vincolo sulle facce, superiori ed inferiori del dispositivo in opera.

11.9.5. DISPOSITIVI A COMPORTAMENTO NON LINEARE

I dispositivi a comportamento non lineare possono realizzare comportamenti meccanici diversi, ad elevata o bassa dissipazione di energia, con riduzione o incremento della rigidità al crescere dello spostamento, con o senza spostamenti residui all'azzeramento della forza. Nel seguito si tratteranno dispositivi caratterizzati da una riduzione della rigidità, ma con forza sempre crescente, al crescere dello spostamento, i cui diagrammi forza-spostamento sono sostanzialmente indipendenti dalla velocità di percorrenza e possono essere schematizzati come nella Fig. 11.9.1.

I dispositivi a comportamento non lineare sono costituiti da elementi base che ne determinano le caratteristiche meccaniche fondamentali ai fini della loro utilizzazione

Il loro comportamento è individuato dalla curva caratteristica che lega la forza trasmessa dal dispositivo al corrispondente spostamento; tali curve caratteristiche sono, in generale, schematizzabili con delle relazioni bilineari definite imponendo il passaggio per il punto di coordinate (F_1, d_1) , corrispondente al limite teorico del comportamento elastico lineare del dispositivo, e per il punto di coordinate (F_2, d_2) , corrispondente alla condizione di progetto allo SLC.

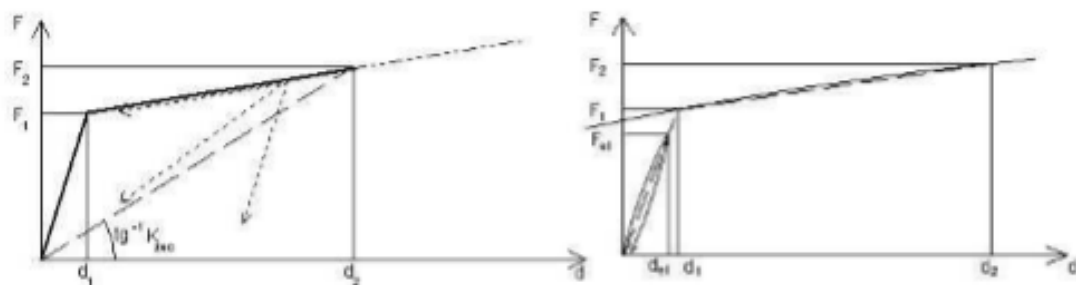


Fig. 11.9.1 - Diagrammi forza – spostamento per dispositivi non lineari

Il ciclo bilineare teorico è definito dai seguenti parametri:

d_{e1} = spostamento nel primo ramo di carico in una prova sperimentale entro il quale il comportamento è sostanzialmente lineare. In generale può assumersi un valore pari a $d_2/20$;

F_{e1} = Forza corrispondente a d_{e1} , nel ramo di carico iniziale sperimentale.

d_1 = ascissa del punto d'intersezione della linea retta congiungente l'origine con il punto (d_{e1}, F_{e1}) e la linea retta congiungente i punti $(d_2/4, F(d_2/4))$ e (d_2, F_2) nel terzo ciclo della prova sperimentale;

F_1 = ordinata del punto d'intersezione della linea retta congiungente l'origine con il punto (d_{e1}, F_{e1}) e la linea retta congiungente i punti $(d_2/4, F(d_2/4))$ e (d_2, F_2) nel terzo ciclo della prova sperimentale;

d_2 = spostamento massimo di progetto del dispositivo corrispondente allo SLC;

F_2 = forza corrispondente allo spostamento d_2 , ottenuta al terzo ciclo sperimentale.

Le rigidezze elastica e post-elastica, rispettivamente del primo ramo e del secondo ramo, vengono definite come: $K_1 = F_1/d_1$; $K_2 = (F_2 - F_1)/(d_2 - d_1)$, mentre la rigidezza secante è data da $K_{sec} = F_2/d_2$ e lo smorzamento equivalente è $\xi_e = E_d/(2\pi \cdot F_2 \cdot d_2)$ essendo E_d l'area del ciclo d'isteresi.

Per assicurare un comportamento ciclico stabile, le variazioni in una serie di cicli di carico riferiti allo stesso spostamento massimo devono essere limitate nel modo seguente:

$$|K_{2,(i)} - K_{2,(3)}| / K_{2,(3)} \leq 10\% \quad [11.9.5]$$

$$|\xi_{e,(i)} - \xi_{e,(3)}| / \xi_{e,(3)} \leq 10\% \quad [11.9.6]$$

dove il pedice "(3)" si riferisce a quantità determinate nel terzo ciclo di carico ed il pedice "(i)" si riferisce a quantità relative all'i-esimo ciclo, escluso il primo ($i \geq 2$).

Il ciclo teorico che eventualmente si assume per l'esecuzione delle analisi non lineari per la progettazione della struttura, completato dei rami di scarico e ricarico coerenti con il comportamento reale, deve essere tale che l'energia dissipata in un ciclo non differisca di più del 10% dall'energia dissipata nel terzo ciclo di carico della prova sperimentale.

Le massime differenze tra le caratteristiche meccaniche ottenute nelle prove di qualificazione ed i valori di progetto o nelle normali condizioni d'uso devono essere contenute entro limiti riportati in Tab. 11.9.II.

Le variazioni devono essere valutate con riferimento al 3° ciclo di prova.

Tab. 11.9.II

	Fornitura	Invecchiamento	Temperatura	Frequenza di prova ^(*)
K_2	±15%	±20%	±20%	±10%
K_{sec}	±15%	±20%	±40%	±10%
ξ_e	±10%	±15%	±15%	±10%

^(*) Valori ottenuti o dichiarati con riferimento alle stesse frequenze delle prove di qualificazione.

Quando il rapporto d'incrudimento risulta $K_2/K_1 \leq 0,05$, il limite su K_2 viene sostituito dal limite sulla variazione di K_2/K_1 che deve differire meno di 0,01 dal valore di progetto.

11.9.5.1 PROVE DI ACCETTAZIONE SUI DISPOSITIVI

Si applica quanto previsto al § 11.9.4.1 per i dispositivi lineari.

11.9.6. DISPOSITIVI A COMPORTAMENTO VISCOSO

I dispositivi a comportamento viscoso trasmettono, in generale, soltanto azioni orizzontali ed hanno rigidezza trascurabile nei confronti delle azioni verticali. Essi sono caratterizzati da un valore della forza proporzionale a v^α , e pertanto non contribuiscono significativamente alla rigidezza del sistema. La relazione forza spostamento di un dispositivo viscoso, per una legge sinusoidale dello spostamento, è riportata in Fig. 11.9.2. La forma del ciclo è ellittica per $\alpha=1$.

Il loro comportamento è caratterizzato dalla massima forza sviluppata F_{max} e dall'energia dissipata E_d in un ciclo, per una prefissata ampiezza e frequenza, ossia dalle costanti C e α .

Per assicurare un comportamento ciclico stabile, le variazioni dell'energia dissipata E_d in una serie di cicli di carico riferiti a stessa velocità e spostamento massimi devono essere limitate nel modo seguente:

$$\left| E_{d(i)} - E_{d(3)} \right| / E_{d(3)} \leq 10\% \quad [11.9.7]$$

dove il pedice "(3)" si riferisce a quantità determinate nel terzo ciclo di carico ed il pedice "(i)" si riferisce a quantità relative all' i -esimo ciclo, escluso il primo ($i \geq 2$).

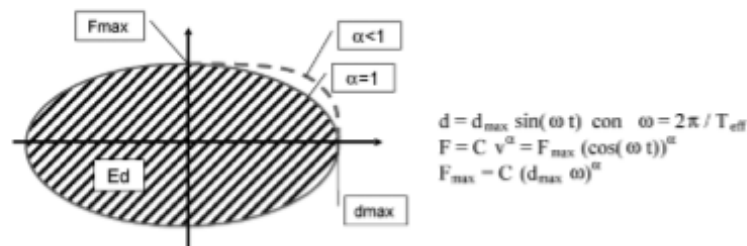


Fig. 11.9.2 – Dispositivi a comportamento viscoso

Le massime differenze tra le caratteristiche meccaniche ottenute nelle prove di qualificazione ed i valori di progetto o nelle normali condizioni d'uso devono essere contenute entro limiti riportati in Tab. 11.9.III, tenendo conto dei rapporti di scala tra i dispositivi sottoposti a prove di qualificazione e quelli reali.

Tab. 11.9.III

	Fornitura	Invecchiamento	Temperatura	Frequenza di prova
F_{max}	±15%	±5%	±5%	±10%
E_d	-15%	-5%	-5%	±10%

Per tener conto di possibili valori di velocità superiori a quelli di progetto, la forza massima di progetto del dispositivo va amplificata con un fattore di affidabilità γ_v dato da

$$\gamma_v = (1+t_d) \cdot (1,5)^\alpha \quad [11.9.8]$$

in cui t_d è la tolleranza sulla forza di progetto fornita dal fabbricante, comprensiva della variabilità per effetto della temperatura, e α è l'esponente delle legge costitutiva.

Il dispositivo deve possedere due cerniere sferiche alle estremità onde evitare effetti di trafilamento e deterioramento delle guarnizioni, e la capacità rotazionale deve essere valutata tenendo conto dei carichi che interesseranno la struttura nel corso della vita, degli effetti del sisma e dei disallineamenti di montaggio. In ogni caso la rotazione consentita dalle cerniere non deve essere inferiore ai 2 gradi sessagesimali.

I dispositivi devono essere progettati in modo da evitare snervamenti sotto l'applicazione dei carichi di servizio e rotture sotto le condizioni di collasso. Devono essere inoltre in grado di sopportare le accelerazioni laterali risultanti dalle analisi sismiche strutturali allo SLC e, in assenza di tale valutazione, devono resistere ad una forza minima trasversale pari ad almeno due volte il peso proprio del dispositivo. Il progetto e la costruzione del dispositivo devono consentire la manutenzione nel corso della vita utile ed evitare che fenomeni di instabilità interessino gli steli, nelle condizioni di massima estensione ed in riferimento alla configurazione di messa in opera

11.9.6.1 PROVE DI ACCETTAZIONE SUI DISPOSITIVI

Le prove di accettazione devono essere effettuate su almeno il 20% dei dispositivi, comunque non meno di 4 e non più del numero di dispositivi da mettere in opera.

11.9.7. ISOLATORI ELASTOMERICI

Gli isolatori debbono avere pianta con due assi di simmetria ortogonali, così da presentare un comportamento il più possibile indipendente dalla direzione dell'azione orizzontale agente. Ai fini della determinazione degli effetti di azioni perpendicolari agli strati, le loro dimensioni utili debbono essere riferite alle dimensioni delle piastre in acciaio, depurate di eventuali fori, mentre per gli effetti delle azioni parallele alla giacitura degli strati si considererà la sezione intera dello strato di gomma.

Le piastre di acciaio devono essere conformi a quanto previsto nelle norme per gli apparecchi di appoggio, con un allungamento minimo a rottura del 18% e spessore minimo pari a 2 mm per le piastre interne e a 20 mm per le piastre esterne.

Si definiscono due fattori di forma:

S_1 fattore di forma primario, rapporto tra la superficie A' comune al singolo strato di elastomero ed alla singola piastra d'acciaio, depurata degli eventuali fori (se non riempiti successivamente), e la superficie laterale libera L del singolo strato di elastomero, maggiorata della superficie laterale degli eventuali fori (se non riempiti successivamente) ossia $S_1 = A'/L$;

S_2 fattore di forma secondario, rapporto tra la dimensione in pianta D della singola piastra in acciaio, parallelamente all'azione orizzontale agente, e lo spessore totale t_e degli strati di elastomero ossia $S_2 = D/t_e$.

Gli isolatori in materiale elastomerico ed acciaio sono individuati attraverso le loro curve caratteristiche forza -spostamento, generalmente non lineari, tramite i due parametri sintetici: la rigidezza equivalente K_e , il coefficiente di smorzamento viscoso equivalente ξ_e .

La rigidezza equivalente K_e , relativa ad un ciclo di carico, è definita come rapporto tra la forza F corrispondente allo spostamento massimo d raggiunto in quel ciclo e lo stesso spostamento ($K_e = F/d$) e si valuta come prodotto del modulo dinamico equivalente a taglio G_{din} per A/t_e .

Il coefficiente di smorzamento viscoso equivalente ξ_e si definisce come rapporto tra l'energia dissipata in un ciclo completo di carico E_d e $2\pi Fd$, ossia $\xi_e = E_d/(2\pi Fd)$.

La rigidezza verticale K_v è definita come rapporto tra la forza verticale di progetto F_v e lo spostamento verticale d_v ($K_v = F_v/d_v$).

Le massime differenze tra le caratteristiche meccaniche ottenute nelle prove di qualificazione ed i valori di progetto o nelle normali condizioni d'uso devono essere contenute entro limiti riportati in Tab. 11.9.IV.

Le variazioni devono essere valutate con riferimento al 3° ciclo di prova. Le frequenze di prova per valutare le variazioni delle caratteristiche meccaniche sono 0,1Hz e 0,5Hz.

Tab. 11.9.IV

	Fornitura	Invecchiamento	Temperatura	Frequenza di prova
K_e	±20%	±20%	±20%	±20%
K_v	-30%	-	-	-
ξ_e	±20%	±20%	±20%	±20%

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

11.9.7.1 PROVE DI ACCETTAZIONE SUI DISPOSITIVI

Le prove di accettazione devono essere effettuate su almeno il 20% dei dispositivi, e comunque non meno di 4 e non più del numero di dispositivi da mettere in opera.

11.9.8. ISOLATORI A SCORRIMENTO

Gli isolatori a scorrimento devono essere in grado di sopportare, sotto spostamento massimo impresso pari a d_2 , almeno 5 cicli di carico e scarico. I cicli si riterranno favorevolmente sopportati se il coefficiente d'attrito (f), nei cicli successivi al primo, non varierà di più del 25% rispetto alle caratteristiche riscontrate durante il terzo ciclo, ossia

$$\left| f_{(i)} - f_{(3)} \right| / f_{(3)} \leq 0,25, \quad [11.9.9]$$

avendo contrassegnato con il pedice "(i)" le caratteristiche valutate all'i-esimo ciclo e con il pedice "(3)" le caratteristiche valutate al terzo ciclo. Detto d_{dc} lo spostamento massimo di progetto del centro di rigidità del sistema d'isolamento, corrispondente allo SLC, qualora l'incremento della forza nel sistema di isolamento per spostamenti tra $0,5 d_{dc}$ e d_{dc} sia inferiore all'1,25% del peso totale della sovrastruttura, gli isolatori a scorrimento debbono essere in grado di garantire la loro funzione di appoggio fino a spostamenti pari ad $1,25 d_2$.

11.9.8.1 PROVE DI ACCETTAZIONE SUI DISPOSITIVI

Le prove di accettazione, devono essere effettuate su almeno il 20% dei dispositivi, comunque non meno di 4 e non più del numero di dispositivi da mettere in opera.

Qualora gli isolatori fossero dotati di elementi o meccanismi supplementari atti a migliorarne le prestazioni sismiche, su almeno un dispositivo completo di tali parti supplementari verrà anche condotta una prova "quasi statica", imponendo almeno 5 cicli completi di deformazioni alternate, con ampiezza massima pari a $\pm d_2$. Il dispositivo non potrà essere utilizzato nella costruzione, a meno che il suo perfetto funzionamento non sia ripristinabile con la sostituzione degli elementi base.

11.9.9. DISPOSITIVI A VINCOLO RIGIDO DEL TIPO A “FUSIBILE”

I dispositivi a fusibile sono classificabili in due categorie: di tipo meccanico, quando lo svincolo è determinato dal rilascio di fermi sacrificali, o di tipo idraulico, quando lo svincolo è governato dall'apertura di una valvola di sovrappressione.

11.9.9.1 PROVE DI ACCETTAZIONE SUI DISPOSITIVI

Le prove di accettazione sui dispositivi saranno effettuate con le modalità di seguito indicate, e si riterranno superate se i risultati ottenuti non differiranno da quelli delle prove di qualificazione di oltre il $\pm 10\%$.

- misura della geometria esterna, con tolleranza di $\pm 10\%$ sugli spessori e $\pm 5\%$ sulle lunghezze, per i componenti determinanti ai fini del comportamento.
- Valutazione della capacità di sostenere almeno 3 cicli monotonici con carico massimo impresso pari al valore di progetto di servizio, con una tolleranza del $+10\%$, in assenza di snervamenti o rotture.
- Valutazione della forza di rilascio, sottoponendo il campione ad un carico monotonicamente crescente sino al raggiungimento della rottura del fusibile (forza di rilascio). La tolleranza, rispetto al valore di progetto, deve essere definita dal progettista e, in assenza di tale valutazione, è pari a $\pm 15\%$.

Le prove di accettazione devono essere effettuate su almeno il 20% dei dispositivi, comunque non meno di 4 e non più del numero di dispositivi da mettere in opera. Il dispositivo non potrà essere utilizzato nella costruzione, a meno che il suo perfetto funzionamento non sia ripristinabile con la sostituzione degli elementi base.

11.9.10. DISPOSITIVI (DINAMICI) DI VINCOLO PROVVISORIO

La corsa disponibile deve essere funzione dello spostamento di progetto non sismico, derivante da azioni lente, quali effetti termici, ritiro, viscosità e da qualsiasi altro spostamento relativo che può interessare le parti che il dispositivo connette, incluso lo spostamento dovuto alla comprimibilità del fluido in presenza di azione sismica. In ogni caso, la corsa non deve essere minore di ± 50 mm per i ponti e ± 25 mm per gli edifici.

Il dispositivo deve possedere due cerniere sferiche alle estremità onde evitare effetti di trafilamento e deterioramento delle guarnizioni, e la capacità rotazionale deve essere valutata tenendo conto dei carichi che interesseranno la struttura nel corso della vita, degli effetti del sisma e dei disallineamenti di montaggio. In ogni caso la rotazione consentita dalle cerniere non deve essere inferiore ai 2 gradi.

I dispositivi devono essere progettati in modo da evitare snervamenti sotto l'applicazione dei carichi di servizio e rotture sotto le condizioni di collasso. Devono essere inoltre in grado di sopportare le accelerazioni laterali risultanti dalle analisi sismiche strutturali allo SLC e, in assenza di tale valutazione, devono resistere ad una forza minima pari ad almeno due volte il peso proprio del dispositivo. Il progetto e la costruzione del dispositivo devono consentire la manutenzione nel corso della vita utile ed evitare che fenomeni di instabilità interessino gli steli, nelle condizioni di massima estensione ed in riferimento alla configurazione di messa in opera.

Il fattore di sicurezza nei confronti delle sovrappressioni, rispetto alle condizioni di progetto sismico allo SLC, deve essere pari ad 1,5, salvo che per i dispositivi dotati di sistema di protezione dal sovraccarico incorporato, per i quali il sistema deve attivarsi per una forza minore del 110% della forza di progetto ed il fattore di sicurezza deve essere assunto almeno pari ad 1,1.

La velocità di attivazione dei dispositivi, tipicamente, è compresa tra 0,5 mm/s e 5 mm/s, valori decisamente maggiori di 0,01 mm/s.

11.9.10.1 PROVE DI ACCETTAZIONE SUI DISPOSITIVI

Le prove di accettazione devono essere effettuate su almeno il 20% dei dispositivi, comunque non meno di 4 e non più del numero di dispositivi da mettere in opera. Il dispositivo potrà essere utilizzato nella costruzione, salvo verifica della sua perfetta integrità al termine delle prove.

Per le prove di accettazione per le quali non ci si avvalga delle prove di controllo di produzione in fabbrica, la prova di "sovrappressione" è effettuata secondo la valutazione del comportamento rispetto ad un sovraccarico, accertando che il dispositivo attivi il meccanismo di protezione dalle sovrappressioni per una forza minore ad 1,5 volte quella di progetto, se dotato di meccanismo di protezione interno, o che non subisca né perdite di fluido né alcun danno al sistema, se ne è sprovvisto, sotto l'applicazione della storia di carico seguente:

- a) Raggiungimento del carico di progetto in meno di 0,5 secondi e mantenimento costante dello stesso per un tempo stabilito dal progettista e, comunque, per almeno 5 secondi;
- b) Inversione del carico in meno di 1 secondo e mantenimento costante dello stesso per un tempo stabilito dal progettista e, comunque, per almeno 5 secondi.