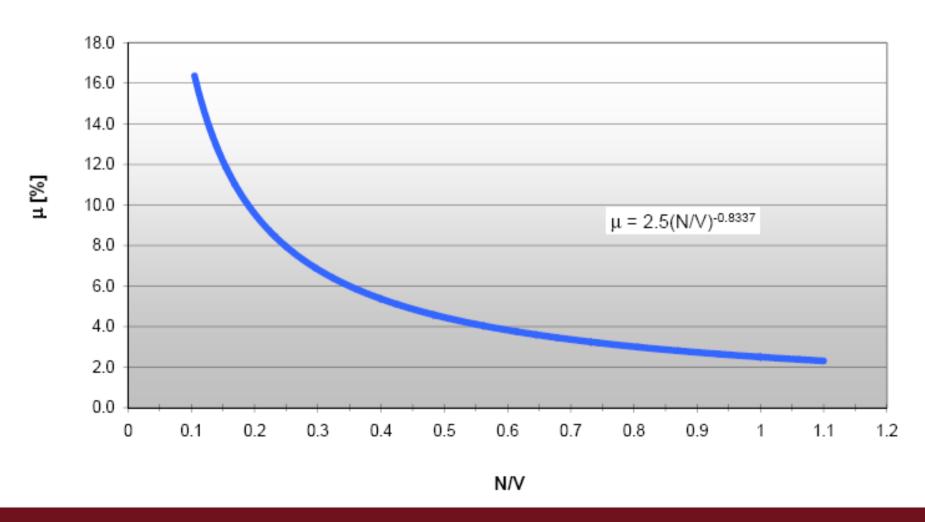
## Dispositivi: scorrevoli sup. curva

#### Variabilità coefficiente di attrito

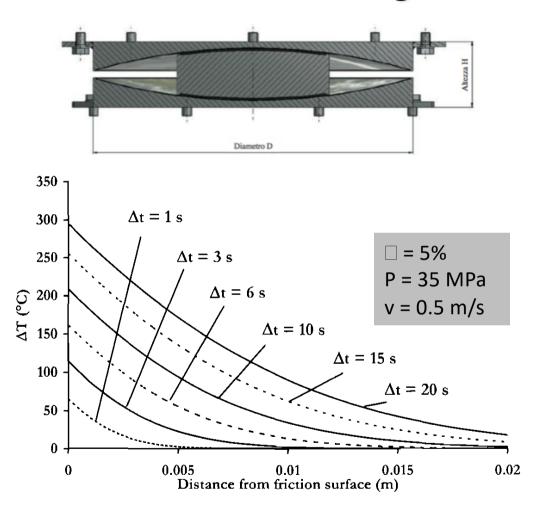
#### Attrito Vs Carico Verticale

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

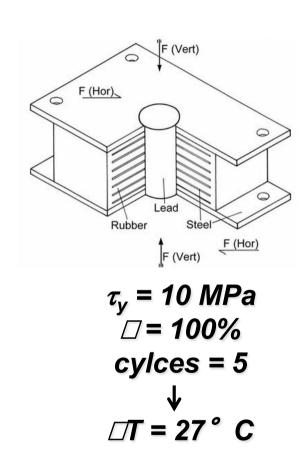


## Dispositivi

### Problemi legati al surriscaldamento

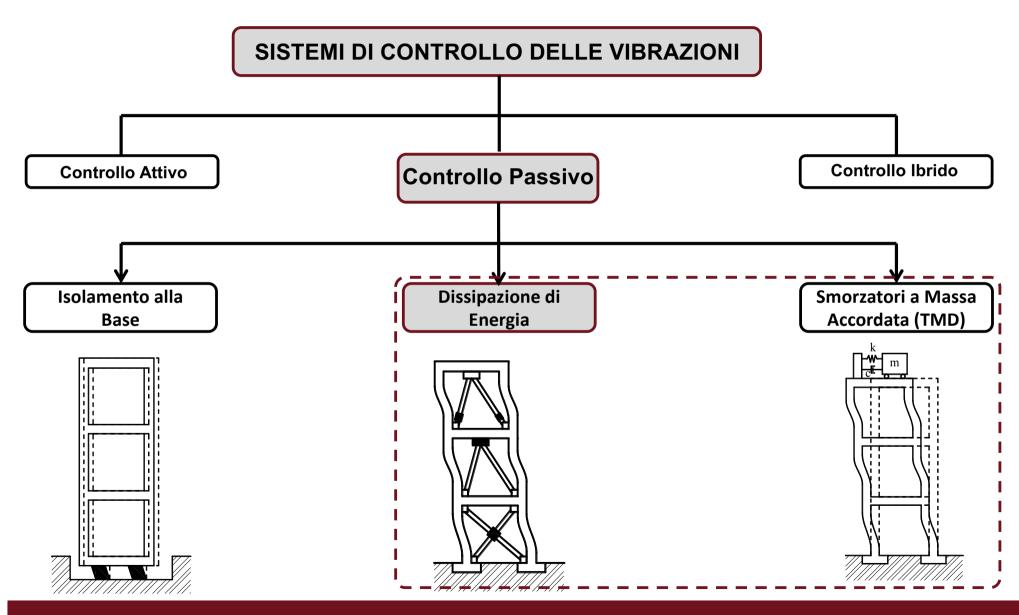


Possible damage and reduction of friction coefficient



Possible changes in the mechanical properties of lead

## Approcci "innovativi"



### Il concetto

- I dispositivi per la dissipazione di energia assolvono una doppia funzione:
  - rendere duttile la struttura;
  - diminuire la richiesta di resistenza, dissipando l'energia immessa dal sisma.
- Quasi tutti i dispositivi per la dissipazione di energia possono essere inseriti nella struttura tramite controventi: fanno eccezione i tuned mass damper.
- L'inserimento di controventi dissipativi nelle strutture intelaiate, per dissipare energia sfruttando gli spostamenti d'interpiano, è una tecnologia di protezione sismica sviluppata fin dagli anni '70. Tale tecnologia, nata inizialmente per strutture in acciaio, può essere considerata un'evoluzione dei controventi eccentrici, in cui la dissipazione di energia è affidata ad una porzione di trave.
- Con l'uso dei controventi dissipativi, la dissipazione di energia è concentrata nel controvento stesso, o in un elemento apposito (dissipatore) che ne è parte, così da evitare il danneggiamento negli elementi strutturali principali (travi e pilastri).
- Recentemente la tecnologia dei controventi dissipativi è stata utilizzata per l'adeguamento sismico di strutture in c.a. a bassa duttilità.

# Tipologie di dissipatori

- I dispositivi per la dissipazione di energia possono essere:
  - Dissipatori metallici (metallic damper): dissipano grazie alla deformazione plastica di metalli (acciaio);
  - Dissipatori ad attrito (friction damper): dissipano per attrito tra due solidi che scivolano l'uno rispetto all'altro;
  - Dissipatori viscoelastici elastomerici (elastomeric visco-elastic damper, EVED): impiegano materiali viscoelastici (tipicamente copolimeri ed elastomeri) che dissipano energia se soggetti a deformazioni di taglio;
  - Dissipatori a fluido viscoso (viscous fluid damper): dissipano trasformando l'energia meccanica in calore, durante il movimento di un pistone all'interno di un cilindro contenente un fluido molto viscoso;
  - **Dissipatori** "a massa accordata" (tuned mass damper, TMD): consistono di un sistema massa-molla-smorzatore ausiliario, ancorato alla struttura, che se messo in risonanza si muove in opposizione di fase rispetto alla struttura, riducendone gli spostamenti; lo smorzatore consiste in un dissipatore di energia a fluido viscoso.
- Come accennato in precedenza, tutti i dispositivi per la dissipazione di energia ad eccezione dei tuned mass damper possono essere inseriti nella struttura tramite controventi.

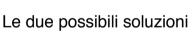
## Dissipatori metallici

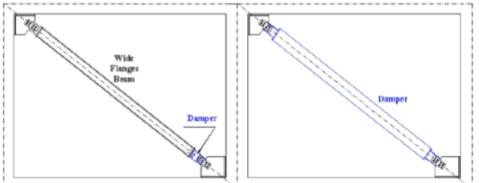
Il **Buckling-Restrained Axial Damper (BRAD)** o dissipatore assiale a instabilità impedita è una delle tipologie di dissipatori metallici in acciaio isteretici attualmente utilizzati.

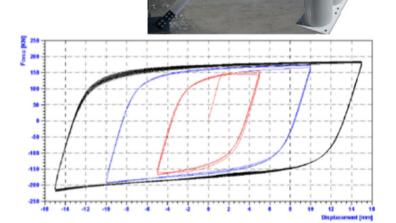
Tali dissipatori, particolarmente adatti per l'adeguamento sismico di edifici intelaiati in acciaio, cemento armato o c.a.p., presentano le proprie capacità dissipative quando soggetti a cicli alterni di trazione e compressione.

Una soluzione realizzativa è quella di inserire un nucleo in acciaio (il dissipatore) in un profilato di acciaio cavo riempito di calcestruzzo, necessario quest'ultimo a evitare il buckling; tra il calcestruzzo ed il nucleo interno non viene trasmesso taglio, in modo che il nucleo sia libero di deformarsi e dissipare. Il sistema nucleo-tubo esterno costituisce un controvento.

Un'altra soluzione realizzativa prevede che il dissipatore venga collegato in serie ad un'asta in acciaio (che rimane elastica), a formare un controvento.

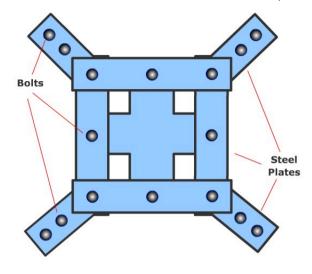




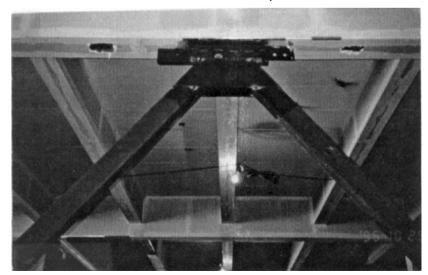


## Dissipatori ad attrito

I dissipatori ad attrito sono costituiti da più piastre in acciaio bullonate, che sfregano durante il sisma dissipando energia. Sono di solito inseriti in controventi, con diverse configurazioni.



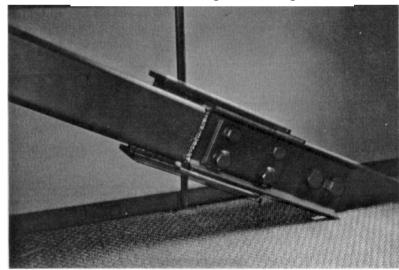
Controventi concentrici di tipo Chevron



Controventi concentrici a X

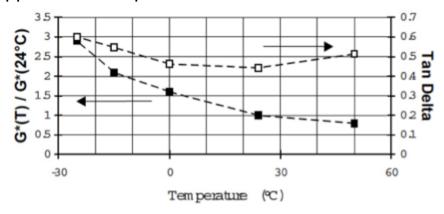


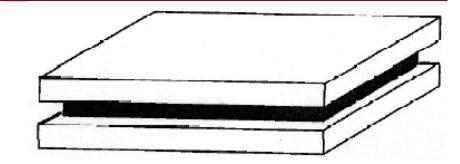
Controventi in diagonale singola



## Dissipatori viscoelastici elastomerici

I dissipatori viscoelastici elastomerici sono costituiti da un singolo strato di elastomero incollato a due piastre in acciaio. Il modulo di taglio G e lo smorzamento non devono variare troppo con la temperatura.

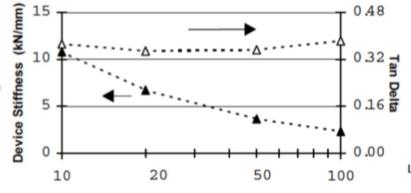




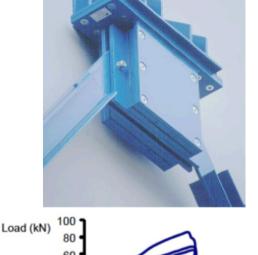
 $tan\delta$  è il loss factor =  $2*d_{cr}$ 

Le proprietà dinamiche devono variare poco anche con l'ampiezza della deformazione di taglio

e con la frequenza di eccitazione.



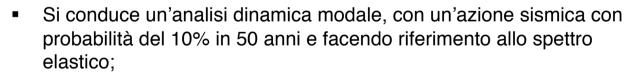
Strain (%)

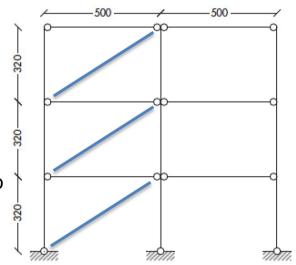


Frequency Hz	Stiffness kN/mm	Loss factor					
0.01	3.1	0.35					
0.1	3.4	0.35					
1	4.1	0.34					
Strain amplitude 50%. Tenth cycle data							

# Principi di progettazione dei BRAD

- Con riferimento ai controventi con dissipatori assiali a instabilità impedita (BRAD) il progetto viene effettuato seguendo due metodologie:
  - La prima, approssimata, è utile per il predimensionamento
  - La seconda, più raffinata, si usa per ottimizzare la soluzione
- Il predimensionamento si effettua in campo elastico:
  - Il modello strutturale è reso labile, aggiungendo cerniere alla base ed alle estremità delle travi. Tale configurazione statica simula lo stato della struttura in condizione ultima (SLU);
  - Nel modello reso labile si introduce, per ogni piano e ognuna delle direzioni principali, un unico controvento di tipo elastico (controvento equivalente), che porta interamente le forze orizzontali ed elimina la labilità;

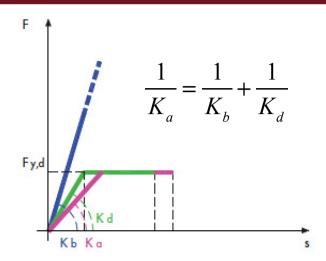




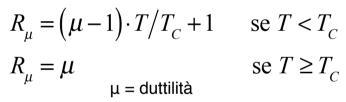
- In base allo sforzo normale N sulle aste dei controventi equivalenti, nota la lunghezza L, si stima la rigidezza assiale dei controventi necessaria per ogni piano (indice i); EA = EN
- Si divide poi la rigidezza calcolata per il numero di controventi  $k_{tot,i} = \frac{1}{L} = \frac{1}{Lf_y} \rightarrow k_i = \frac{101,1}{n_i}$  di piano  $n_i$ , ottenendo il limite superiore dell'anima di acciaio dei controventi;
- Si verificano gli spostamenti d'interpiano allo SLE, eventualmente modificando le sezioni;

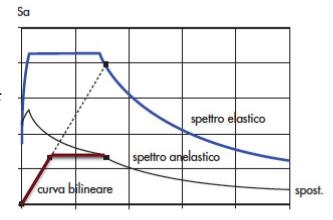
# Principi di progettazione dei *BRAD*

Ai fini di definire la duttilità del controvento e quindi della struttura, la struttura a più gradi di libertà (MDOF) viene schematizzata come un oscillatore semplice (SDOF) equivalente elastoplastico, la cui rigidezza e resistenza alle forze orizzontali sono date solo dal controvento equivalente: questo è costituito da due molle in serie, di cui una elastica (per il tratto non dissipativo) di rigidezza K<sub>h</sub>, e una elastoplastica (per il dissipatore), di rigidezza K<sub>d</sub> e forza di snervamento F<sub>vd</sub>. La rigidezza del sistema duale è indicata con Ka;



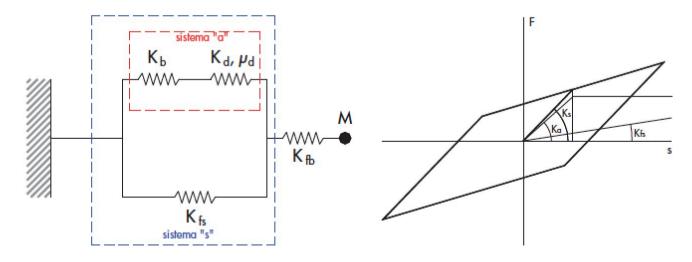
- Nel piano Acceleration Displacement Response Spectrum (ADRS) si riportano lo spettro elastico a SLU e quello anelastico, ottenuto applicando il fattore R<sub>...</sub>; poiché la struttura è labile, la sua duttilità coincide con quella del sistema di controvento, la quale viene assegnata;
- Nel piano ADRS, nota la rigidezza elastica Ka del sistema di controvento (e quindi il suo periodo) si traccia una curva bilineare che stabilisce la domanda in spostamento ed in termini di taglio alla base del sistema di controvento;
- Le caratteristiche del controvento equivalente del sistema SDOF vengono infine ripartite tra i piani;
- Le verifiche si conducono mediante analisi dinamica non lineare sulla struttura reale, concentrando le nonlinearità nei dissipatori e controllando che la stessa rimanga in campo elastico.





## Principi di progettazione dei BRAD

- Dopo il predimensionamento, si può raffinare la soluzione ottimizzando le caratteristiche dei dissipatori da inserire:
- Si può procedere per tentativi con analisi dinamiche non lineari fino all'ottimizzazione delle caratteristiche;
- In alternativa, si può seguire ad esempio il lavoro di Kasai et al. (1998) "Passive Control Systems for Seismic Damage Mitigation". Journal of Structural Engineering. Senza entrare nel dettaglio, la procedura prevede tre passi:
  - Modellazione della struttura e calcolo del primo modo di vibrare;
  - Calcolo delle caratteristiche di un dissipatore ottimizzato per uno SDOF che rappresenta il primo modo di vibrare della struttura;
  - Ripartizione tra i piani delle caratteristiche del dissipatore calcolato e passaggio da SDOF a MDOF.



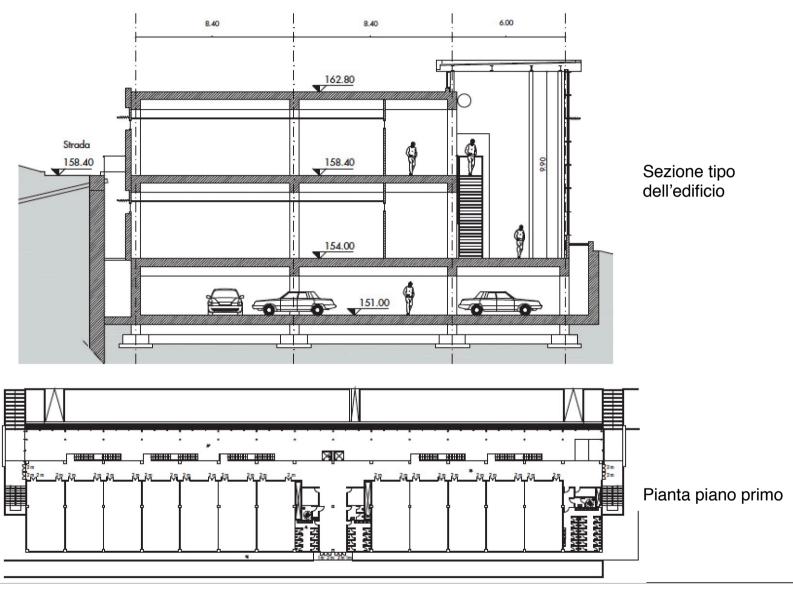
Fonte: R. Antonucci, F. Balducci, F. Cappanera, M.G. Castellano (2009). Strutture prefabbricate con controventi dissipativi: l'esempio del nuovo polo didattico della Facoltà di Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche di Ancona. Progettazione Sismica

Il nuovo polo didattico della Facoltà di Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche di Ancona



Fonte: R. Antonucci, F. Balducci, F. Cappanera, M.G. Castellano (2009). Strutture prefabbricate con controventi dissipativi: l'esempio del nuovo polo didattico della Facoltà di Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche di Ancona. Progettazione Sismica

Seminario Igeam Rischio Sismico, Roma 14 febbraio 2018 – Interventi sulle Costruzioni Esistenti – Prof. Ing. Alessio Lupoi 88

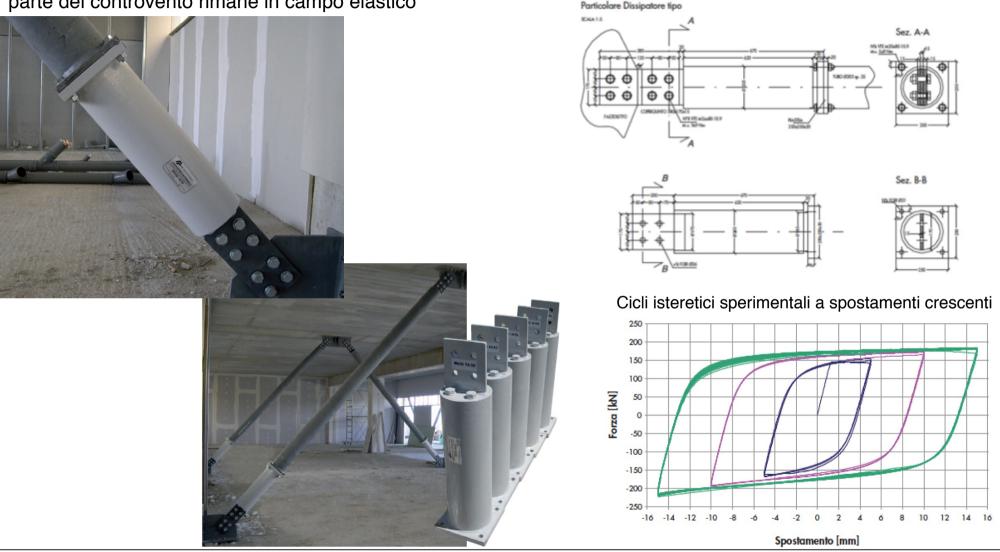


Fonte: R. Antonucci, F. Balducci, F. Cappanera, M.G. Castellano (2009). Strutture prefabbricate con controventi dissipativi: l'esempio del nuovo polo didattico della Facoltà di Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche di Ancona. Progettazione Sismica

Seminario Igeam Rischio Sismico, Roma 14 febbraio 2018 – Interventi sulle Costruzioni Esistenti – Prof. Ing. Alessio Lupoi 89

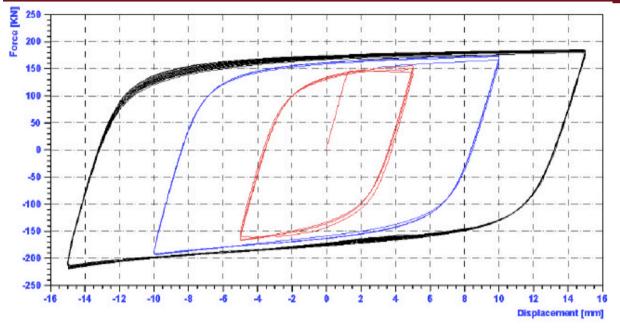
Particolari del Buckling-Restrained Axial Damper (BRAD) o dissipatore assiale a instabilità impedita: la restante

parte del controvento rimane in campo elastico

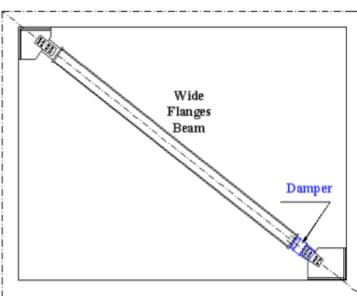


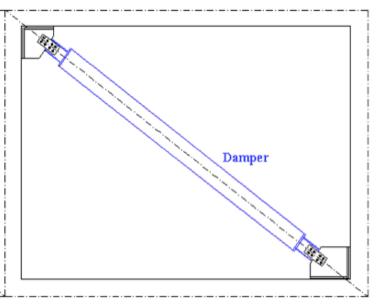
Fonte: R. Antonucci, F. Balducci, F. Cappanera, M.G. Castellano (2009). Strutture prefabbricate con controventi dissipativi: l'esempio del nuovo polo didattico della Facoltà di Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche di Ancona. Progettazione Sismica

## Buckling Restrained Axial Damper (BRAD)











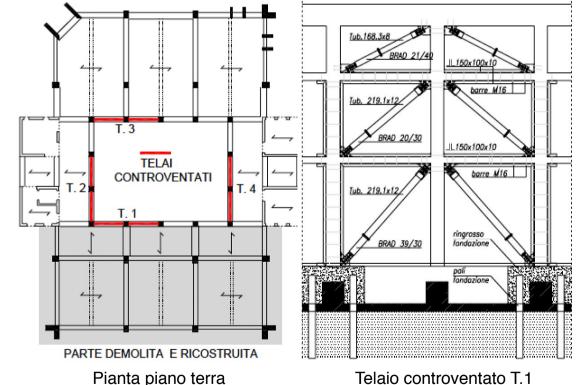
Fonte: R. Antonucci, F. Balducci, F. Cappanera, M.G. Castellano (2009). Strutture prefabbricate con controventi dissipativi: l'esempio del nuovo polo didattico della Facoltà di Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche di Ancona. Progettazione Sismica

L'utilizzo di controventi dissipativi per la protezione sismica del plesso scolastico Cappuccini a Ramacca (CT)

Vista la tipologia del sistema strutturale costituita da telai in c.a., nonché la distribuzione dei singoli elementi resistenti, il miglioramento sismico è stato effettuato mediante l'inserimento di controventi dissipativi con l'obbiettivo di ridurre l'effetto delle azioni orizzontali sul complesso strutturale in c.a., indirizzando l'energia trasmessa dal sisma in zone opportunamente concepite in termini di resistenza e di capacità dissipativa

(telai controventati).

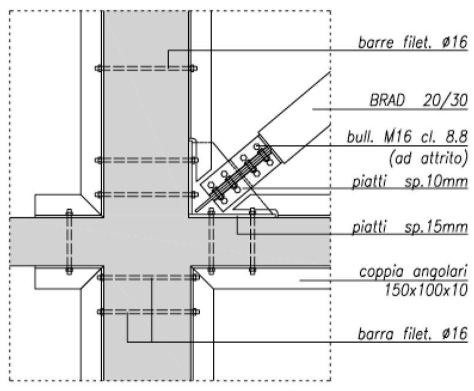
I controventi sono stati realizzati collegando in serie ad un'asta in acciaio un dispositivo antisismico (dissipatore). I dissipatori scelti per l'intervento sono di tipo BRAD. Tali sistemi, particolarmente adatti per l'adeguamento sismico di edifici intelaiati in acciaio, cemento armato o c.a.p., presentano le proprie capacità dissipative quando soggetti a cicli alterni di trazione e compressione. Considerando la distribuzione degli ambienti, si è scelto di disporre i controventi all'interno dei telai costituenti il vano centrale dell'edificio, controventando quattro telai per ogni direzione principale, per un totale di 24 elementi dissipativi.



Fonte: F. Neri, M. La Guzza, A. Russo (2008). L'utilizzo di controventi dissipativi per la protezione sismica del plesso scolastico Cappuccini a Ramacca (CT). Rivista elettronica GLISNews n° 1.







Particolare di attacco controvento

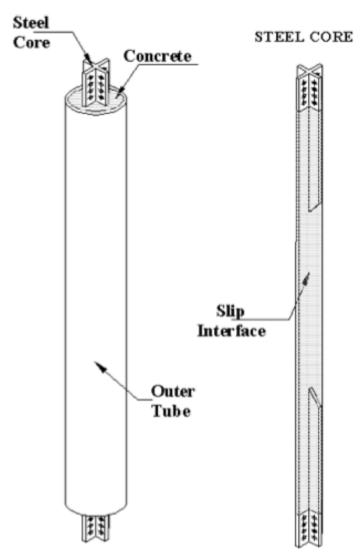
Fonte: F. Neri, M. La Guzza, A. Russo (2008). L'utilizzo di controventi dissipativi per la protezione sismica del plesso scolastico Cappuccini a Ramacca (CT). Rivista elettronica GLISNews n° 1.

Seminario Igeam Rischio Sismico, Roma 14 febbraio 2018 – Interventi sulle Costruzioni Esistenti – Prof. Ing. Alessio Lupoi 94

### Buckling Restrained Axial Damper (BRAD)

Dissipazione per isteresi nell'acciaio soggetto a deformazione ciclica assiale





La progettazione del sistema dissipativo è stata effettuata in maniera iterativa cercando di conciliare l'intervallo di operatività del sistema controvento equivalente definita a livello teorico (quindi la rigidezza e la resistenza richiesta in funzione della struttura esistente), con le caratteristiche meccaniche e geometriche reali dei due elementi costituenti lo stesso.

#### Due passi fondamentali:

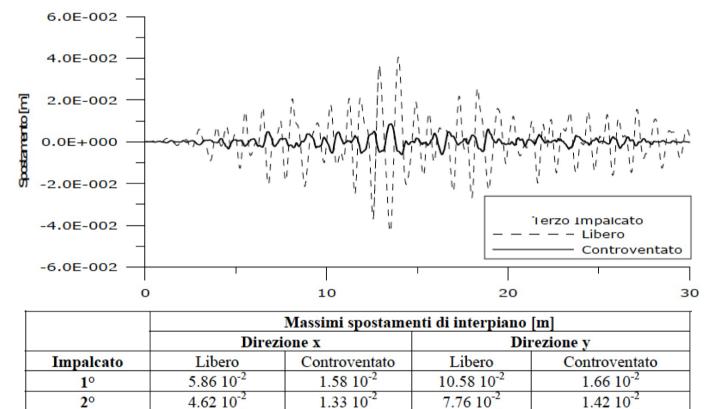
- Calcolo della rigidezza e della resistenza equivalente dell'intero sistema in funzione degli spostamenti di interpiano e dell'azione sismica di riferimento;
- Scelta delle caratteristiche meccaniche e geometriche degli elementi asta e dissipatore e relativa verifica mediante analisi non lineari.

	Rigidezza controvento	Tubolare	Dissipatore tipo BRAD				
PIANO			SIGLA	Fy	Fmax,media	Rigidezza elastica	Spost. max progetto
	[kN/mm]	[mm / mm]		[kN]	[kN]	[kN/mm]	[mm]
3°	100	168.3 / 8	21/40	150	180	130	± 20
2°	120	219.1 / 12	20/30	150	180	165	± 15
1°	200	219.1 / 12	39/30	300	350	305	± 15

Caratteristiche controventi dissipativi

Fonte: F. Neri, M. La Guzza, A. Russo (2008). L'utilizzo di controventi dissipativi per la protezione sismica del plesso scolastico Cappuccini a Ramacca (CT). Rivista elettronica GLISNews n° 1.

Al fine di validare l'efficacia della soluzione progettuale si sono effettuate analisi lineari e non lineari. Con riferimento a queste ultime si sono condotte delle analisi time-history non lineari utilizzando come input accelerogrammi spettro compatibili. Le analisi condotte hanno mostrato una notevole riduzione degli spostamenti e delle sollecitazioni nella struttura esistente, con al contempo richieste di duttilità nei dissipatori compatibili con quanto disponibile.



Confronto massimi spostamenti di interpiano per il sistema con e senza controventi dissipativi

 $8.56 \overline{10^{-3}}$ 

4.38 10-2

 $7.66 \ 10^{-3}$ 

Fonte: F. Neri, M. La Guzza, A. Russo (2008). L'utilizzo di controventi dissipativi per la protezione sismica del plesso scolastico Cappuccini a Ramacca (CT). Rivista elettronica GLISNews n° 1.

 $5.83 \ \overline{10^{-2}}$ 

30

#### Prove sui dissipatori

Allo scopo di testare la risposta meccanica dei dispositivi antisismici BRAD, sono state eseguite su di essi le prove di qualificazione richieste dell'O.P.C.M. 3274/03, secondo le indicazioni al punto 10.B.3 "Dispositivi a comportamento non lineare e lineare". Le prove, eseguite con controllo degli spostamenti impressi, sono state realizzate su 2 dispositivi, ovvero un BRAD 21/40 ed un BRAD 20/30.

L'analisi dei cicli alle diverse ampiezze, evidenzia le notevoli caratteristiche inelastiche del dispositivo. Per carichi di trazione, il comportamento del dispositivo è sostanzialmente uguale a quello del materiale elasticoperfettamente plastico, in cui raggiunta la soglia di snervamento, gli spostamenti crescono sotto carico costante. Per carichi di compressione si manifesta invece un effetto incrudente nel tratto plastico della curva, dovuto all'effetto del confinamento prodotto dal materiale presente all'interno del sistema che, impedendo al materiale del dissipatore di deformarsi in direzione trasversale, aumenta la forza necessaria a deformarlo in compressione.

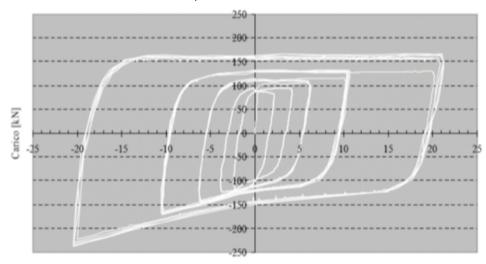
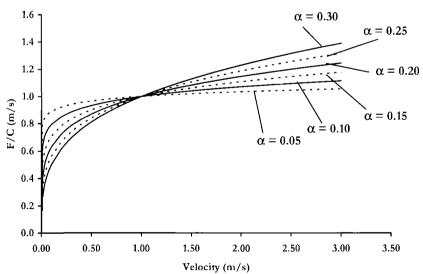


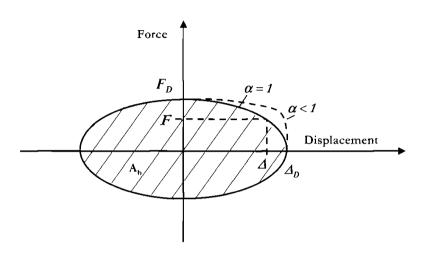
Diagramma carico spostamento BRAD mod. 21/40 – cicli ±2, ±4, ±6, ±10, ±20 mm

Fonte: F. Neri, M. La Guzza, A. Russo (2008). L'utilizzo di controventi dissipativi per la protezione sismica del plesso scolastico Cappuccini a Ramacca (CT). Rivista elettronica GLISNews n° 1.

# Dissipatori ausiliari

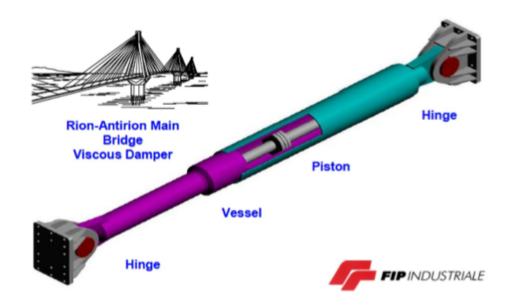


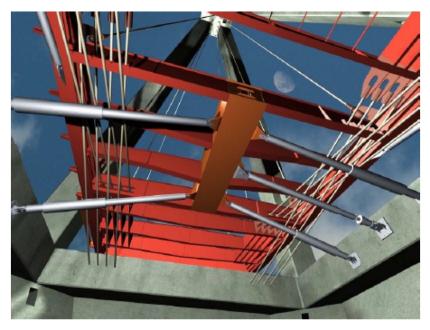






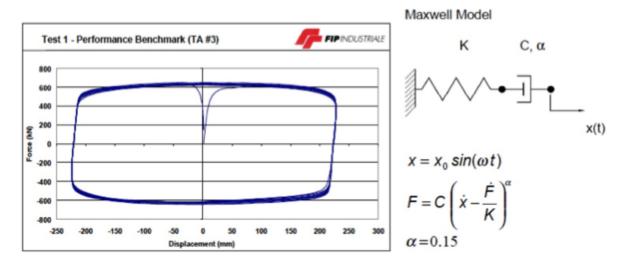
## Dissipatori a fluido viscoso



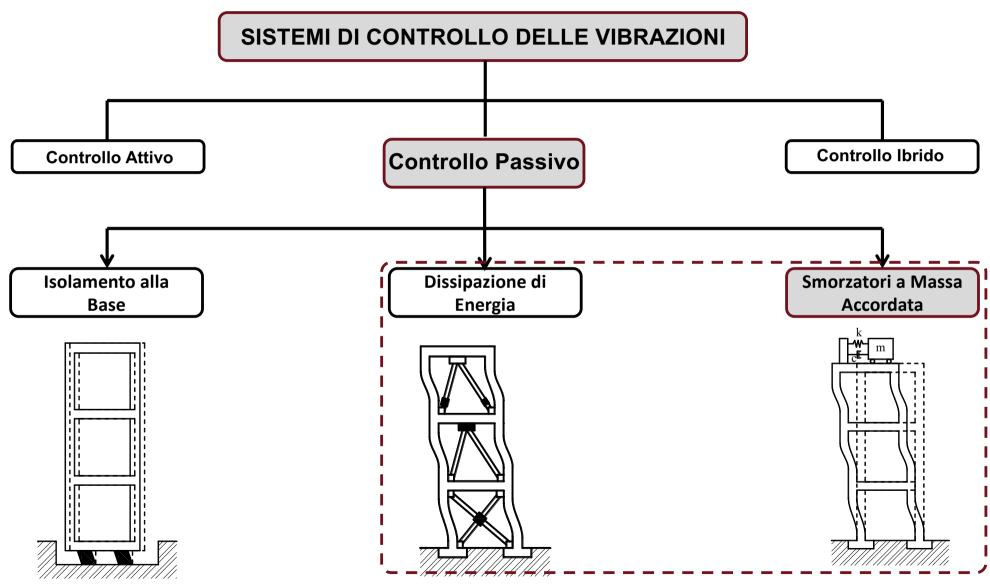


Dissipatori a fluido viscoso sul Rion Antirion Bridge

Il modello matematico più appropriato per questi dissipatori è il legame costitutivo di Maxwell, caratterizzato da una molla lineare in serie con uno smorzatore non lineare. Il primo elemento rappresenta l'elasticità del sistema dovuta alla compressibilità del fluido, mentre il secondo modella la dissipazione di energia. L'esponente  $\alpha$  caratterizza la non linearità della risposta come funzione della velocità.



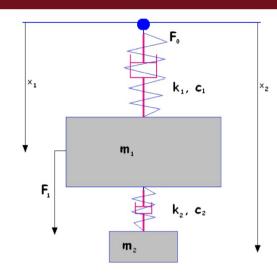
## Approcci "innovativi"



Seminario Igeam Rischio Sismico, Roma 14 febbraio 2018 – Interventi sulle Costruzioni Esistenti – Prof. Ing. Alessio Lupoi

# Tuned Mass Dampers (TMD)

Consistono di un sistema massa-molla-smorzatore ausiliario, ancorato alla struttura. Tale sistema ha la frequenza naturale "accordata" con una delle frequenze (di solito la prima) dell'edificio. Se il sistema viene messo in risonanza, si muove in opposizione di fase rispetto alla struttura, riducendone gli spostamenti. Il sistema è anche in grado, mediante il dissipatore a fluido viscoso (di costante  $c_2$  in figura), di dissipare parte dell'energia in ingresso nella struttura.



91st Floor [39.60 m]
(Outdoor Observation Deck)

88th Floor

87th Floor

Il Taipei 101 (il nome deriva dal numero di piani... H=449m) è dotato del TMD più grande al mondo (660 tonnellate, 5.5 metri di diametro): naturalmente per i grattacieli il TMD è utile per limitare gli spostamenti non solo dovuti al sisma, ma anche (e soprattutto) all'azione del vento.

