

*Prof.ssa Ing. Gloria Terenzi*

*Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Firenze*

# **Dispositivi di dissipazione di energia: Elementi di base e metodi di progetto**

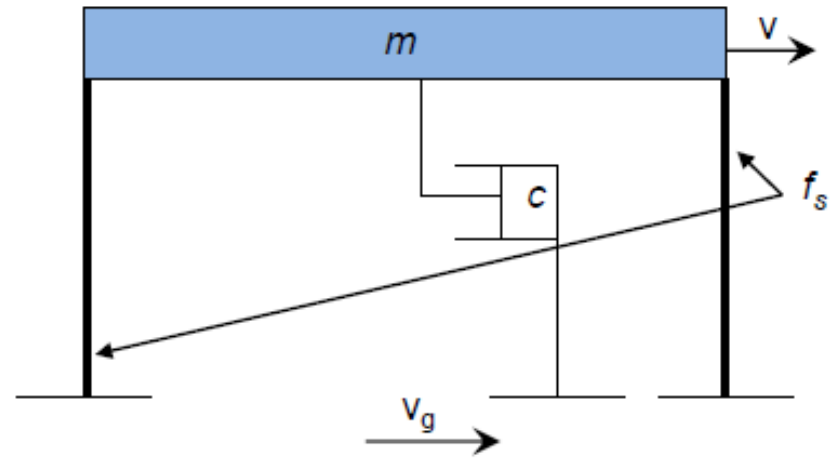
*Corso di Tecnologie avanzate di protezione sismica*

➤ *Progettazione tradizionale*

Approccio per duttilità

$$m\ddot{v}_t + c\dot{v} + f_s = 0$$

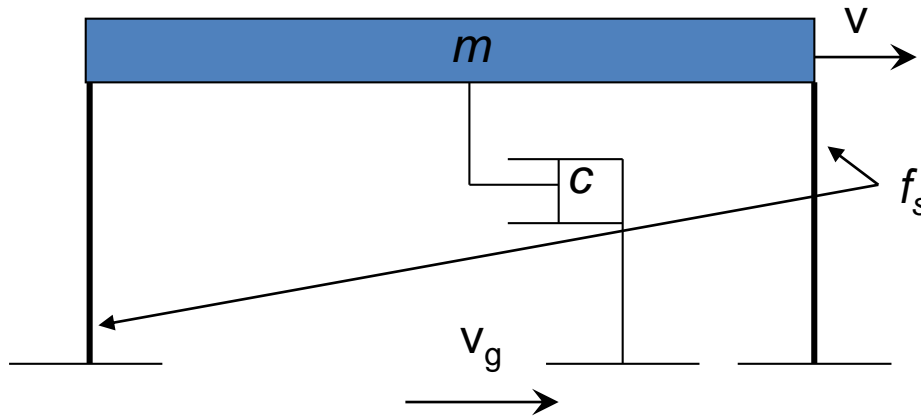
$\ddot{v}_t = \ddot{v} + \ddot{v}_g$



$$m\ddot{v}(t) + c\dot{v}(t) + kv(t) + f_p(t) = -m\ddot{v}_g(t)$$

**Obiettivo progettuale per azioni con  $P_{VR}$  del 10%/ $V_R$ :**  
si ammette il danno strutturale, conferendo alla struttura una  
prestabilita capacità di duttilità  
(passando per l'applicazione del criterio della gerarchia delle  
resistenze e dei dettagli costruttivi, la duttilità viene controllata  
ad ogni livello di definizione)

## Approccio energetico



Uang, C.M. and Bertero, V.V. (1988). *Use of energy as a design criterion in earthquake-resistant design*, Report UCB- EERC 88/18. Berkeley: University of California at Berkeley.

$$m\ddot{v}_t + c\dot{v} + f_s = 0 \quad \longrightarrow \quad \ddot{v}_t = \ddot{v} + \ddot{v}_g$$

$$\int m\ddot{v}_t dv + \int c\dot{v} dv + \int f_s dv = 0$$

## Approccio energetico

$$\int m\ddot{v}_t dv - \int c\dot{v} dv - \int f_s dv = 0$$

$$\int m\ddot{v}_t dv = \int m\ddot{v}_t (dv_t - dv_g) = \int m \frac{d\dot{v}_t}{dt} dv_t - \int m\ddot{v}_t dv_g = \frac{m(\dot{v}_t)^2}{2} - \int m\ddot{v}_t dv_g$$

$$E_k = \frac{m(\dot{v}_t)^2}{2}$$

$$E_i = \int m\ddot{v}_t dv_g$$

$$E_\xi = \int c\dot{v} dv = \int c\dot{v}^2 dt$$

$$E_a = \int f_s dv = E_s + E_h = \frac{(f_s)^2}{2k} + E_h$$

➤ *Progettazione tradizionale*

Approccio energetico

$$\int m\ddot{v}_t dv + \int c\dot{v}dv + \int f_s dv = 0 \longrightarrow E_k + E_\xi + E_s + E_h = E_i$$

$$E_k = \frac{m(\dot{v}_t)^2}{2} \rightarrow \text{Energia cinetica}$$

$$E_i = \int m\ddot{v}_t dv_g \rightarrow \text{Energia in ingresso}$$

$$E_\xi = \int c\dot{v}dv = \int c\dot{v}^2 dt \rightarrow \text{Energia di dissipazione viscosa}$$

$$E_a = \int f_s dv = E_s + E_h = \frac{(f_s)^2}{2k} + E_h \rightarrow \text{Energia potenziale elastica ed energia dissipata per isteresi}$$

➤ *Progettazione tradizionale*

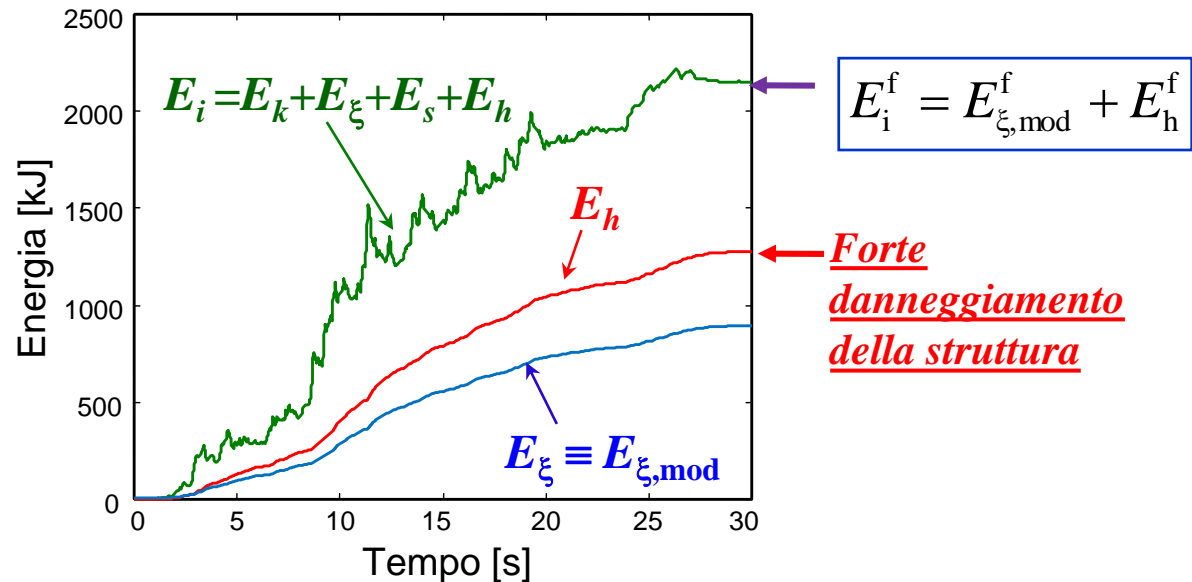
Approccio energetico

$$\int m\ddot{v}_t dv + \int c v dv + \int f_s dv = 0 \longrightarrow \boxed{E_k + E_\xi + E_s + E_h = E_i}$$

*Obiettivo progettuale per azioni con  $P_{VR}$  del 10%/ $V_R$ :*

**Risposta non lineare da parte della struttura con plasticizzazioni localizzate in corrispondenza degli elementi più duttili.**

**Le membrature principali si vengono a trovare in condizioni di SLV**



$$\boxed{E_{\xi,mod}^f + E_h^f = E_i^f}$$

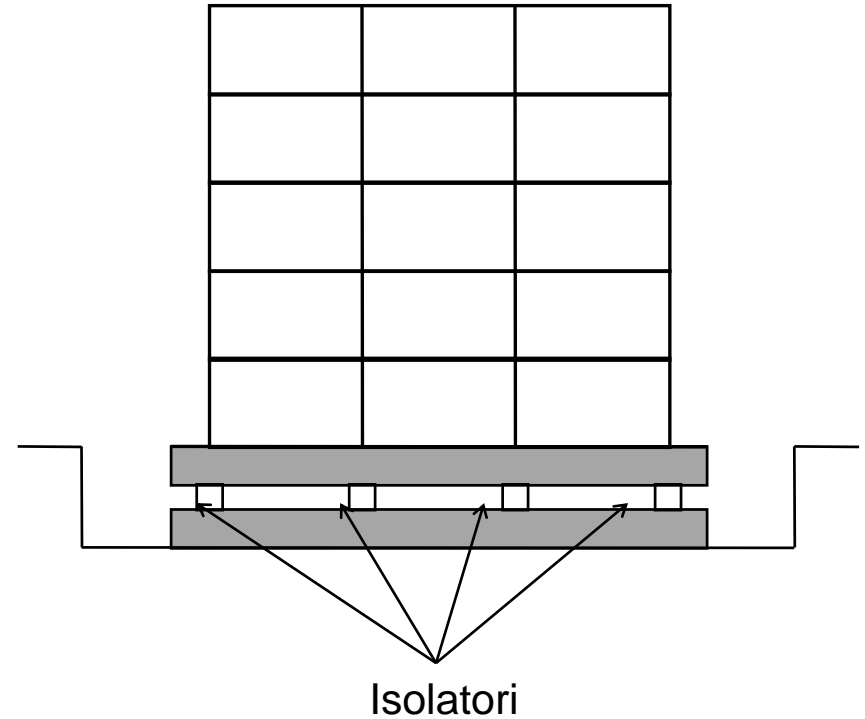
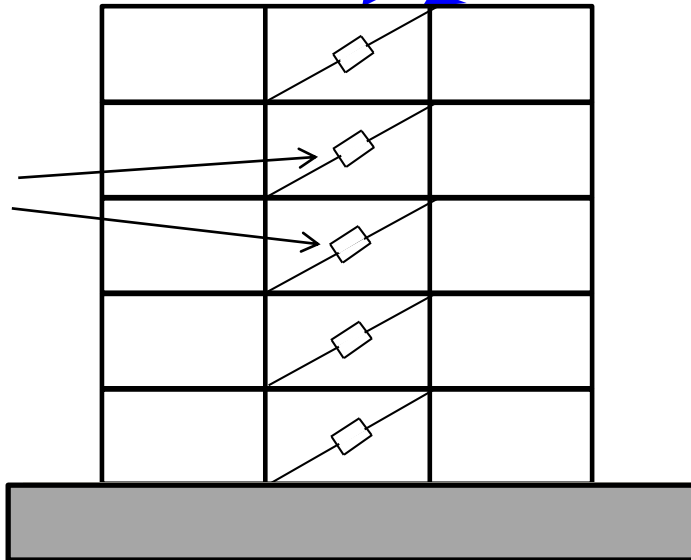
➤ **Tecnologie avanzate di protezione sismica delle strutture**

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

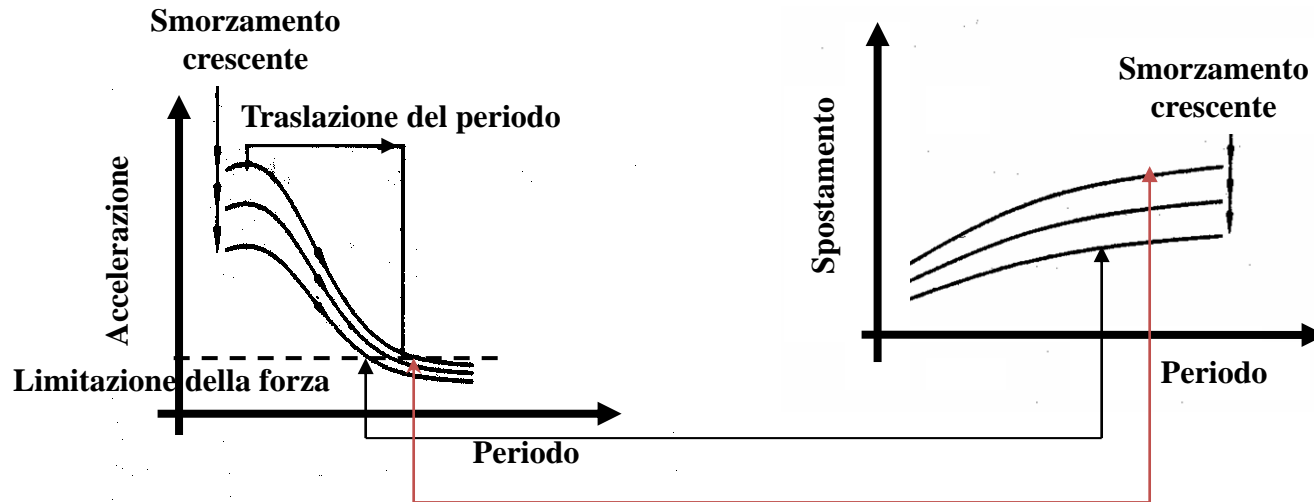
**Dissipazione supplementare di energia**

**Isolamento alla base**

Dispositivi dissipativi

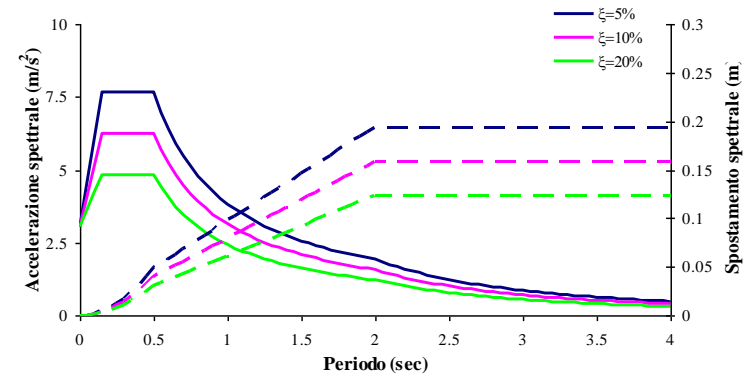


➤ **Tecnologie avanzate di protezione sismica delle strutture: strategie progettuali**



1) *Isolamento alla base e dissipazione di energia*

2) *Dissipazione supplementare dell'energia*





➤ **Tecnologie avanzate di protezione sismica delle strutture: controventi dissipativi**

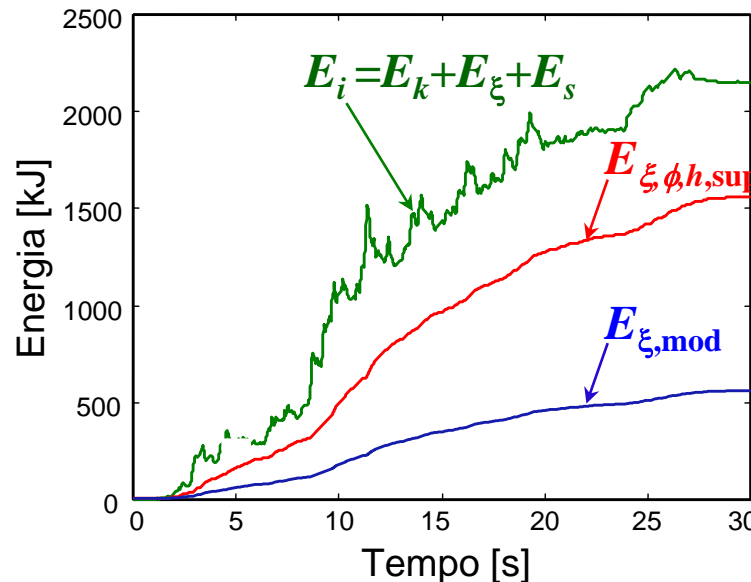
Approccio energetico

$$\int m\ddot{v}_t dv + \int c\dot{v}dv + \int f_s dv + \int f_{sup} dv = 0 \rightarrow E_k + E_\xi + E_s + E_{\xi,\phi,h,sup} = E_i$$

**Obiettivo progettuale per azioni con  $P_{VR}$  del 10%/ $V_R$ :**

**evitare il danno strutturale e non, attribuendo ad altri elementi la capacità dissipativa necessaria a bilanciare l'energia in ingresso.**

**Le membrature principali devono rimanere allo SLO/SLD**

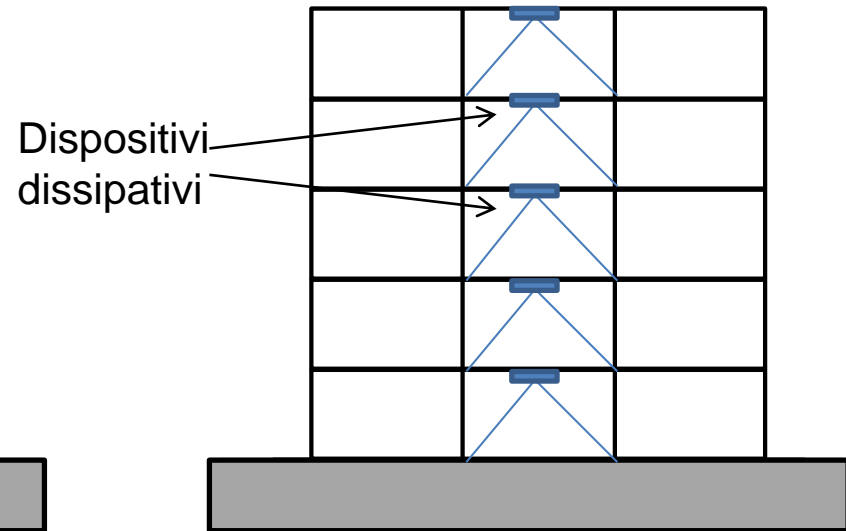
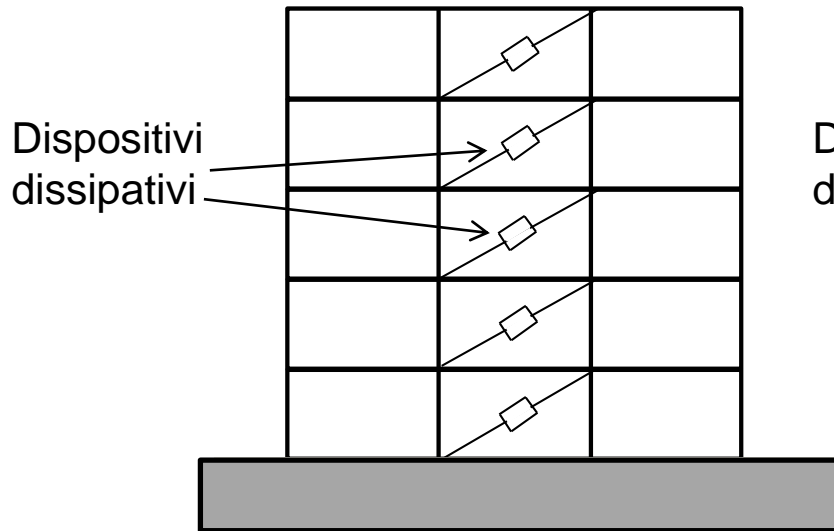


$$E_i^f = E_{\xi,mod}^f + E_{\xi,\phi,h,sup}^f$$

$$E_{\xi,mod}^f + E_{\xi,\phi,h,sup}^f = E_i^f$$

➤ *Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per dissipazione supplementare di energia: controventi dissipativi*

❖ **Dove si collocano rispetto alla pianta ed all'alzato?**



❖ **Di che tipo sono?**

$$m\ddot{v}(t) + c\dot{v}(t) + kv(t) + \underbrace{f_{ed}(t)}_{\downarrow} = -m\ddot{v}_g(t)$$

Contributo elastico-dissipativo

## ➤ Lo smorzamento: definizione e classificazioni

Per **smorzamento** s'intende generalmente la capacità di dissipare l'energia posseduta da corpi in movimento. Può essere definito “interno” se rappresenta una proprietà intrinseca del materiale, oppure “esterno” se generato da corpi a contatto oppure dall'interazione di un sistema con il mezzo circostante (di quest'ultimo tipo è lo smorzamento per irraggiamento).

**Isteresi meccanica di un materiale:** s'intende generalmente per isteresi meccanica di un materiale quel fenomeno che si manifesta con dissipazione di energia e che rende conto della dipendenza delle tensioni, generate per applicazione di azioni cicliche, non solo dalle deformazioni, bensì anche dai rapporti incrementali di tensione e deformazione.

In:

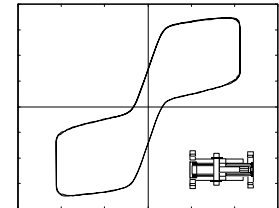
Terenzi, G. (1994). Effetti dissipativi nell'isolamento sismico, Tesi di Dottorato in Ingegneria delle Strutture, VII Ciclo, Università di Firenze;

classificazione ripresa da:

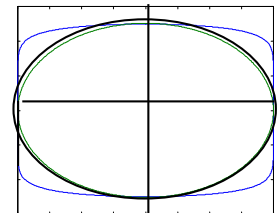
Lazan, B.J. (1968). Damping of materials and members in structural mechanics, Pergamon Eds, Oxford.

L'isteresi si caratterizza in 4 classi di comportamento:

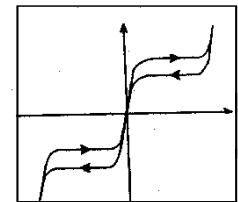
1. Comportamento **dipendente** dalla velocità di deformazione o di tensione, **con recupero di deformazione** al termine del caricamento (anelasticità);



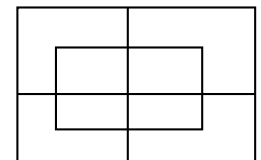
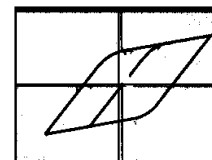
2. comportamento **dipendente** dalla velocità di deformazione o di tensione, **senza recupero di deformazione** al termine del caricamento (viscoelasticità);



3. comportamento **indipendente** dalla velocità di deformazione o di tensione, **con recupero di deformazione** al termine del caricamento;



4. comportamento **indipendente** dalla velocità di deformazione o di tensione, **senza recupero di deformazione** al termine del caricamento



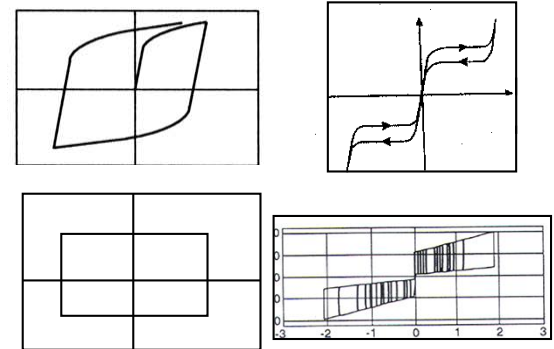
➤ *Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per dissipazione supplementare di energia: controventi dissipativi*

❖ **Di che tipo sono?**

Soong, T.T., and Dargush, G. F. (1997). *Passive energy dissipation systems in structural engineering*, J. Wiley & Sons Eds., New York

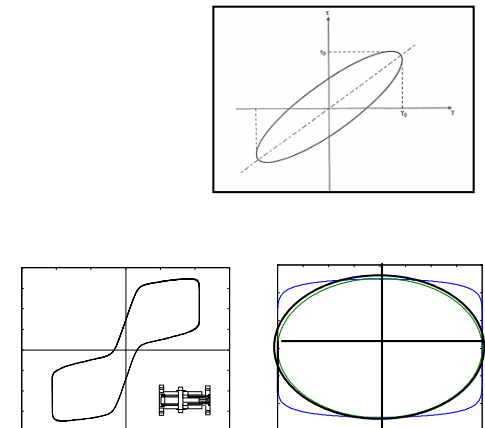
**Comportamento dipendente dallo spostamento**  
*(rate independent)*

1. **Metallic dampers (Dispositivi metallici)**
2. **Friction dampers (Dispositivi ad attrito)**



**Comportamento dipendente dalla velocità**  
*(rate dependent)*

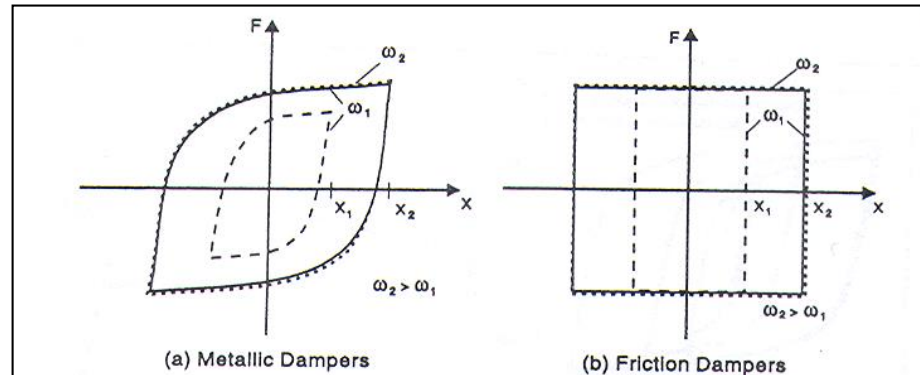
3. **Viscoelastic dampers (Dispositivi visco-elastici)**
4. **Viscous fluid dampers (Dispositivi fluido-viscosi)**



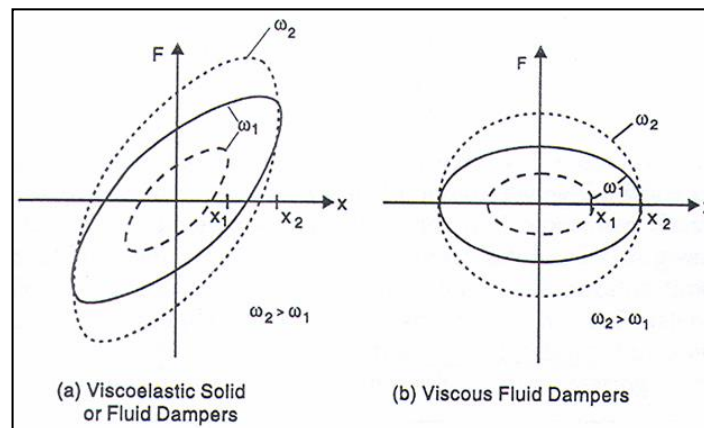
## □ Dissipazione supplementare dell'energia

### Dispositivi

- **Dispositivi “rate independent”** (la risposta rimane pressoché invariata per differenti frequenze di eccitazione)



- **Dispositivi “rate dependent”** (la risposta cambia per differenti frequenze di eccitazione dell'azione)



# Criteri di valutazione dello smorzamento

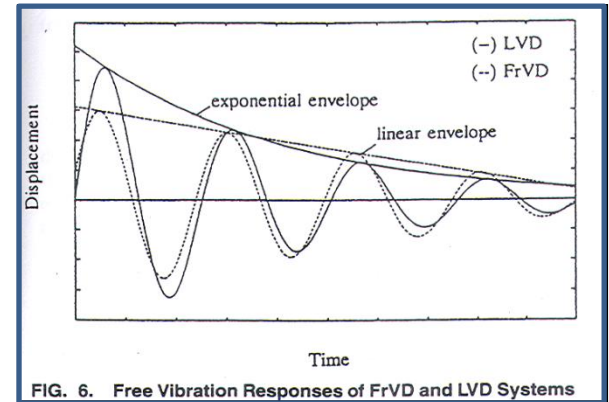
Terenzi, G. (1999). Dynamics of SDOF systems with nonlinear viscous damping, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 125(8), 956-963.

## 1. “Decremento logaritmico” $\delta$ inteso come rapporto fra le ampiezze di cicli di risposta successivi:

$W_n$  = ampiezza dell'n-esimo ciclo;

$W_{n+N}$  = ampiezza dell'(n+N)-esimo ciclo.

$$\delta = \frac{1}{N} \ln \frac{W_n}{W_{n+N}}$$

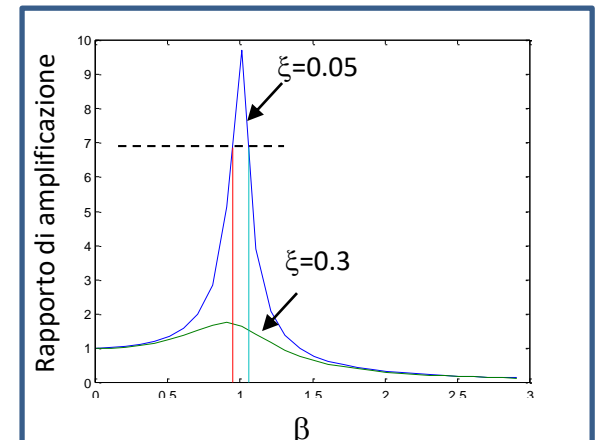


## 2. “Fattore di qualità inverso” $Q^{-1}$ :

$\omega_0$  = frequenza circolare di risonanza;

$\omega_1, \omega_2$  = frequenze simmetriche rispetto a quella di risonanza per cui l'ampiezza della risposta strutturale risulta uguale a quella di risonanza moltiplicata per un coefficiente pari ad  $1/\sqrt{2}$ .

$$Q^{-1} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0}$$



## 3. “Coefficiente di smorzamento viscoso” $\xi$ :

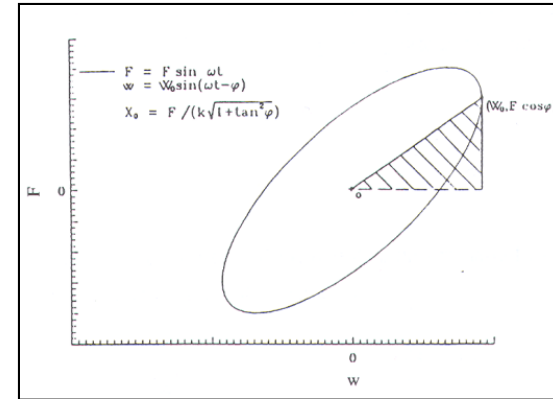
$$\xi = \frac{C}{2\sqrt{km}}$$

#### 4. “Loss Factor” $\eta$ :

$E_D$  = Energia dissipata;

$E_e$  = Energia di deformazione elastica.

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



#### 5. Rapporto fra i moduli $E'$ ed $E''$ :

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{E''}{E'}$$

#### 6. $\operatorname{tg} \varepsilon$ : tangente dell'angolo di fase che si stabilisce tra forzante e risposta

**La seguente uguaglianza vale solo per piccole entità dello smorzamento, quindi mai per applicazioni di dissipazione supplementare di energia**

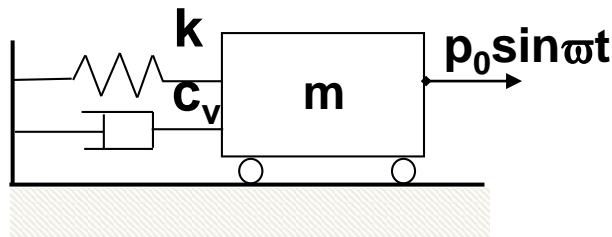
$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{E''}{E'} = \eta = Q^{-1} = \frac{\delta}{\pi} = 2\xi \longrightarrow$$



➤ **Caso di sistema con caratteristiche di viscosità lineare**

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

**Sistema ad un grado di libertà**



$$\eta = \frac{E_d}{2\pi E_e} = \frac{\pi c_v \varpi \left(\frac{p_0}{k}\right)^2 D^2}{2\pi \frac{1}{2} k \left(\frac{p_0}{k}\right)^2 D^2} = \frac{c_v \varpi}{k}$$

$$2\xi = \frac{c_v}{\sqrt{km}} = \frac{c_v \omega_1}{k}$$

$$2\xi = \frac{\eta \omega_1}{\varpi} = \frac{\eta}{\beta}$$

**L'uguaglianza è verificata solo se  $\varpi = \omega_1$**

## ▪ Criteri di valutazione dello smorzamento

### NTC 2008 - § 7.10 Costruzioni e ponti con isolamento e/o dissipazione

.....

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.

Assunzione di  
normativa per  
lo smorzamento  
equivalente

$$tg \varepsilon = \frac{E''}{E'} = \eta = Q^{-1} = \frac{\delta}{\pi} = 2\xi$$

$$\xi_{esi} = \frac{W_d}{2\pi Fd} = \frac{E_D}{4\pi E_e} = \frac{\eta}{2}$$

### Circolare 617 - § C7.10

.... La dissipazione di energia, dovuta agli isolatori e/o ad eventuali dispositivi ausiliari determina sempre una riduzione degli spostamenti nel sistema di isolamento.

➤ **Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per dissipazione supplementare di energia: controventi dissipativi**

Importanza della definizione del termine

$$E_{\xi, \phi, h, \text{sup}}$$

e della sua correlazione con la componente modale

$$E_{\xi}$$

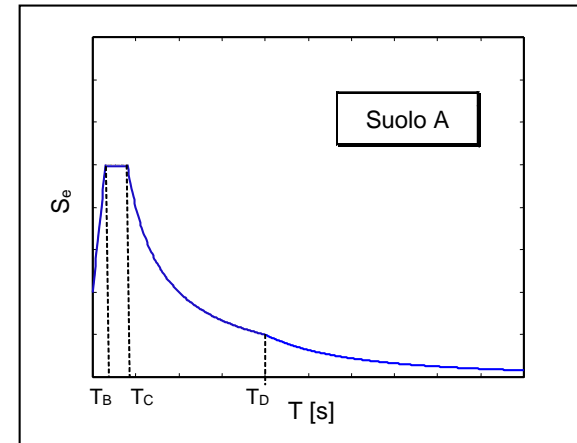
**NTC2008 - §3.2.3.2 Spettro di risposta elastico in accelerazione**

«.....smorzamento convenzionale  $\xi$  del 5%»

.....

$$0 \leq T < T_B \quad S_e(T) = a_g S \eta F_0 \left[ \frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta F_0} \left( 1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

.....  $\eta$  è il fattore che altera lo spettro elastico per coefficienti di smorzamento viscosi convenzionali  $\xi$  diversi dal 5%



$$\eta = \sqrt{[10/(5 + \xi)]} \leq 0,55$$

$$\xi \leq 28\%$$

➤ **Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per dissipazione supplementare di energia: controventi dissipativi**

Se  $\xi < 28\%$ , vale quanto segue:

$$x_p(t) = -\frac{1}{\omega_{1d}} \int_0^t e^{-\xi\omega_1(t-\tau)} \sin \omega_{1d}(t-\tau) a_g(\tau) d\tau$$

$$S_D = \max |x_p(t)|$$

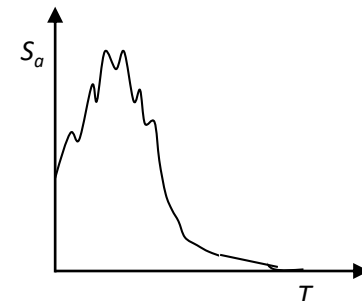
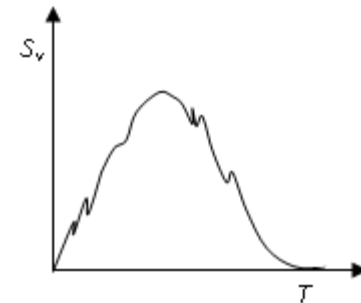
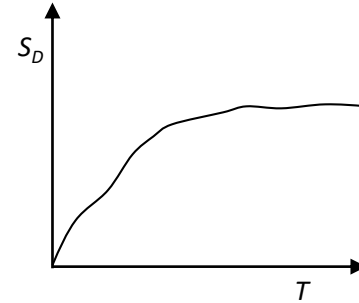
$$v_p(t) = -\int_0^t e^{-\xi\omega_1(t-\tau)} \cos \omega_{1d}(t-\tau) a_g(\tau) d\tau - \xi\omega_1 x_p(t)$$

*Pseudovelocità:*  $S_V = \max |v_p(t)| \cong \omega S_D$

$$a_p(t) = -a_g(t) - 2\xi\omega_1 v_p(t) - \omega_1^2 x_p(t)$$

$$a_t(t) = -2\xi\omega_1 v_p(t) - \omega_1^2 x_p(t)$$

*Pseudo-accelerazione:*  $S_A = \max |a_t(t)| \cong \omega^2 S_D$

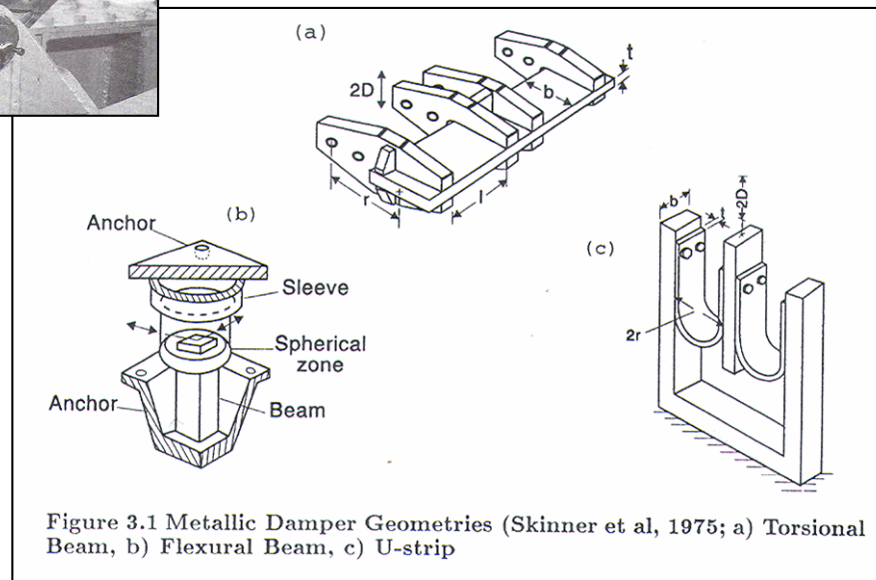
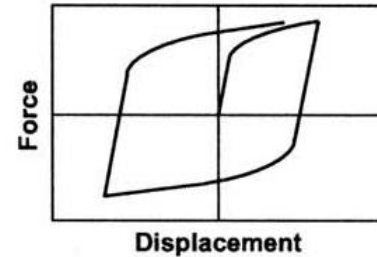
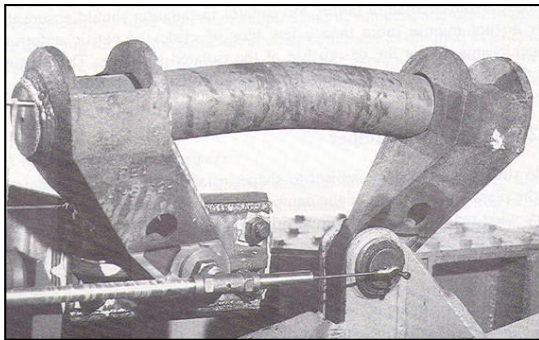


$$mS_A = m\omega^2 S_D = m(k/m)S_D = kS_D$$

## □ Dissipazione supplementare dell'energia

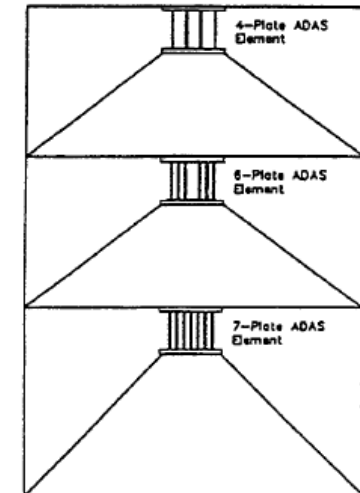
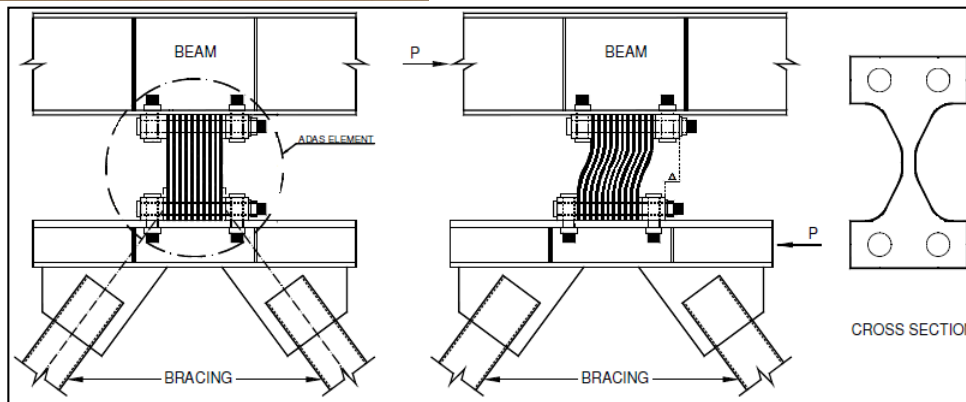
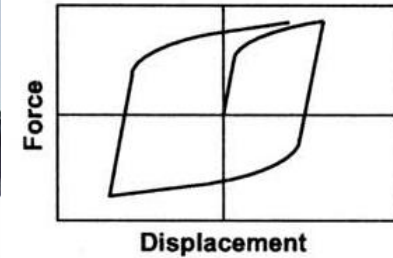
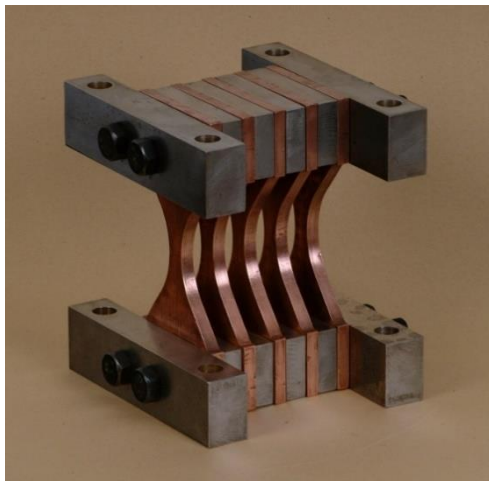
### Dispositivi

#### 1. Dispositivi metallici



## ❑ Dissipazione supplementare dell'energia

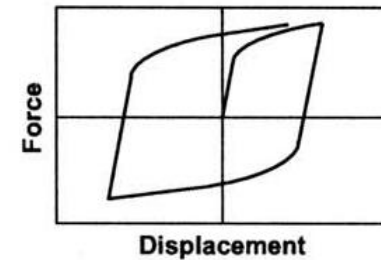
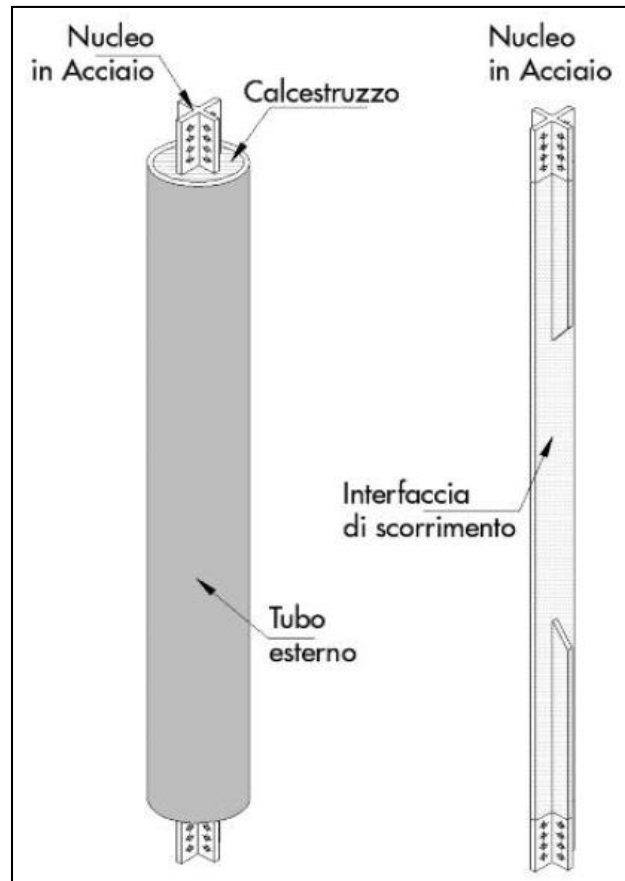
### 1. Dispositivi metallici - "ADAS"



## □ Dissipazione supplementare dell'energia

### 1. Dispositivi metallici

#### Controventi ad instabilità impedita

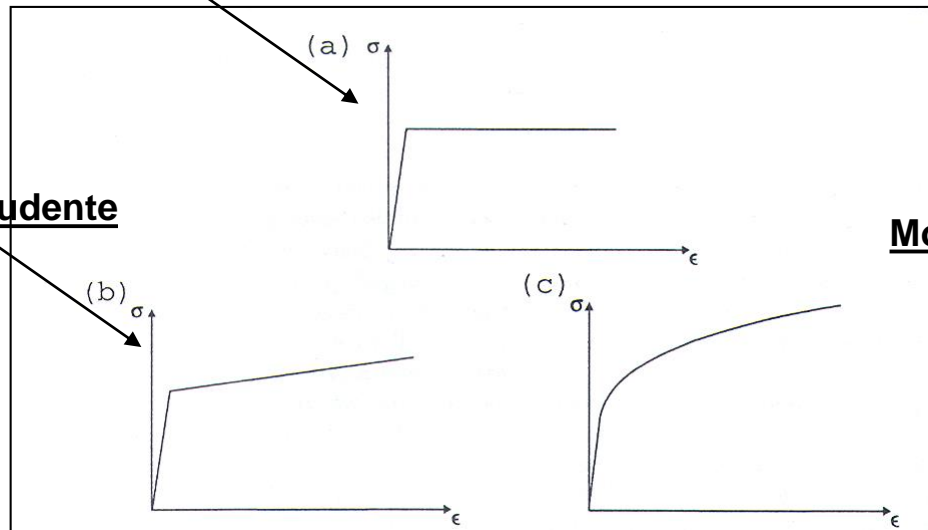


*Università delle Marche – Ancona*



# 1. Dispositivi metallici

## Elastico perfettamente plastico

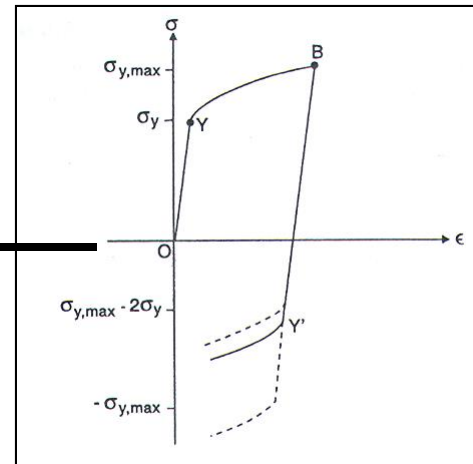


## Elasto-plastico incrudente

## Modello di Ramberg-Osgood

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + k \left( \frac{\sigma}{E} \right)^n$$

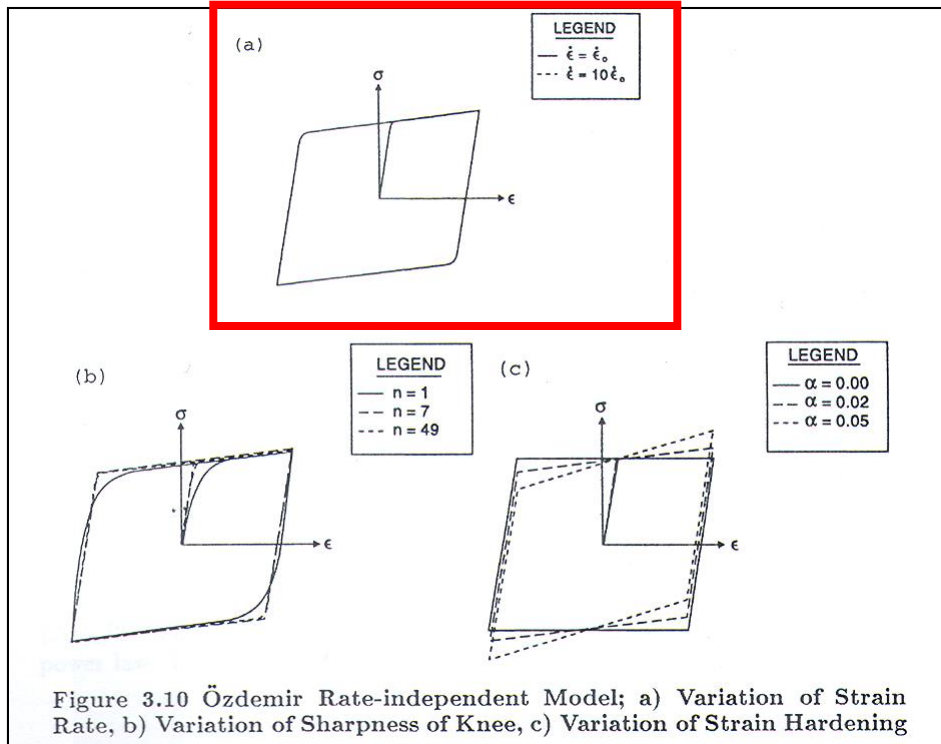
**Modello delle due superfici**  
(Krieg 1975 – Dafalias e Popov 1975): tiene conto dell'effetto Bauschinger e consente la progressiva transizione dalla fase elastica a quella elasto-plastica.





# 1. Dispositivi metallici

## Modello di Özdemir



Soong, T.T., and Dargush, G. F. (1997). *Passive energy dissipation systems in structural engineering*, J. Wiley & Sons Eds., New York

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{1}{\tau} \left( \frac{\sigma_d}{E} \right) \left( \frac{\sigma - \sigma_b}{\sigma_d} \right)^n$$

$$\dot{\sigma}_b = \alpha \frac{\sigma_d}{\tau} \left( \frac{\sigma - \sigma_b}{\sigma_d} \right)^n$$

$\tau$  = tempo di rilassamento;

$\sigma_b$  = tensione massima raggiunta in fase plastica durante la precedente storia di carico;

$n$  = esponente intero;

$\sigma_d$  = tensione massima relativa alla fase lineare.

$$\dot{F} = k_0 \dot{x} - k_0 |\dot{x}| \left( \frac{F - B}{F_0} \right)^n$$

$$\dot{B} = \alpha k_0 |\dot{x}| \left( \frac{F - B}{F_0} \right)^n$$

Dall'integrazione nel tempo delle due precedenti equazioni si ottiene la risposta del sistema.

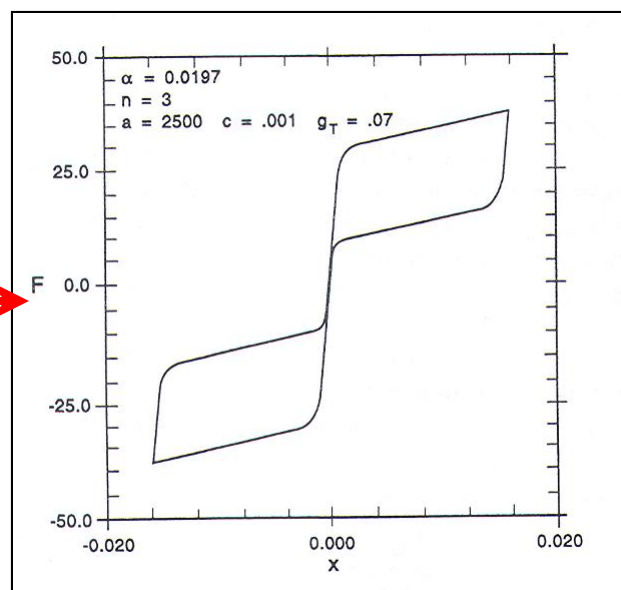
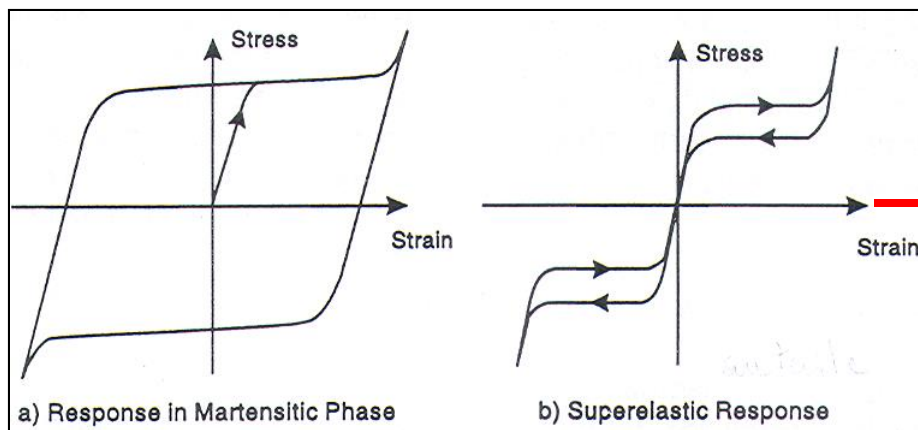
# 1. Dispositivi metallici

- ✓ SMA – Dispositivi in leghe a memoria di forma (“Rate independent” con recupero di deformazione)

Graesser, E.J., and Cozzarelli, F.A. (1989). Multidimensional models of hysteretic material behaviour for vibration analysis of shape memory energy absorbing devices, Technical Report NCEER-89-0018, National Center for Earthquake Engineering, Buffalo, N.Y.

$$\dot{F} = k_0 \left| \dot{x} \right| \left( \frac{F - B}{F_0} \right)^n$$

$$B = \alpha k_0 [x_{in} + g_T |x|^c H(-x\dot{x}) \operatorname{erf}(ax)]$$



➤ **Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per dissipazione supplementare di energia: controventi dissipativi**

## Controventi includenti dispositivi SMA

Song, G., Ma, N., Li, H.-N. (2006). Applications of shape memory alloys in civil structures, *Engineering Structures*, Vol. 28, pp. 1266-1274.

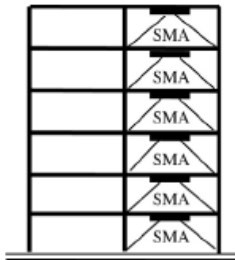
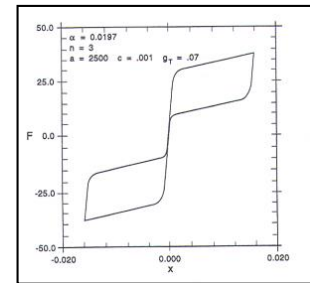


Fig. 8. Schematic of the setup of the SMA brace reinforced frame structure [3].

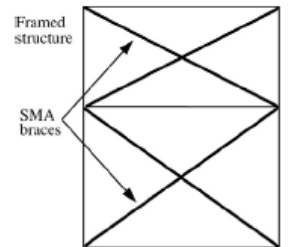


Fig. 9. Schematic of the SMA braces for a two-story steel frame [15].

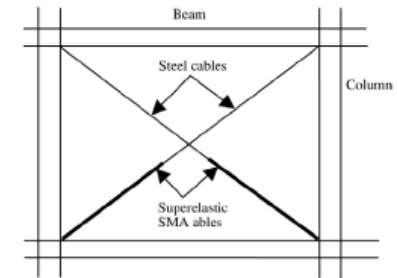


Fig. 10. Schematic of the SMA braces for a frame structure [36].

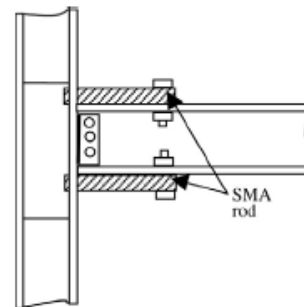


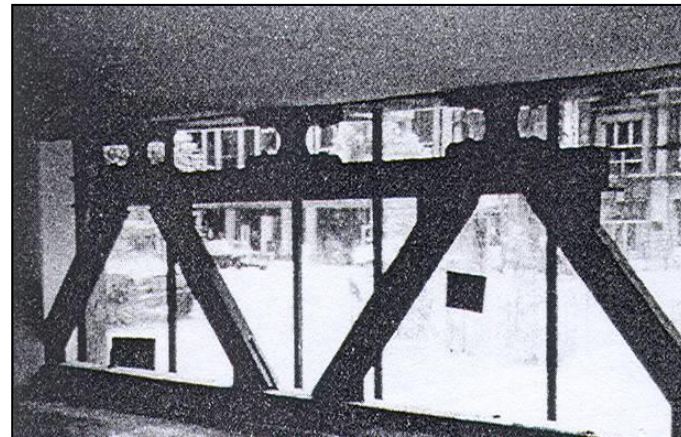
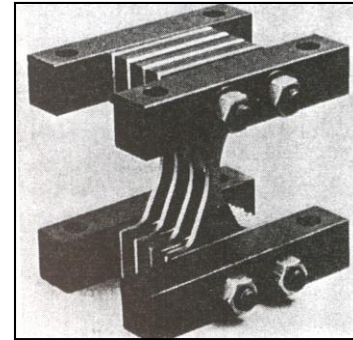
Fig. 14. Schematic of SMA connector for steel structures.

## □ Dissipazione supplementare dell'energia

### Dispositivi

#### 1. Dispositivi metallici

*Izazaga #38-40 Building, Mexico City*



Martinez-Romero, E. (1993). *Experiences on the use of supplemental energy dissipators on building structures*, Earthquake Spectra, (9)3, 581-624.

# Dispositivi

## 1. Dispositivi metallici

*Dispositivi elasto-plastici "a clessidra" inseriti in controventi dissipativi*



*Adeguamento sismico della scuola "D. Viola" di Potenza*

*Adeguamento sismico della scuola "G. Leopardi" di Potenza*



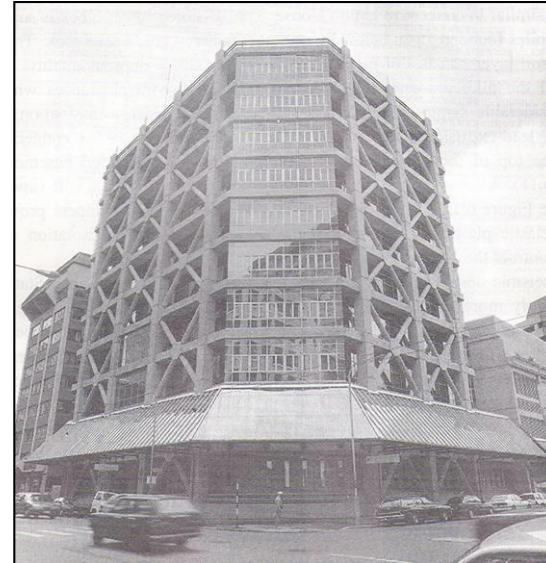
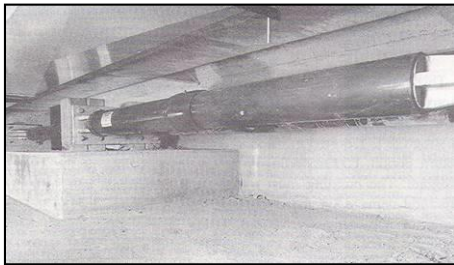
## □ Dissipazione supplementare dell'energia

### Dispositivi

#### 1. Dispositivi metallici

##### Wellington Central Police Station

Sistema di dissipazione alla base tramite dispositivi ad estrusione di piombo ed irrigidimento della sovrastruttura con diagonali in calcestruzzo



Skinner, R.I., Robinson, W.H., Mc Verry, G.H. (1993). *An introduction to seismic isolation*, J. Wiley & Sons Eds.

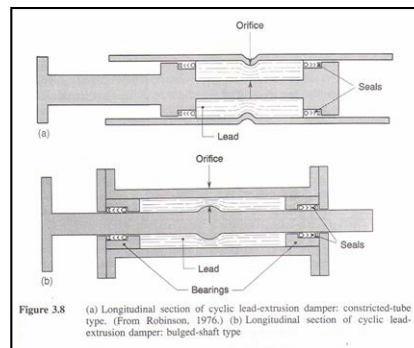
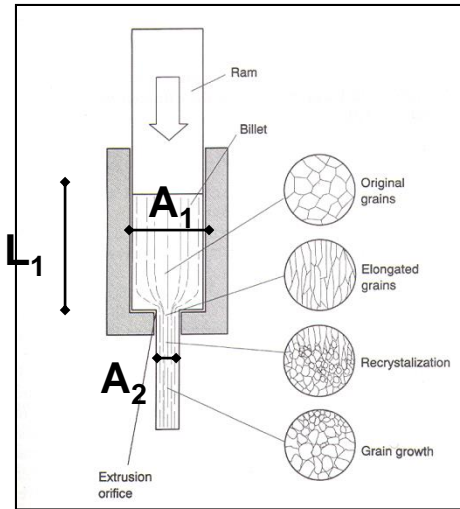
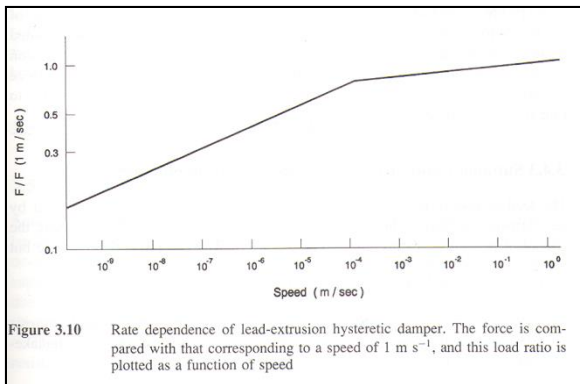


Figure 3.8 (a) Longitudinal section of cyclic lead-extrusion damper: constricted-tube type. (From Robinson, 1976.) (b) Longitudinal section of cyclic lead-extrusion damper: bulged-shaft type



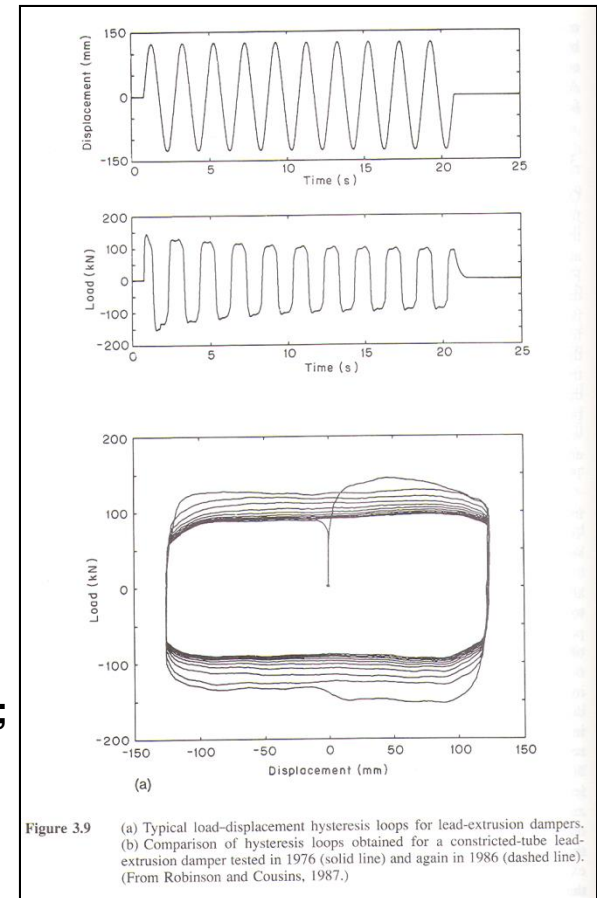
$$W = A_1 L_1 \sigma_y \ln \left[ \frac{A_1}{A_2} \right]$$

**W = lavoro relativo al processo di estrusione fra le due sezioni  $A_1$  ed  $A_2$ ;**

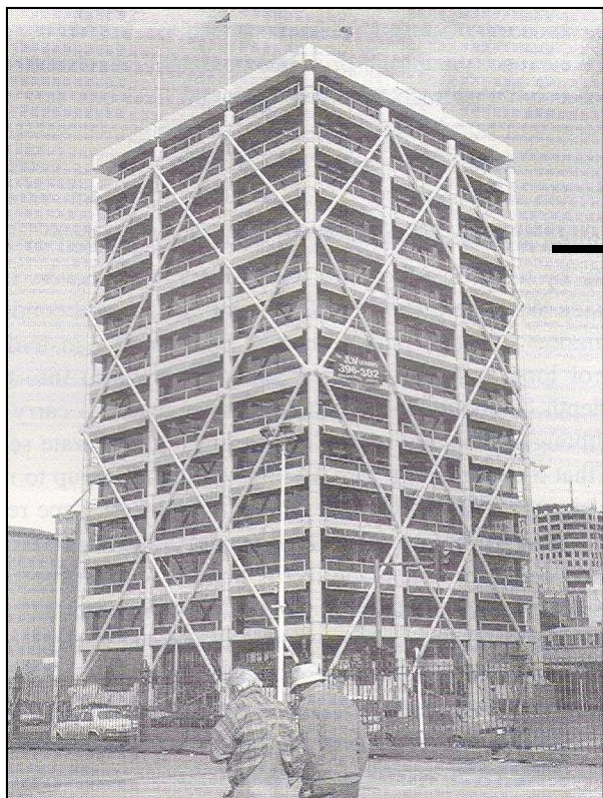


$$p = av^b$$

**p = pressione di estrusione;**  
**v = velocità di estrusione;**  
**b = 0.12 per piombo a 17°C.**

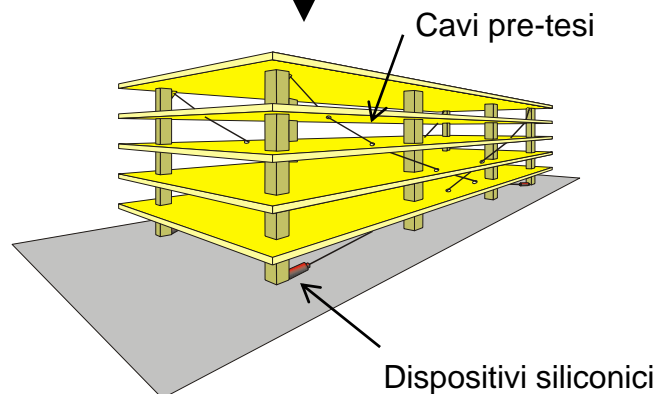


Esempio applicativo di controventi dissipativi coinvolgenti più piani



Union House – Auckland City

Il sistema a cavi dissipativi: caso limite di controllo della deformata dell'edificio tramite un sistema coinvolgente la maggior parte degli impalcati dell'edificio.

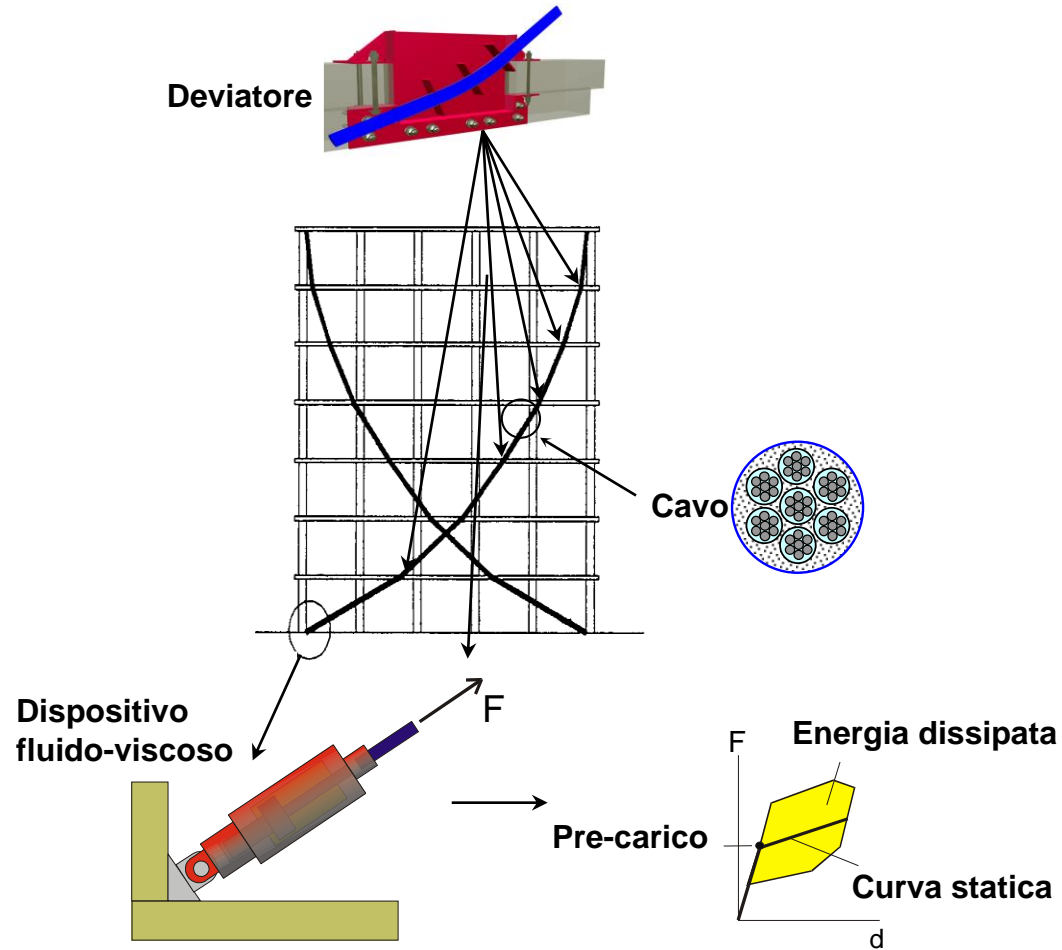




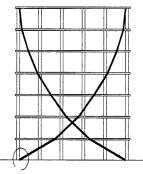
# Sistemi operanti sul controllo della deformata globale: cavi smorzanti

S. Sorace, G. Terenzi (2012a).  
The damped cable system for  
seismic protection of frame  
structures - Part I: General  
concepts, testing and  
modeling. EARTHQUAKE  
ENGINEERING &  
STRUCTURAL DYNAMICS, vol.  
41(5), pp. 915-928.

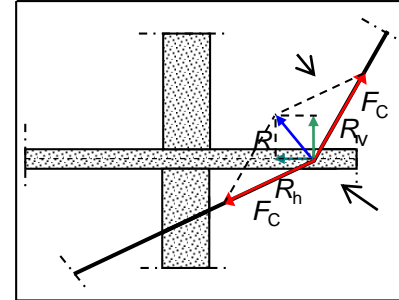
S. Sorace, G. Terenzi (2012b).  
The damped cable system for  
seismic protection of frame  
structures - Part II: Design and  
application. EARTHQUAKE  
ENGINEERING &  
STRUCTURAL DYNAMICS, vol.  
41(5), pp. 929-947.



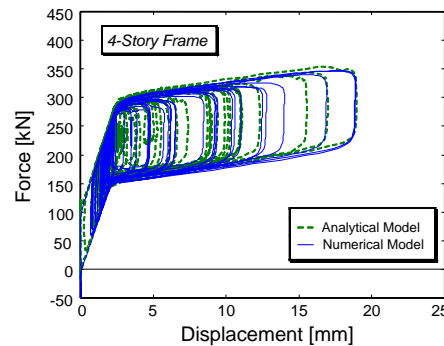
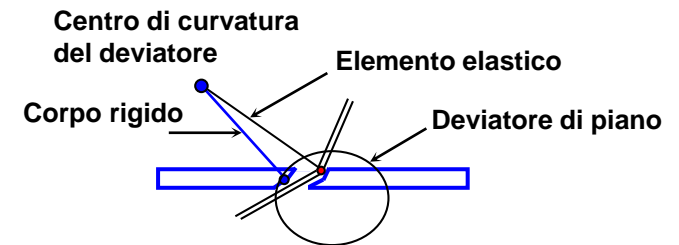
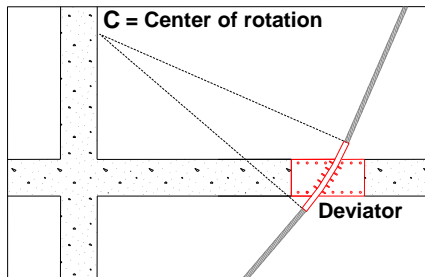
# Cavi smorzanti: modello analitico e computazionale



Forze agenti a livello di ogni deviatore



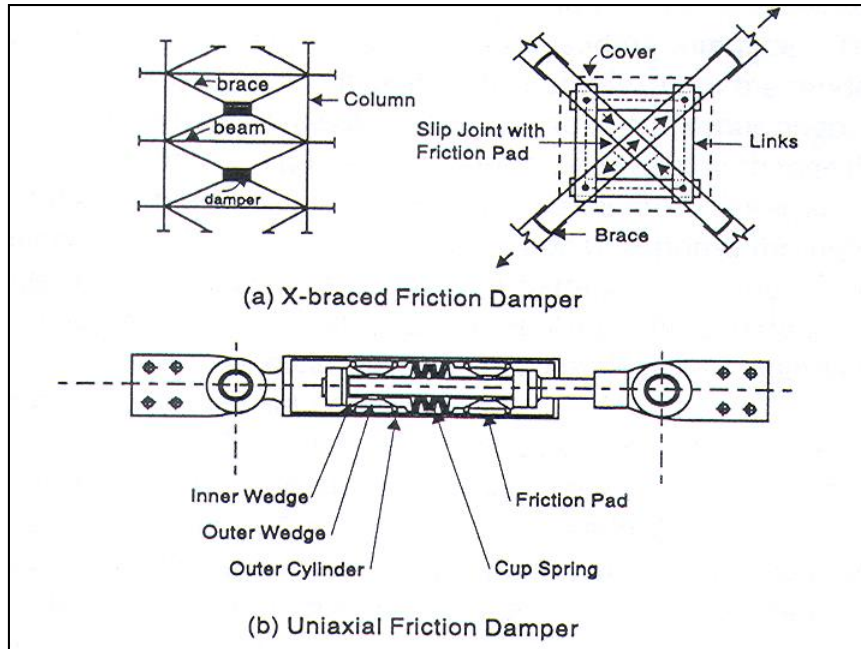
Modello computazionale



## □ Dissipazione supplementare dell'energia

### Dispositivi

#### 2. Dispositivi ad attrito

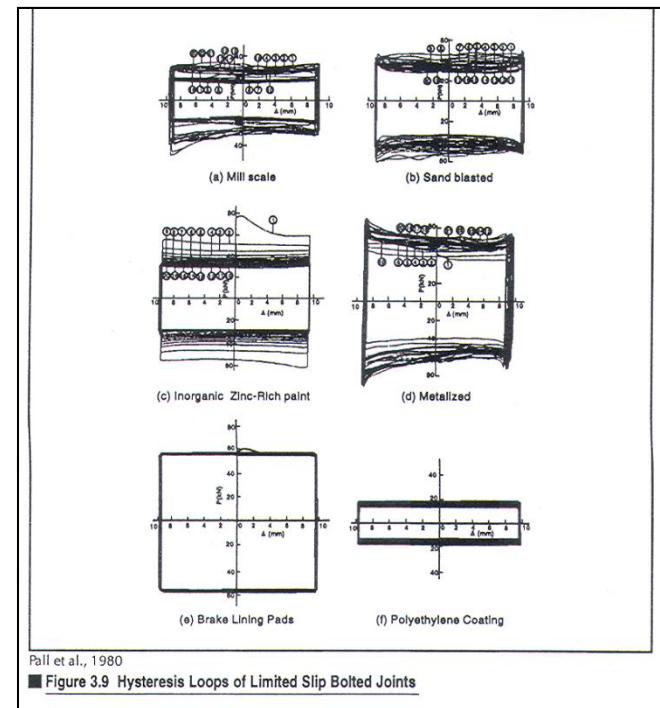


- Pall, A.S. and Marsch, C. (1982). Response of friction damped braced frames, *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 108, No. ST6, 1313-1323.
- Aiken, I.D. and Kelly, J. (1990). Earthquake simulator testing and analytical studies of two energy-absorbing systems for multistory structures, *Technical report UCB/EERC-90/03, University of California, Berkeley, CA.*

$$F_t = \mu F_n$$

$$\mu_s > \mu_c$$

$\mu_s$  = coefficiente di attrito statico;  
 $\mu_c$  = coefficiente di attrito dinamico.

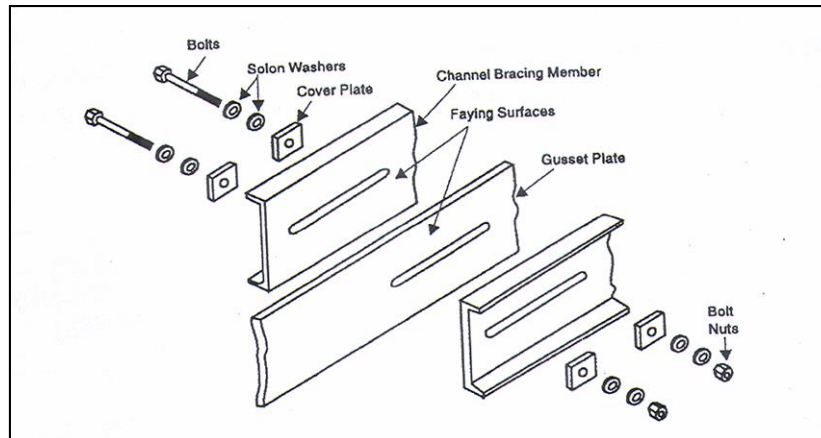


## □ Dissipazione supplementare dell'energia

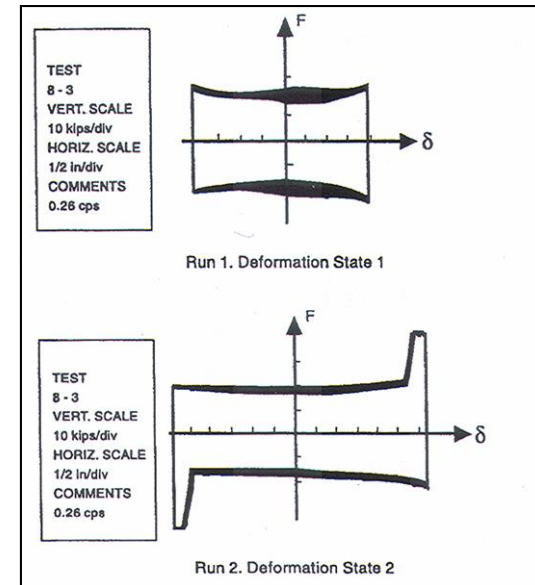
### Dispositivi

#### 2. Dispositivi ad attrito

##### “Slotted bolted connection”



FitzGerald, T.F., Anagnos, T., Goodson, M., and Zsutty, T. (1989). *Slotted bolted connections in aseismic design for concentrically braced connections*, *Earthquake Spectra*, 5(2), 383-391.

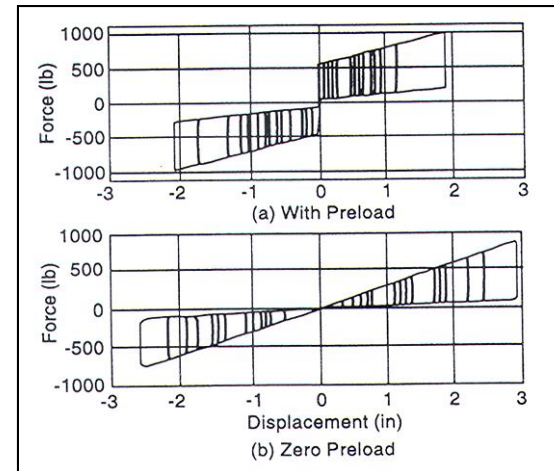
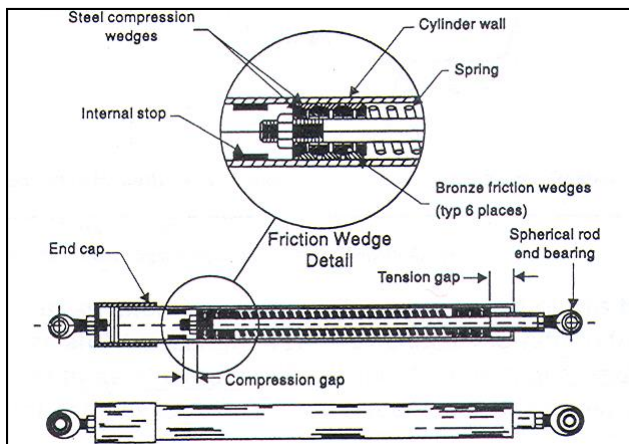


## □ Dissipazione supplementare dell'energia

### Dispositivi

#### 2. Dispositivi ad attrito

##### “Spring friction damper”



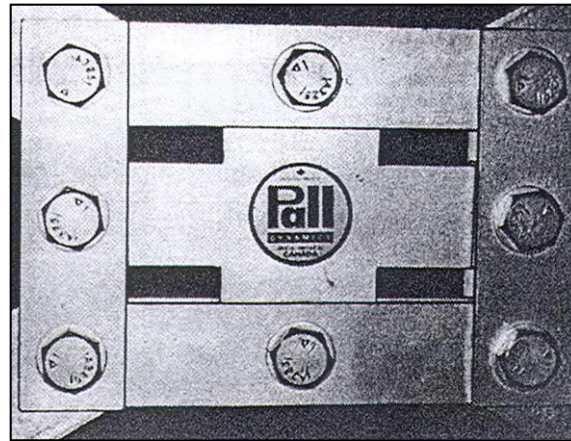
Nims, D.K., Richter, P.J., and Bachman, R.E. (1993). *The use of the energy dissipating restraint for seismic hazard mitigation*, *Earthquake Spectra*, 9(3), 467-489.

## □ Dissipazione supplementare dell'energia

### Dispositivi

#### 2. Dispositivi ad attrito

##### *Mc Connel library at Concordia University in Montreal*



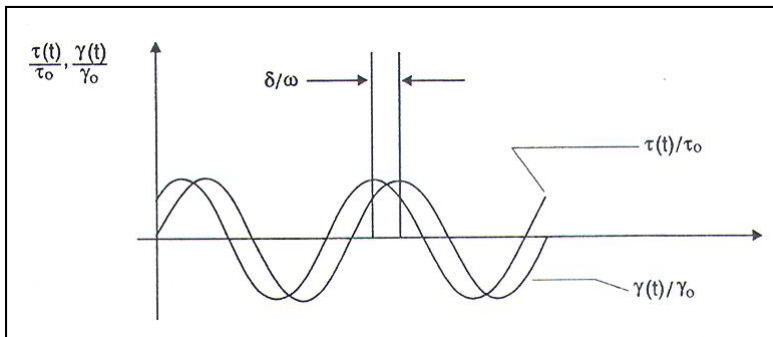
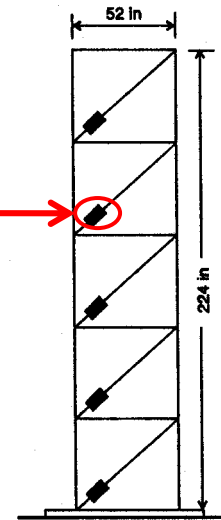
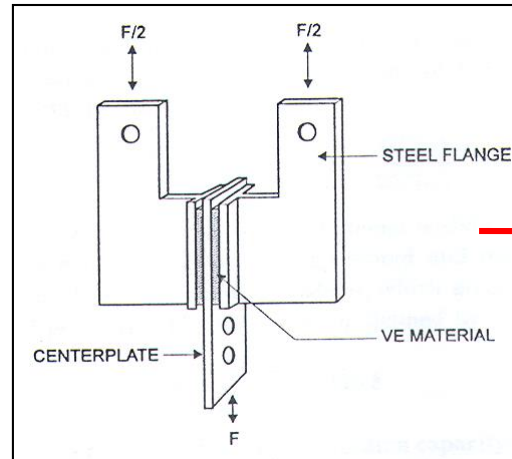
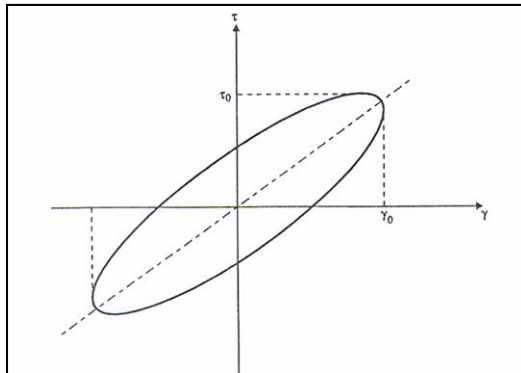
**Pall, A.S. and Pall, R. (1993). *Friction-dampers used for seismic control of new and existing building in Canada*, Proceedings of the ATC-17-1 Seminar on Isolation, Energy dissipation and Active Control, San Francisco, CA, Vol. 2, pp. 675-686.**

## □ Dissipazione supplementare dell'energia

### Dispositivi

#### 3. Dispositivi visco-elastici

Zhang, R.H., Soong, T.T. and Mahmoodi, P. (1989). *Seismic response of steel frame structures with added viscoelastic dampers*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 18, 389-396.



$$\tau(t) = \gamma_0 [G'(\omega) \sin \omega t + G''(\omega) \cos \omega t]$$

$$G'(\omega) = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \cos \delta; \quad G''(\omega) = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \sin \delta$$

$$E_H = \int_0^{2\pi/\omega} \gamma_0^2 \omega \cos \omega t [G'(\omega) \sin \omega t + G''(\omega) \cos \omega t] dt = \pi \gamma_0^2 G''(\omega)$$

I moduli  $G'$  e  $G''$  sono generalmente funzione della frequenza di eccitazione ( $\omega$ ), della temperatura ambiente (T), della deformazione a taglio ( $\gamma$ ), e della temperatura del materiale ( $\theta$ ).

Zhang, R.H., Soong, T.T. and Mahmoodi, P. (1989). Seismic response of steel frame structures with added viscoelastic dampers, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 18, 389-396.

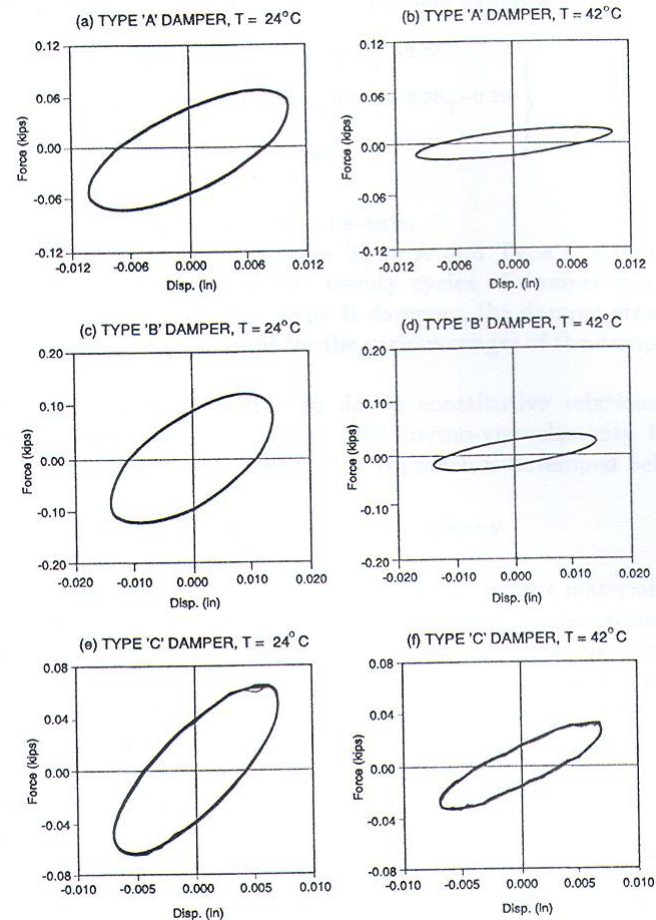
Table 5.1 Viscoelastic Damper Dimensions

Type	Area(in <sup>2</sup> )	Thickness (in)	Volume (in <sup>3</sup> )
A	1.0 × 1.5 = 1.50	0.20	0.30
B	2.0 × 1.5 = 3.00	0.30	0.90
C	6.0 × 3.0 = 18.0	0.15	2.70

## Dipendenza dalla temperatura esterna (T)

Table 5.2 VE Damper Properties at 3.5 Hz and 5% Strain

Damper Type	Temp. (°C)	$G'$ (psi)	$G''$ (psi)	$\eta$
A	21	402.8	436.7	1.08
	24	305.0	344.5	1.13
	28	228.4	275.1	1.20
	32	169.0	198.2	1.17
	36	120.7	130.7	1.08
	40	91.4	92.0	1.01
B	25	251.1	301.3	1.20
	30	187.8	223.5	1.19
	34	136.9	161.5	1.18
	38	110.9	122.0	1.10
	42	89.8	94.3	1.05
C	25	28.2	24.6	0.87
	30	23.1	18.1	0.78
	34	21.0	15.0	0.71
	38	17.6	11.6	0.65
	42	15.6	9.8	0.62





Zhang, R.H., Soong, T.T. and Mahmoodi, P. (1989). Seismic response of steel frame structures with added viscoelastic dampers, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 18, 389-396.

## Dipendenza dalla deformazione ( $\gamma$ )

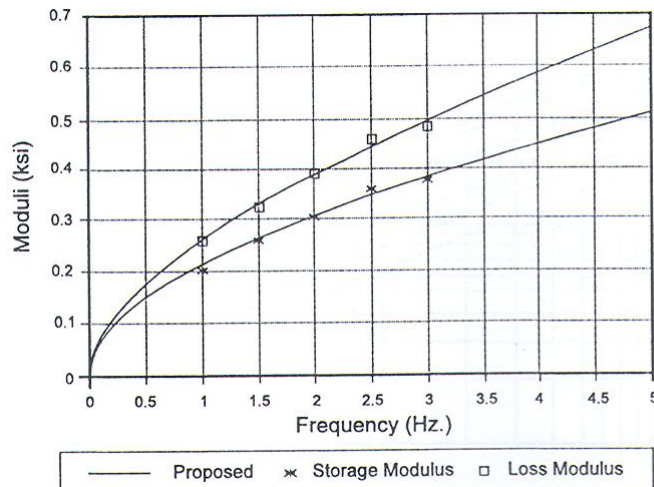
Soong, T.T., and Dargush, G. F. (1997). *Passive energy dissipation systems in structural engineering*, J. Wiley & Sons Eds., New York

Table 5.3 Typical Damper Properties

Temp. (°C)	Freq. (Hz)	Strain (%)	G' (psi)	G'' (psi)	$\eta$
24	1.0	5	142	170	1.20
24	1.0	20	139	167	1.20
24	3.0	5	272	324	1.19
24	3.0	20	256	306	1.20
36	1.0	5	59	67	1.13
36	1.0	20	58	65	1.12
36	3.0	5	108	119	1.10
36	3.0	20	103	112	1.09

$$\eta = \frac{G''(\omega)}{G'(\omega)}$$

## Dipendenza dei moduli dalla frequenza ( $\omega$ )



## Dipendenza dalla temperatura interna del materiale ( $\theta$ )

Dall'equazione di trasferimento del calore:

$$\rho c_v \frac{\partial \theta}{\partial t} \cong \kappa \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \tau \frac{\partial \gamma}{\partial t}$$

avendo posto:  $\rho$  = densità di massa;  $c_v$  = calore specifico;  $\kappa$  = coefficiente di conduttività termica;

$$\theta(t) = T + \frac{1}{\rho c_v} \int_0^t \tau(t) \dot{\gamma}(t) dt$$

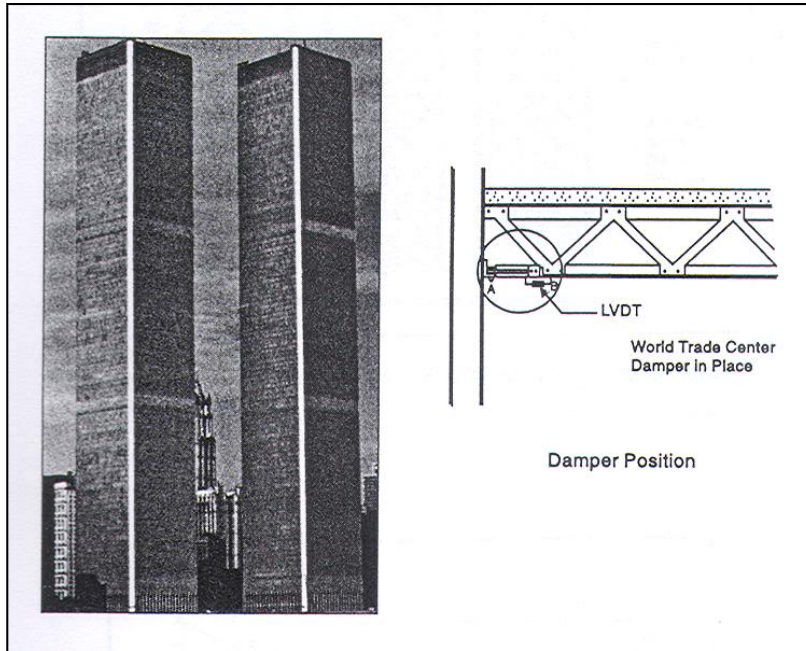
$G'_{T+\theta(t)}(\omega)$   
 $G''_{T+\theta(t)}(\omega)$

## □ Dissipazione supplementare dell'energia

### Dispositivi

#### 3. Dispositivi visco-elastici

##### *Twin Towers - World Trade Center, New York*



Mahmoodi P., Robertson, L.E., Yontar, M., Moy, C. and Feld, I. (1987). *Performance of viscoelastic dampers in World Trade Center Towers*, Dynamic of Structures, Structures Congress '87, Orlando, FL.

## □ Dissipazione supplementare dell'energia

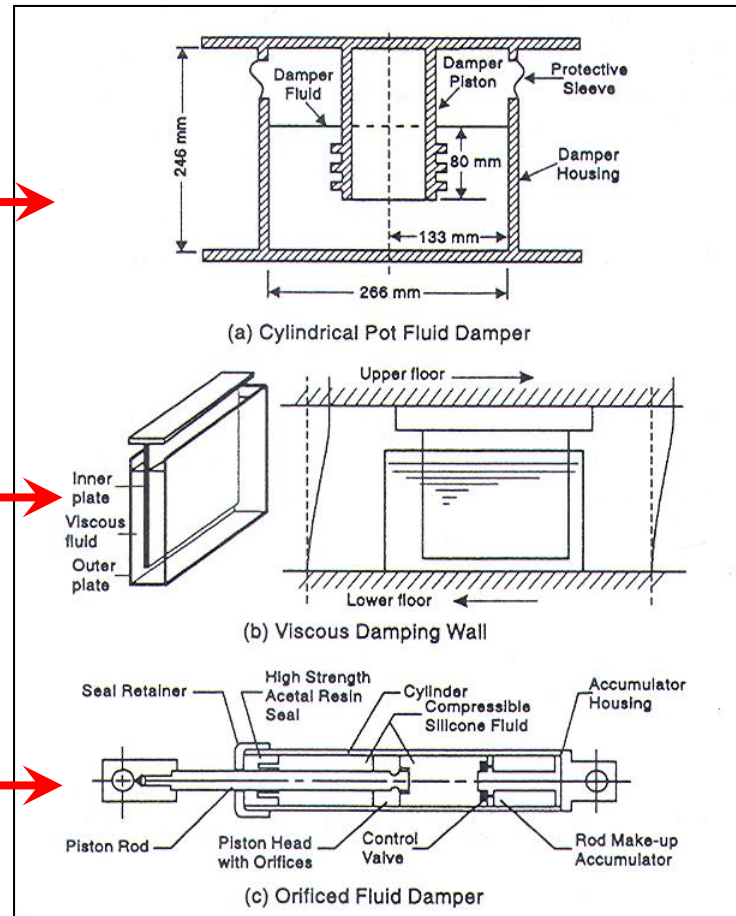
### Dispositivi

#### 4. Dispositivi fluido-viscosi

Makris, N. and Constantinou, M.C. (1991). *Fractional derivative Maxwell model for viscous dampers*, Journal of Structural Engineering ASCE, 117(9), 2708-2724.

Miyazaki, M. and Mitsusaka, Y. (1992). *Design of a building with 20% or greater damping*, Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, Spain, 4143-4148.

Constantinou, M.C., Symans, M.D., Tsopelas, P. and Taylor D.P. (1993). *Fluid viscous dampers in applications of seismic energy dissipation and seismic isolations*, Proceedings of ATC 17-1 on Seismic isolation, energy dissipation and active control, San Francisco CA, Vol. 2, 581-591.



- **Legge costitutiva conforme al modello reologico di Maxwell, proposta per l'interpretazione del comportamento meccanico di dispositivi fluido-viscosi a base di polibutano, con dipendenza dalla frequenza e dalla temperatura.**

Makris, N., Dargush, G.F. and Constantinou, M.C. (1995). Dynamic analysis of viscoelastic fluid dampers, *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 121(10), 1114-1121.

$$\tau + [\lambda(T_0)]^\nu \frac{d^\nu \tau}{dt^\nu} = \mu(T_0) \frac{d\gamma}{dt}$$

$\lambda, \nu, \mu =$  grandezze non necessariamente reali, caratteristiche del materiale.

Oldham, K.B. and Spanier, J. (1994). *The fractional calculus*, Academic Press, New York.

$$\frac{d^\nu \tau}{dt^\nu}$$

**Derivata di ordine frazionario  $\nu$**

**Paradosso matematico definito da Leibnitz (lettera a De L'Hopital del 1695) – principio aristotelico di continuità (“natura non facit saltus”)**

**Riferimento concernente l'uso di derivate frazionarie per leggi di comportamento conformi al modello di Maxwell:**

Makris, N. (1992). *Theoretical and experimental investigation of viscous dampers in applications of seismic and vibration isolation*. PhD Thesis, State University of New York, Buffalo.

**Riferimenti concernenti l'uso di derivate frazionarie per leggi di comportamento conformi al modello di Kelvin:**

Koh, C.G. and Kelly, J.M. (1990). Application of fractional derivatives to seismic analysis of base isolated models. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 19, 229-241.

Gusella, V. and Terenzi, G. (1997). Fluid viscous device modelling by fractional derivatives, *Structural Engineering and Mechanics*, 5(2), 177-191.

- **Definizione di differintegrale di ordine  $q$  arbitrario secondo Grünwald e Post ( $q > 0$ , oppure  $q < 0$ ):**

$$\frac{d^q f}{d(x-a)^q} = \lim_{N \rightarrow \infty} \left\{ \frac{\left[ \frac{x-a}{N} \right]^n}{\Gamma(-q)} \sum_{j=0}^{N-1} \frac{\Gamma(j-q)}{\Gamma(j+1)} f \left( x - j \left[ \frac{x-a}{N} \right] \right) \right\}$$

$\Gamma$  = funzione Gamma di Eulero =

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} y^{x-1} e^{-y} dy \quad x > 0$$

**Definizione di derivata frazionaria secondo la formulazione di Riemann e Liouville ( $q > 0$ ) per  $a=0$  ed  $n=1$ :**

$$\frac{d^q f}{dx^q} = \frac{x^{-q} f(0)}{\Gamma(1-q)} + \frac{1}{\Gamma(1-q)} \int_0^x \left[ \frac{df(y)}{dy} \right] \frac{dy}{(x-y)^q}$$

**Algoritmo L1:**

$$\frac{d^q f}{dx^q} = \frac{x^{-q} N^q}{\Gamma(2-q)} \left\{ \frac{(1-q) f_N}{N^q} + \sum_{j=0}^{N-1} [f_j - f_{j+1}] [(j+1)^{1-q} - j^{1-q}] \right\}$$

## ➤ **Principali equazioni di stato rappresentative del comportamento dei materiali visco-elastici**

### ✓ **Modello lineare standard**

$$\sigma + \alpha \frac{d\sigma}{dt} = E\varepsilon + \beta E \frac{d\varepsilon}{dt}$$

### ✓ **Modello standard generalizzato**

$$\sigma + \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n \frac{d^n \sigma}{dt^n} = E\varepsilon + E \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n \frac{d^n \varepsilon}{dt^n}$$

- **Rispetto al modello precedente aggiunge derivate, di ordine intero superiore al primo, sia per le tensioni che per le deformazioni. Ciò porta ad aumentare consistentemente il numero di parametri da identificare al fine di definire la legge costitutiva del materiale.**

### ✓ **Modello alle derivate generalizzate**

$$\sigma + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \frac{d^{a_n} \sigma}{dt^{a_n}} = E\varepsilon + E \sum_{n=1}^{\infty} b_n \frac{d^{b_n} \varepsilon}{dt^{b_n}}$$

- **Ricorre a derivate di ordine non intero per definire la legge costitutiva del materiale. Una buona scelta dei parametri rende generalmente sufficienti al massimo due derivate.**

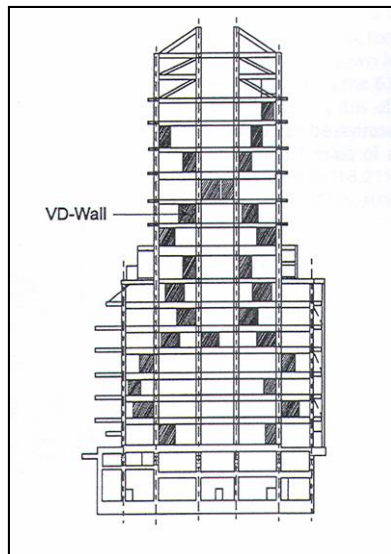
## □ Dissipazione supplementare dell'energia

### Dispositivi

#### 4. Dispositivi fluido-viscosi

**SUT-Building, Shizuka City, Japan**

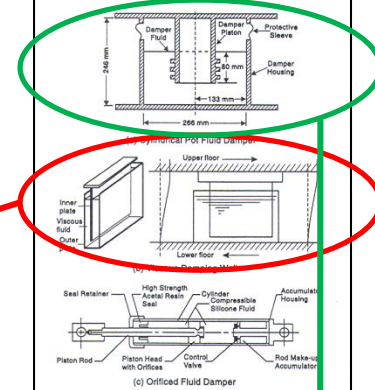
Uso di “viscous damping wall” per un edificio di nuova realizzazione



Miyazaki, M. and Mitsusaka, Y. (1992). *Design of a building with 20% or greater damping*, Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, Spain, 4143-4148.

**Woodland Hotel, Woodland, California (1927)**

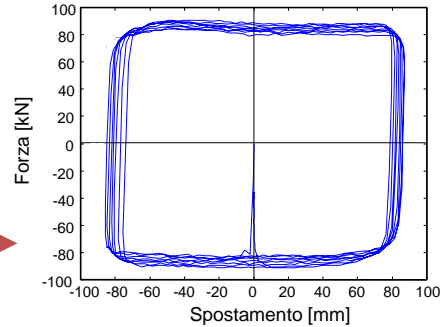
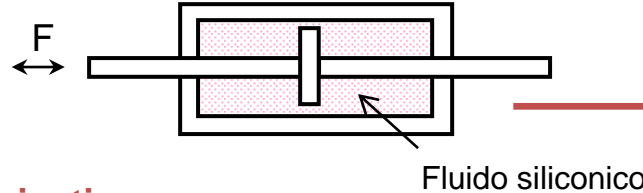
Uso dei dispositivi Taylor per un progetto di adeguamento sismico



## 4. Dispositivi fluido-viscosi (a matrice siliconica)

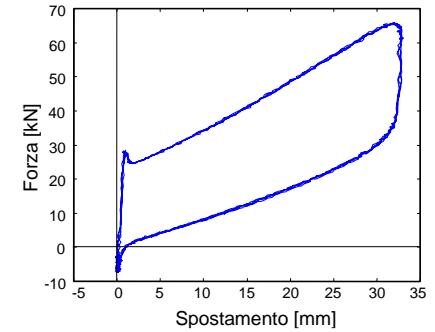
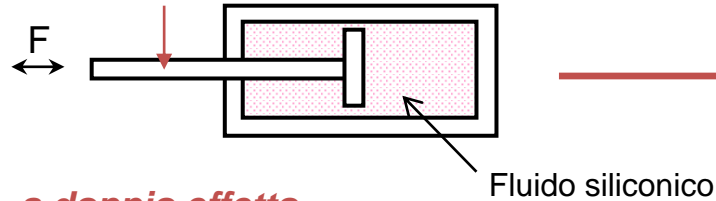
G. Terenzi: "Effetti dissipativi nell'isolamento sismico", *Tesi di Dottorato in Ingegneria delle Strutture*, VII Ciclo, Università di Firenze, 1994

✓ Dissipatore puro

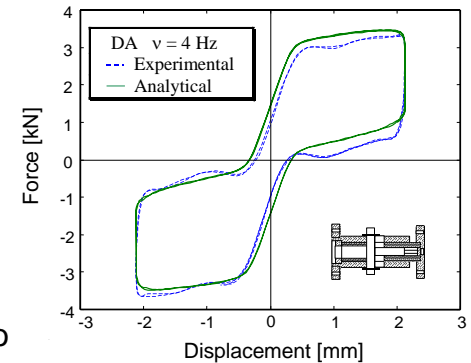
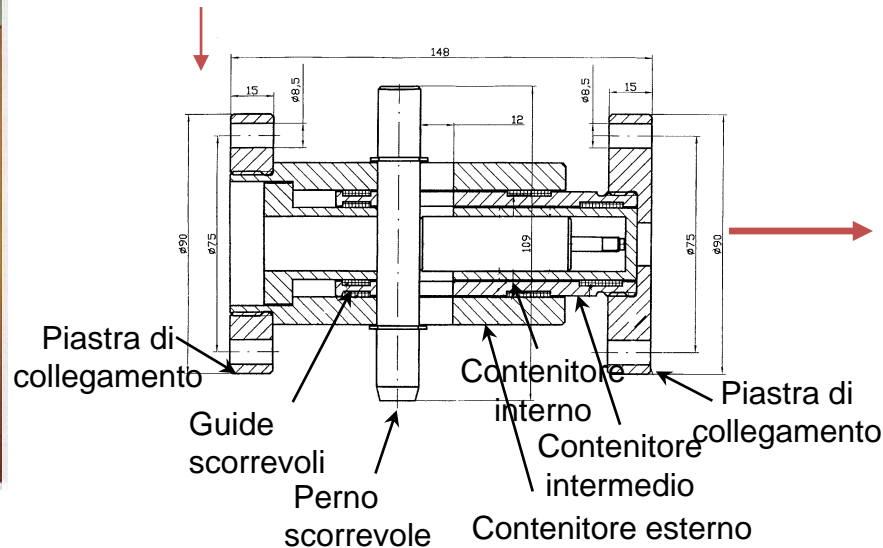


✓ Dispositivo elastico-dissipativo

*a singolo effetto*



*a doppio effetto*



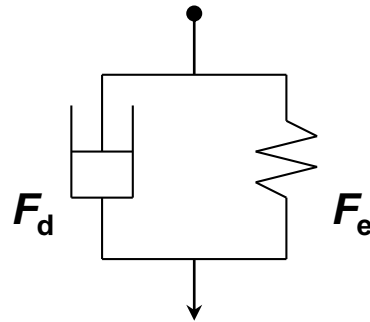


## 4. Dispositivi fluido-viscosi (a matrice siliconica)

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. 23/12, pp. 1556-1567. Awarded Munro Prize 2001.

Componente di forza dissipativa

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

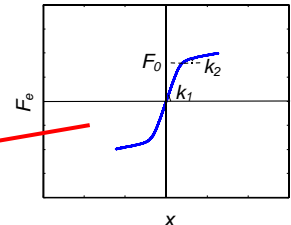
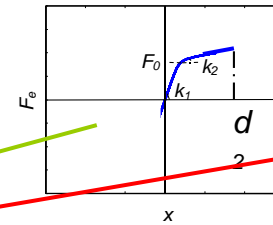
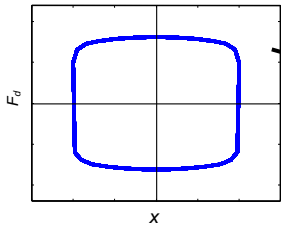


Componente di forza elastica non lineare

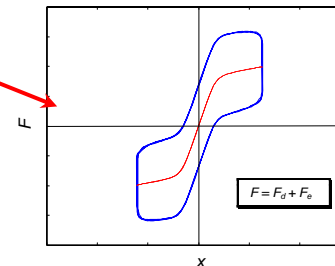
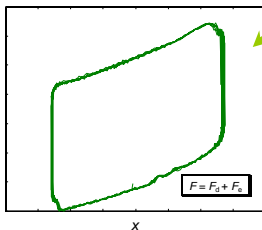
$$F_e(t) = k_2 x(t) + \frac{(k_1 - k_2) x(t)}{\left[ 1 + \left| \frac{k_1 x(t)}{F_0} \right|^R \right]^{1/R}}$$

Dispositivo a singolo effetto

Dispositivo a doppio effetto



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



# Bilancio energetico della risposta sotto l'azione sismica

## (a) Struttura progettata tradizionalmente

(per duttilità, allo SLV, usufruendo del fattore di struttura  $q$ )

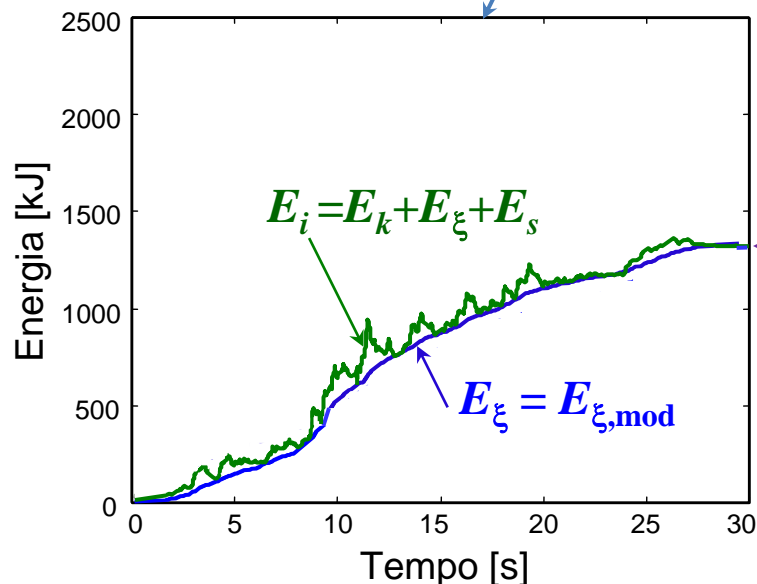
Azioni con  $P_{VR}$   
dell'81%/ $V_R$  e del  
63%/ $V_R$

Livello di prestazione  
atteso: SLO – SLD

Risposta elastica,  
con controllo degli  
spostamenti relativi  
massimi di piano ai fini del  
nullo o limitato  
danneggiamento degli  
elementi non strutturali

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

Esempio di risposta all'azione scalata all'intensità  
corrispondente allo svolgimento delle verifiche allo SLD



# Bilancio energetico della risposta sotto l'azione sismica

## (a) Struttura progettata tradizionalmente

(per duttilità, allo SLV, usufruendo del fattore di struttura  $q$ )

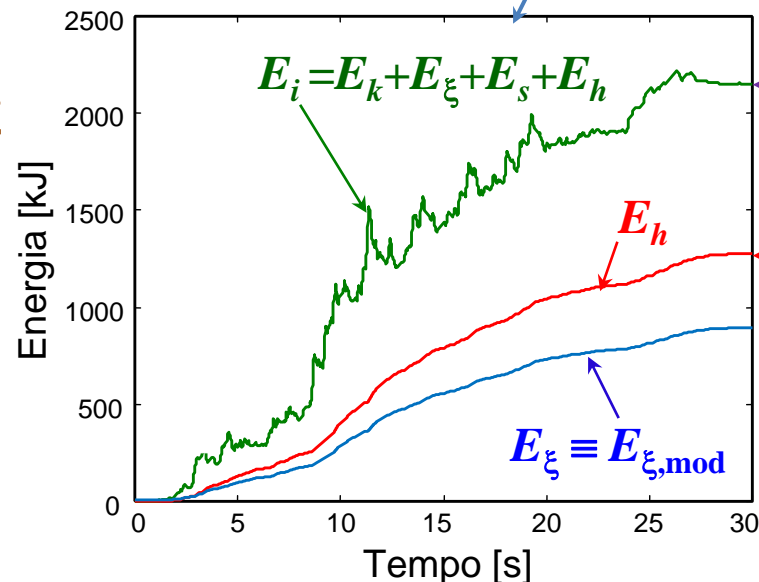
Azioni con  $P_{VR}$  del  
 $10\%/V_R$

Livello di prestazione  
atteso: SLV

Risposta non lineare, con  
ampia attività plastica,  
e conseguente sensibile  
danneggiamento,  
degli elementi strutturali

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

Esempio di risposta all'azione scalata all'intensità  
corrispondente allo svolgimento delle verifiche allo SLV



$$E_i^f = E_{\xi,mod}^f + E_h^f$$

Forte  
danneggiamento  
della struttura

## Bilancio energetico della risposta sotto l'azione sismica

### (b) Struttura dotata di un sistema di dissipazione supplementare d'energia

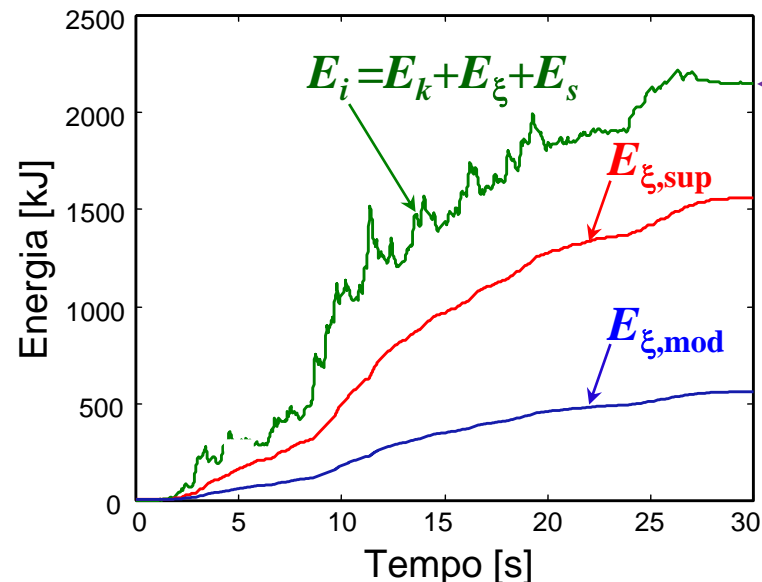
*Azioni con  $P_{VR}$  del  $10\%/V_R$*

*Livello di prestazione atteso: SLO – SLD*

$E_{\xi, \text{sup}}$  “ricopre il ruolo” svolto da  $E_p$  nelle strutture progettate tradizionalmente (totalmente, od in gran parte, secondoché si desidera avere una risposta totalmente elastica o moderatamente plastica)

$$E_k + E_{\xi, \text{mod}} + E_s + E_{\xi, \text{sup}} = E_i$$

Esempio di risposta all'azione scalata all'intensità corrispondente ad un evento con  $P_{VR}$  del  $10\%/V_R$



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

# Sistema di controventi dissipativi

## Metodo di progetto

$$E_{Dj} = \int_0^{t_f} c_j |\dot{v}_j|^\alpha \operatorname{sgn}(\dot{v}_j) \dot{v}_j dt$$

$$E_{\bar{E}} = \int_0^{t_f} m_j \ddot{v}_\theta \dot{v}_\theta dt$$

$k = 1$

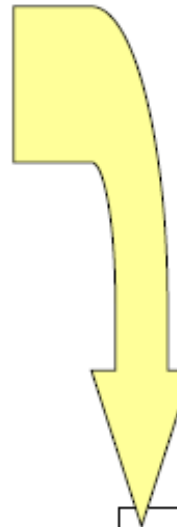
$$\beta_j \bar{E}_{\bar{E}}^0 = \bar{E}_{Dj}^1$$

$$c_j^1 = \frac{\beta_j \int_0^{t_{dmax}} m_j \ddot{v}_\theta^0 \dot{v}_\theta^0 dt \cdot \int_0^{t_{dmax}} |\dot{v}_j^0|^\alpha \operatorname{sgn}(\dot{v}_j^0) \dot{v}_j^0 dt}{\left( \int_0^{t_{dmax}} |\dot{v}_j^0|^\alpha \operatorname{sgn}(\dot{v}_j^0) \dot{v}_j^0 dt \right)^2}$$

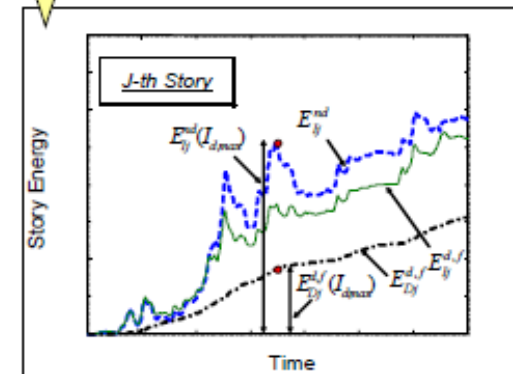
development of a new seismic analysis by adopting the  $c_j^1$  set of values, and calculation of  $\ddot{v}_j^1, \dot{v}_j^1, v_j^1$

$$\bar{E}_{Dj}^1 = \int_0^{t_{dmax}} c_j^1 |\dot{v}_j^1|^\alpha \operatorname{sgn}(\dot{v}_j^1) \dot{v}_j^1 dt$$

$$\bar{E}_{\bar{E}}^1 = \int_0^{t_{dmax}} m_j \ddot{v}_\theta^1 \dot{v}_\theta^1 dt \Rightarrow \bar{\beta}_j^1 = \frac{\bar{E}_{Dj}^1}{\bar{E}_{\bar{E}}^1}$$



Sorace, S., Terenzi, G. (2008). Seismic protection of frame structures by fluid viscous damped braces, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 134, pp. 45-55.



## Metodo di progetto

Sorace, S., Terenzi, G. (2008). Seismic protection of frame structures by fluid viscous damped braces, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 134, pp. 45-55.

If  $\frac{|\bar{\beta}_j^1 - \beta_j|}{\beta_j} \leq \varepsilon_j \iff c_j^1 = c_j$

Else

$k = 2:n$

$$\beta_j \bar{E}_{Dj}^{(k-1)} = \bar{E}_{Dj}^k \quad c_j^k = \frac{\beta_j \int_0^{t_{dmax}} m_j \ddot{v}_j^{(k-1)} \dot{v}_g dt \cdot \int_0^{t_{dmax}} |\dot{v}_j^{(k-1)}|^\alpha \operatorname{sgn}(\dot{v}_j^{(k-1)}) \dot{v}_j^{(k-1)} dt}{\left( \int_0^{t_{dmax}} |\dot{v}_j^{(k-1)}|^\alpha \operatorname{sgn}(\dot{v}_j^{(k-1)}) \dot{v}_j^{(k-1)} dt \right)^2}$$

development of a new seismic analysis by adopting the  $c_j^k$  set of values, and calculation of  $\ddot{v}_j^k; \dot{v}_j^k; v_j^k$

$$\bar{E}_{Dj}^k = \int_0^{t_{dmax}} c_j^k |\dot{v}_j^{(k)}|^\alpha \operatorname{sgn}(\dot{v}_j^{(k)}) \dot{v}_j^{(k)} dt$$

$$\bar{E}_{Dj}^k = \int_0^{t_{dmax}} m_j \ddot{v}_j^{(k)} \dot{v}_g dt$$

$$\bar{\beta}_j^k = \frac{\bar{E}_{Dj}^k}{\bar{E}_{Dj}^k}$$

When

$$\frac{|\bar{\beta}_j^k - \beta_j|}{\beta_j} \leq \varepsilon_j \iff c_j^k = c_j$$

# Estensione del metodo di progetto a dispositivi metallici

S. Sorace, G. Terenzi, C. Mori (2016). "Passive energy dissipation-based retrofit strategies for R/C frame water storage tanks". *Engineering Structures*, Vol. 106, p. 385-398. ISSN: 0141-0296, DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.10.038.

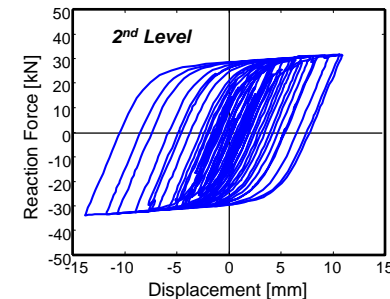
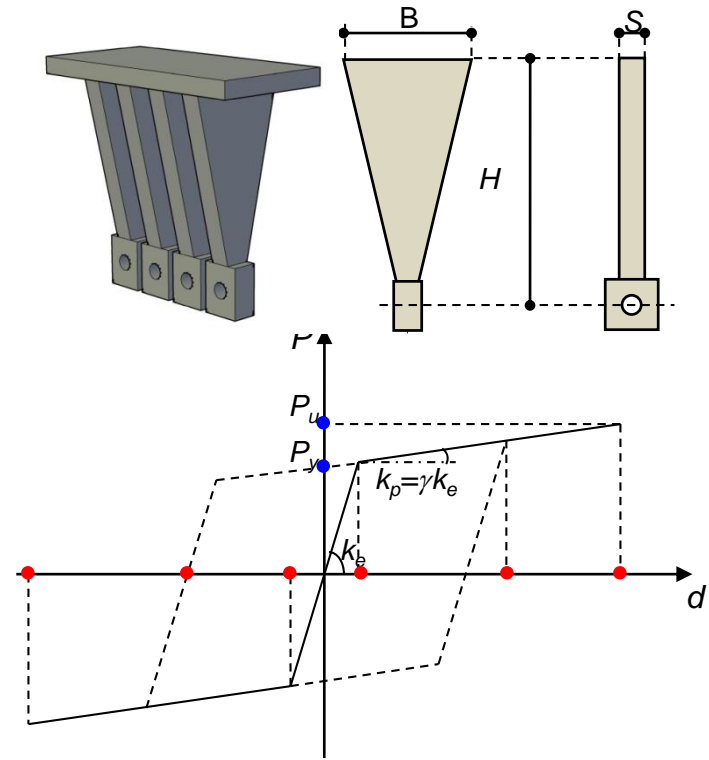
$$P_y = f_y \frac{BS^2}{6H} \quad d_y = \frac{P_y}{k_e} \quad k_e = \frac{E_s BS^3}{6H^3}$$

$$P_u = f_y \frac{BS^2}{4H} \quad d_u = d_y + \frac{P_u - P_y}{k_p} \quad k_p = \gamma k_e$$

$$\beta_j \bar{E}_{Ij} = \bar{E}_{Dj}$$

1. Definizione del ciclo medio di ciascuna piastra;
2. stima della capacità dissipativa massima di ciascuna piastra nel tempo di durata dell'evento sismico;
3. valutazione del numero di piastre che possano soddisfare il requisito richiesto:

$$N_p^t = E_D^t / E_{D,pl,tot}^t$$



## ***Principali riferimenti***

S. Sorace, G. Terenzi (2009). “Fluid viscous damper-based seismic retrofit strategies of steel structures: general concepts and design applications”, *International Journal of Advanced Steel Construction*, 5(3), 2009, pp. 322-329.

S. Sorace, G. Terenzi, G. Bertino (2012). “Viscous dissipative, ductility-based and elastic bracing design solutions for an indoor sports steel building”, *Advanced Steel Construction*, vol. 8(3), pp. 295-316.

S. Sorace, G. Terenzi (2012). “Dissipative bracing-based seismic retrofit of R/C school buildings”, *The Open Construction & Building Technology Journal*, vol. 6, p. 334-345.

S. Sorace, G. Terenzi, F. Fadi (2012). “Shaking table and numerical seismic performance evaluation of a fluid viscous-dissipative bracing system”, *Earthquake Spectra*, vol. 28(4), p. 1619-1642.

S. Sorace, G. Terenzi (2014). “Motion control-based seismic retrofit solutions for a R/C school building designed with earlier Technical Standards”, *Bulletin of Earthquake Engineering*. Vol. 12, p. 2723-2744.

M. Licari, S. Sorace, G. Terenzi (2015). “Nonlinear modeling and mitigation of seismic pounding between R/C frame buildings”, *Journal of Earthquake Engineering*. Vol. 19(3), 2015, pp. 431-460.

S. Sorace, G. Terenzi, M. Licari (2015). “Traditional and viscous dissipative steel braced top addition strategies for a R/C building”. *International Journal of Structural Engineering*, Vol. 6, n. 4, p. 332–353.

S. Sorace, G. Terenzi, C. Mori (2016). “Passive energy dissipation-based retrofit strategies for R/C frame water storage tanks”. *Engineering Structures*, Vol. 106, p. 385-398.

S. Sorace, G. Terenzi (2017). “Existing prefab R/C industrial buildings: Seismic assessment and supplemental damping-based retrofit”. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 94, pp. 193-203.



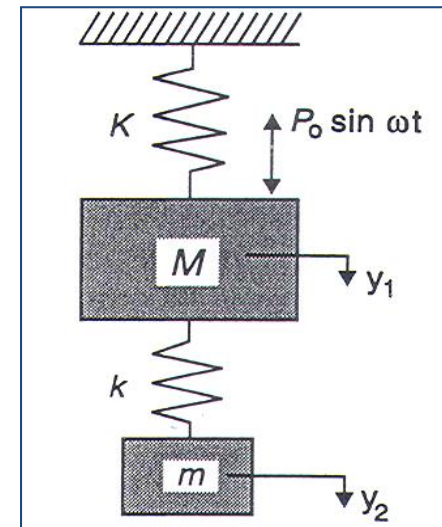
➤ *Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per dissipazione supplementare di energia: sistemi smorzanti*

## 1. Sistemi a massa accordata (TMD)

Il concetto di “tuned mass damper” per applicazioni strutturali trae origine dai sistemi di assorbimento delle vibrazioni studiati da Frahm nel 1909 (Den Hartog, 1956), consistenti in una piccola massa  $m$  ed in una molla  $k$  connessi al sistema principale di massa  $M$  e rigidezza  $K$ .

Sotto ponendo la massa  $M$  ad un semplice carico armonico, si può dimostrare come essa rimanga ferma quando la frequenza del sistema accordato ( $\sqrt{k/m}$ ) venga scelto pari a quella di eccitazione.

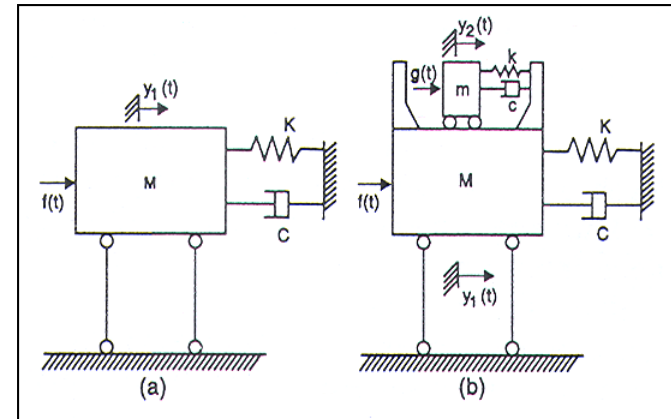
Constantinou, M.C., Soong, T.T., and Dargush, G. F. (1998). *Passive energy dissipation systems for structural design and retrofit*, MCEER, Monograph series, Buffalo, NY.



Den Hartog, J.P. (1956). *Mechanical vibrations*, Fourth Edition, McGraw-Hill, New York.

Per capire come utilizzare pertanto i sistemi TMD nel caso di vento e sisma si consideri innanzitutto un sistema ad un solo grado di libertà, sottoposto ad una forza di vibrazione  $f(t)$  come mostrato in Figura (a).

La risposta del sistema strutturale può essere ridotta dal sistema di massa accordata TMD, in moto relativo con il sistema principale, come mostrato in Figura (b).



Le equazioni del moto della struttura includente il sistema TMD sono le seguenti, in cui sono stati indicati con  $y_1(t)$  e  $z(t)$  rispettivamente lo spostamento della struttura e quello relativo del sistema accordato rispetto alla struttura:

$$M\ddot{y}_1(t) + C\dot{y}_1(t) + Ky_1(t) = c\dot{z}(t) + kz(t) + f(t)$$

$$m\ddot{z}(t) + c\dot{z}(t) + kz(t) = -m\ddot{y}_1(t) + g(t)$$

$c$  = coefficiente di smorzamento del sistema aggiunto;

$g(t)$  = funzione esterna agente sul sistema secondario, pari a zero nel caso di azioni da vento ed a  $\mu f(t)$  (essendo  $\mu = m/M$ ) per azioni di tipo sismico.

La somma delle due precedenti equazioni porta ad ottenere la seguente relazione unitaria:

$$(M + m)\ddot{y}_1(t) + C\dot{y}_1(t) + Ky_1(t) = f(t) + g(t) - m\ddot{z}(t)$$

A fronte di un piccolo incremento di massa da cui consegue un piccolo decremento di frequenza del sistema, nonché di un piccolo incremento della forza esterna che passa da  $f(t)$  ad  $f(t) + g(t)$ , si osserva un più significativo decremento dell'azione complessiva in ingresso in relazione al termine inerziale  $-m\ddot{z}(t)$

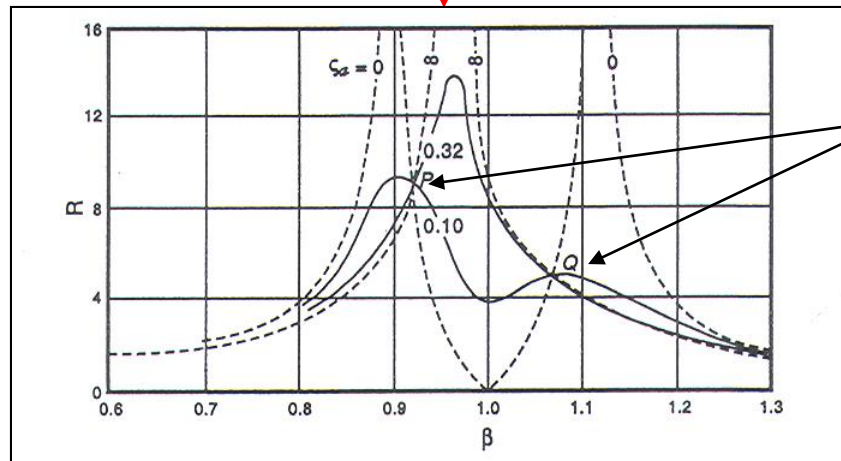
- **Stima dell'efficacia del sistema TMD: soluzione proposta da Den Hartog per il caso in cui la struttura sia non smorzata ( $C=0$ ) e soggetta ad eccitazione sinusoidale con frequenza circolare  $\omega$  ( $f(t)=P_0\sin\omega t$  e  $g(t)=0$ ).**

$$R = \frac{y_{\max}}{y_{st}} = \sqrt{\frac{(\alpha^2 - \beta^2)^2 + (2\zeta_a \alpha \beta)^2}{[(\alpha^2 - \beta^2)(1 - \beta^2) - \alpha^2 \beta^2 \mu]^2 + (2\zeta_a \alpha \beta)^2 (1 - \beta^2 - \beta^2 \mu)^2}}$$

essendo:

$R$  = fattore di amplificazione della risposta;  $y_{st} = P_0/K$ ;  $\omega_a = \sqrt{k/m}$ ;  $\omega_s = \sqrt{K/M}$ ;  
 $\zeta_a = c/2m\omega_a$ ;  $\alpha = \omega_a/\omega_s$ ;  $\beta = \omega/\omega_s$ .

**Diagrammi R- $\beta$  per  $\alpha=1$  (caso accordato),  $\mu=0.05$  e per differenti valori di  $\zeta_a$ .**



**P e Q punti invarianti**

Si osservi cosa succede accrescendo lo smorzamento del sistema TMD.

- Per  $\zeta_a = 0$  l'ampiezza di risposta è infinita corrispondentemente alle due frequenze di risonanza del sistema protetto.
- Quando lo smorzamento del TMD diventa infinito le due masse sono virtualmente fuse, da cui risulta un comportamento simile a quello di uno SDOF con massa pari a  $1.05M$  e l'ampiezza della risposta alla frequenza di risonanza diventa nuovamente infinita.
- Fra queste due situazioni limiti si coglie l'esistenza di uno smorzamento ottimale che minimizza il fattore di amplificazione  $R$ .

Un obiettivo nella progettazione del sistema aggiunto è quello di portare il picco di ampiezza di risonanza al minimo valore raggiungibile con  $\beta$  quanto più prossimo ad 1.

Tale risultato può essere ottenuto scegliendo opportunamente  $\alpha$  (rapporto fra le pulsazioni), sì da portare i due punti P e Q pressoché alla stessa quota.

$$\alpha_{\text{opt}} = \frac{1}{1 + \mu}$$
$$\zeta_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}}$$
$$R(P) = R(Q) = \sqrt{1 + \frac{2}{\mu}}$$

➤ **Fattore di amplificazione massima R e parametri ottimali del sistema accordato nel caso di C=0 (Warburton, 1982).**

Case	Excitation		Optimized Response		Optimized Absorber Parameter	
	Type	Applied to	Parameter Optimized (R)	$R_{opt}$	$\alpha_{opt}$	$\zeta_{opt}$
1	Force $P_0 e^{i\omega t}$	Structure	$\frac{K y_1}{P_0}$	$\left(1 + \frac{2}{\mu}\right)^{1/2}$	$\frac{1}{1 + \mu}$	$\sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}}$
2	Force $P_0 e^{i\omega t}$	Structure	$\frac{M \ddot{y}_1}{P_0}$	$\left(\frac{2}{\mu(1 + \mu)}\right)^{1/2}$	$\left(\frac{1}{1 + \mu}\right)^{1/2}$	$\sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu / 2)}}$
3	Acceleration $\ddot{x}_g e^{i\omega t}$	Base	$\frac{\omega_s^2 y_1}{\ddot{x}_g}$	$\left(\frac{2}{\mu}\right)^{1/2} (1 + \mu)$	$\frac{(1 - \mu / 2)^{1/2}}{1 + \mu}$	$\sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)(1 - \mu / 2)}}$
4	Acceleration $\ddot{x}_g e^{i\omega t}$	Base	$\frac{\ddot{x}_g + \ddot{y}_1}{\ddot{x}_g}$	$\left(1 + \frac{2}{\mu}\right)^{1/2}$	$\frac{1}{1 + \mu}$	$\sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}}$
5	Random Force	Structure	$\frac{\langle y_1^2 \rangle K^2}{2\pi S_0 \omega_s}$	$\left(\frac{1 + 3\mu / 4}{\mu(1 + \mu)}\right)^{1/2}$	$\frac{(1 + \mu / 2)^{1/2}}{1 + \mu}$	$\sqrt{\frac{\mu(1 + 3\mu / 4)}{4(1 + \mu)(1 + \mu / 2)}}$
6	Random Acceleration	Base	$\frac{\langle y_1^2 \rangle \omega_s^3}{2\pi S_0}$	$(1 + \mu)^{3/2} \left(\frac{1}{\mu} - \frac{1}{4}\right)^{1/2}$	$\frac{(1 - \mu / 2)^{1/2}}{1 + \mu}$	$\sqrt{\frac{\mu(1 - \mu / 4)}{4(1 + \mu)(1 - \mu / 2)}}$

Notes:  $\langle y_1^2 \rangle$  is the mean-square value of  $y_1(t)$   
 $S_0$  is force intensity in case 5 and acceleration intensity in case 6

Warburton, 1982

**Warburton, G.B. (1982). Optimal absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 10, 381-401.**

➤ **Estensione della soluzione al caso di  $C \neq 0$  (Warburton, 1982).**

In questo caso non si hanno punti invarianti ed il problema si risolve definendo i valori ottimali per  $\alpha$  e  $\zeta_a$ , dall'imposizione dell'annullamento di:  $\partial R_j / \partial \alpha$  e  $\partial R_j / \partial \zeta_a$  e dalla conseguente risoluzione del sistema di equazioni risultanti.

Per ogni condizione j di eccitazione considerata si deve avere la minima risposta  $R_j$ , definita come segue:

$$R_j = \sqrt{\frac{A_j^2 + B_j^2}{C^2 + D^2}}$$

$$C = (\alpha^2 - \beta^2)(1 - \beta^2) - \mu\alpha^2\beta^2 - 4\zeta_a\zeta_s\alpha\beta^2$$

$$D = 2\zeta_a\alpha\beta(1 - \beta^2 - \mu\beta^2) + 2\zeta_s\beta(\alpha^2 - \beta^2)$$

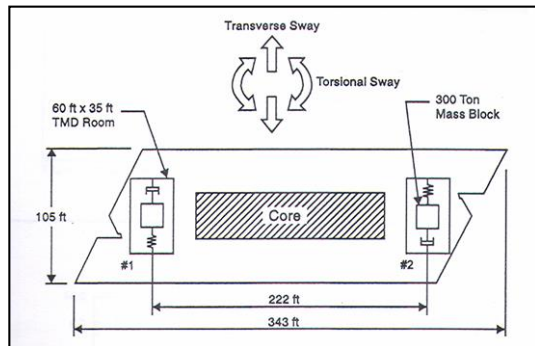
Case	Excitation	Response Parameter Considered	Response Amplitude $R_j$	$A_j$	$B_j$
1	$P_o e^{i\omega t}$	$y_1$	$\frac{Ky_1}{P_o}$	$\alpha^2 - \beta^2$	$2\zeta_a\alpha\beta$
2	$P_o e^{i\omega t}$	$\dot{y}_1$	$\frac{K\dot{y}_1}{P_o\omega_s}$	$-2\zeta_a\alpha\beta^2$	$\beta(\alpha^2 - \beta^2)$
3	$P_o e^{i\omega t}$	$\ddot{y}_1$	$\frac{M\ddot{y}_1}{P_o}$	$-\beta^2(\alpha^2 - \beta^2)$	$-2\zeta_a\alpha\beta^3$
4	$P_o e^{i\omega t}$	Force at base	$\frac{F}{P_o}$	$\alpha^2 - \beta^2 - 4\zeta_s\zeta_a\alpha\beta^2$	$2\zeta_a\alpha\beta + 2\zeta_s\beta(\alpha^2 - \beta^2)$
5	$\ddot{x}_g e^{i\omega t}$	$y_1$	$\frac{\omega_s^2 y_1}{\ddot{x}_g}$	$\alpha^2(1 + \mu) - \beta^2$	$2\zeta_a\alpha\beta(1 + \mu)$
6	$\ddot{x}_g e^{i\omega t}$	$\ddot{y}_1 + \ddot{x}_g$	$\frac{\ddot{y}_1 + \ddot{x}_g}{\ddot{x}_g}$	As Case 4	As Case 4
7	$\ddot{x}_g e^{i\omega t}$	$y_1 + X_g$	$\frac{\omega_s^2(y_1 + X_g)}{\ddot{x}_g}$	$-\frac{A_4}{\beta^2}$	$-\frac{B_4}{\beta^2}$

Notes:  $F$  = Force at base  
 $P_o e^{i\omega t}$  is the excitation applied to main mass  
 $\ddot{x}_g e^{i\omega t}$  is the excitation applied at base

Warburton, 1982

➤ *Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per dissipazione supplementare di energia: sistemi smorzanti*

**1. TMD - Tuned Mass Dampers (Sistemi di masse accordate)**



*John Hancock, Boston, MA*

*Citygroup Center New, New York, NY*



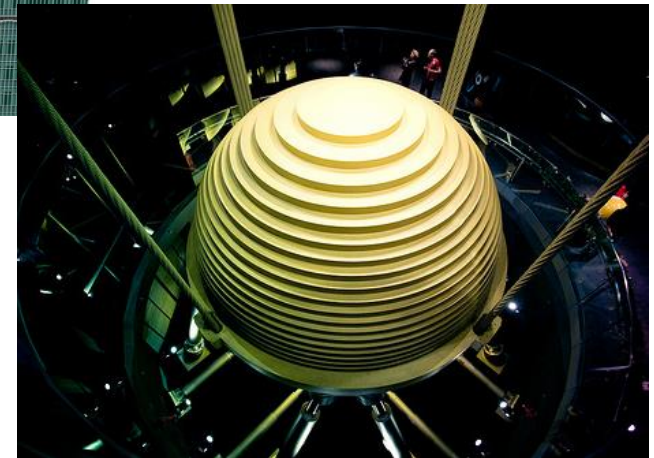
		John Hancock Boston, MA	Citicorp Center New York, NY
Typical floor size	(ft)	343 x 105	160 x 160
Floor area	(sq ft)	36,015	25,600
Building height	(ft)	800	920
Building modal weight	(tons)	47,000	20,000
Building period 1st mode	(sec)	7.00	6.25
Design wind storm	(years)	100	30
Mass block weight	(tons)	2 x 300	400
Mass block size	(ft)	18 x 18 x 3	30 x 30 x 8
Mass block material	(type)	lead/steel	concrete
TMD/AMD stroke	(ft)	± 6.75'	± 4.50'
Max spring force	(kips)	135	170
Max actuator force	(kips)	50	50
Max hydraulic supply	(gms)	145	190
Max operating pressure	(psi)	900	900
Operating trigger - acceleration	(g)	.002	.003
Max power	(HP)	120	160
Equivalent damping	(%)	4.0%	4.0%

\* Including overtravel

**Petersen, N.R. (1980). *Design of large scale TMD, Structural control, North Holland, 581-596.***

➤ *Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per dissipazione supplementare di energia: sistemi smorzanti*

**1. TMD - Tuned Mass Dampers (Sistemi di masse accordate)**



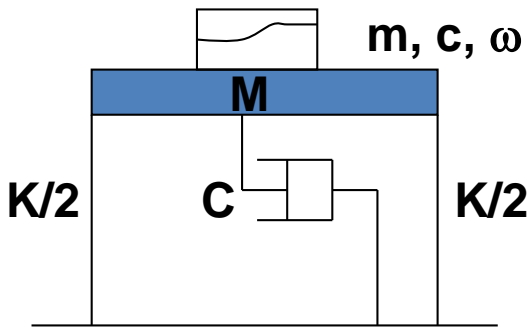
*Taipei 101, Taipei, Taiwan (2004)- Il Taipei 101 ospita lo smorzatore a massa accordata più grande del mondo (660 tonnellate)*



➤ *Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per dissipazione supplementare di energia: sistemi smorzanti*

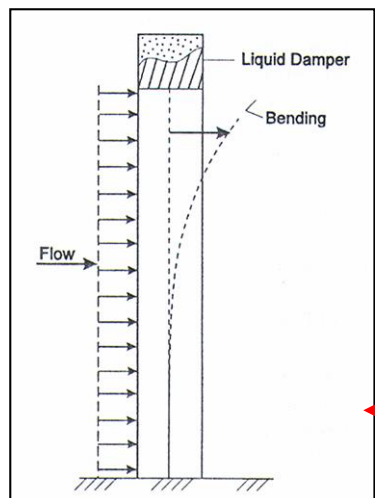
**2. Sistemi a liquido accordato (TLD)**

Bauer, H.F. (1984). *New proposed dynamic vibration absorbers for excited structures*, Vibration Damping Workshop Proceedings, Lynn Rogers Ed., DD1-DD27.



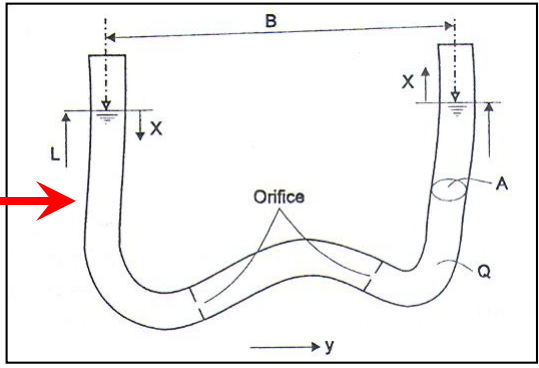
Xu, Y.L., Samali, B. and Kwok, K.C.S. (1992). *Control of along wind response of structures by mass and liquid dampers*, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 118(1), 20-39.

**Fluidi insolubili**



*Il sistema è costituito da un tubo parzialmente riempito d'acqua, dotato internamente di orifici. La frequenza fondamentale dipende dalla lunghezza della colonna d'acqua, mentre lo smorzamento dipende dallo scorrimento del liquido attraverso gli orifici.*

*L'eccitazione risulta smorzata in relazione al moto della superficie d'interfaccia.*



- Contrariamente a quanto si verifica nel caso dei TMD (generalmente con comportamento lineare, descrivibile tramite costanti di massa  $\mu$ , frequenza  $\alpha$  e smorzamento  $\zeta_a$ ), il comportamento dei TLD è fortemente non lineare a causa del libero moto dei fluidi, od al passaggio del fluido in orifici.

La rigidezza e lo smorzamento del sistema, infatti, sono entrambe grandezze dipendenti non linearmente dal rapporto fra la frequenza del sistema principale e quella di oscillazione del fluido, nonché dall'ampiezza della risposta.

L'esecuzione è tuttavia più semplice rispetto all'analogo sistema di TMD. Lo smorzatore consiste infatti generalmente in un serbatoio di polipropilene, disponibile in commercio.

➤ **Procedura di linearizzazione da applicare ad un equivalente sistema di TMD (Sun et al. 1995)**

$$m_v = m \frac{(1 - \Omega^2) + (2\zeta_a \Omega)^2}{(1 - \Omega^2)^2 + (2\zeta_a \Omega)^2} \quad c_v = c \frac{\Omega^4}{(1 - \Omega^2)^2 + (2\zeta_a \Omega)^2}$$

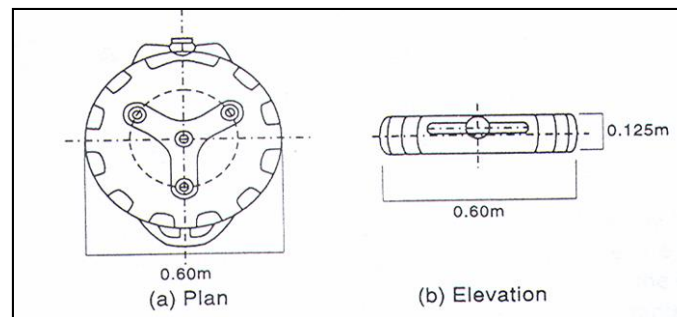
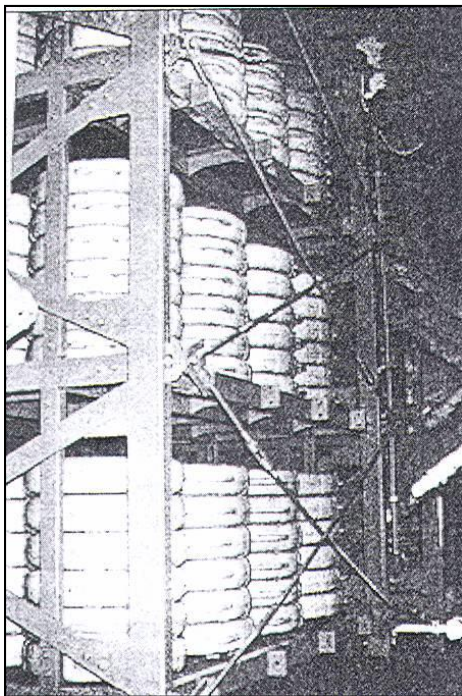
$$\Omega = \frac{\omega}{\omega_a}; \omega_a^2 = \frac{k}{m}; \zeta_a = \frac{c}{2m\omega_a}$$

Sun, L.M., Fujino, Y., Chaiseri, P. and Pacheco, B.M. (1995). The properties of tuned liquid dampers using a TMD analogy, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 24, 967-976.

- *Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per dissipazione supplementare di energia: sistemi smorzanti*

## 2. Sistemi a liquido accordato (TLD)

### Torre dell'aeroporto di Tokyo



Tamura, Y., Fujii, K., Ohtsuki, T., Wakahara, T. and Koshaka, R. (1995). *Effectiveness of tuned liquid dampers and wind excitations*, *Engineering Structures*, 17(9), 609-621.

- *Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per dissipazione supplementare di energia: sistemi smorzanti*

## 2. TLD - Tuned Liquid Dampers (Sistemi di fluidi accordati)

*One Rincon Hill Tower (2008) – S. Francisco*



- *Applicazione di tecnologie avanzate di protezione sismica per dissipazione supplementare di energia: sistemi smorzanti*

## 2. TLD - Tuned Liquid Dampers (Sistemi di fluidi accordati)

*One Rincon Hill Tower (2008) - S. Francisco*

