



DICEA

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
CIVILE E AMBIENTALE**

L'uso di moderne tecnologie d'isolamento e di dissipazione supplementare di energia per la progettazione del nuovo e l'adeguamento dell'esistente

Aspetti teorici della dissipazione di energia e tipologie di dispositivi e sistemi

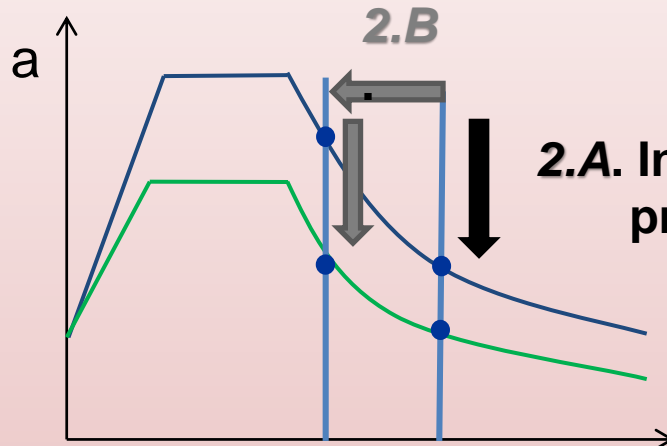
Parte B

Prof.ssa Ing. Gloria Terenzi

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Firenze

Strategie di protezione sismica

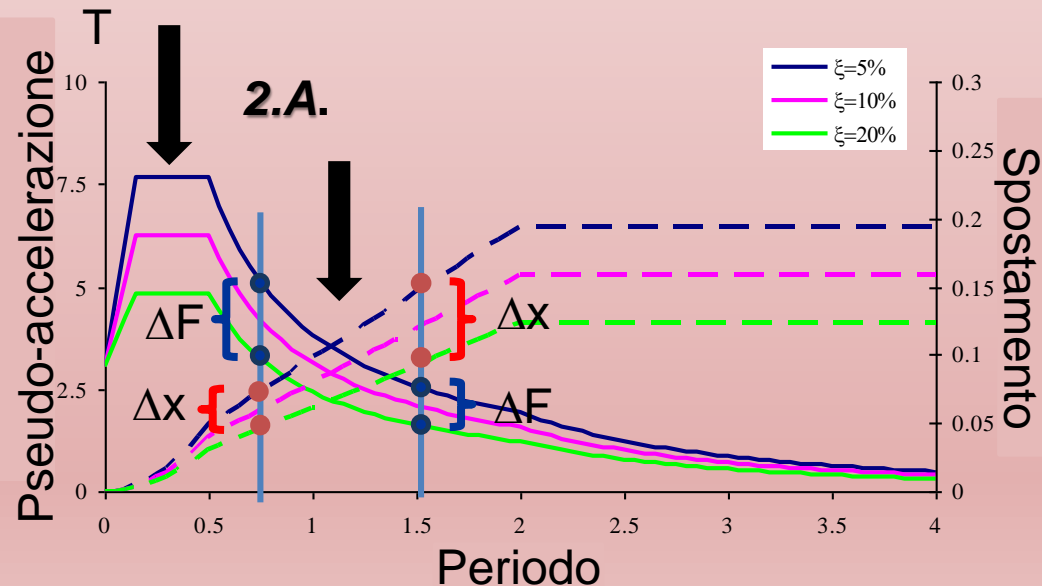
2) Riduzione delle azioni per dissipazione di energia



2.A. Inclusione di dispositivi preminentemente dissipativi

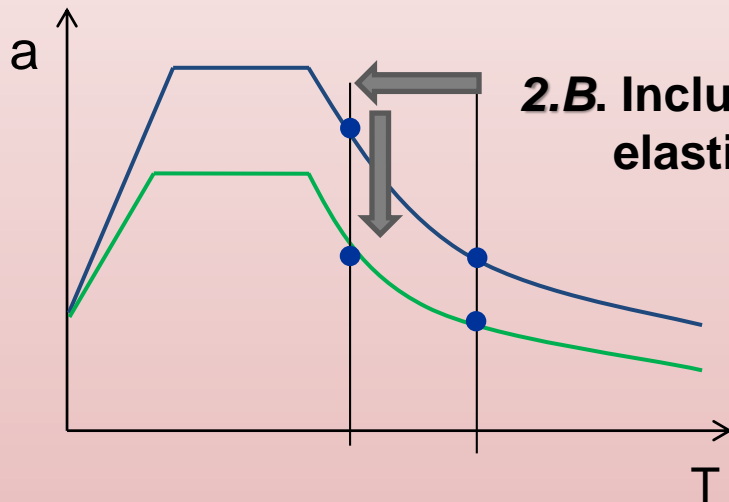
E' preferibile adottare la soluzione **2.A.** per periodi $T \leq 1$ s.

$T < 1$ s $\rightarrow \Delta F \gg \Delta x$
 $T > 1$ s $\rightarrow \Delta x \gg \Delta F$



Strategie di protezione sismica

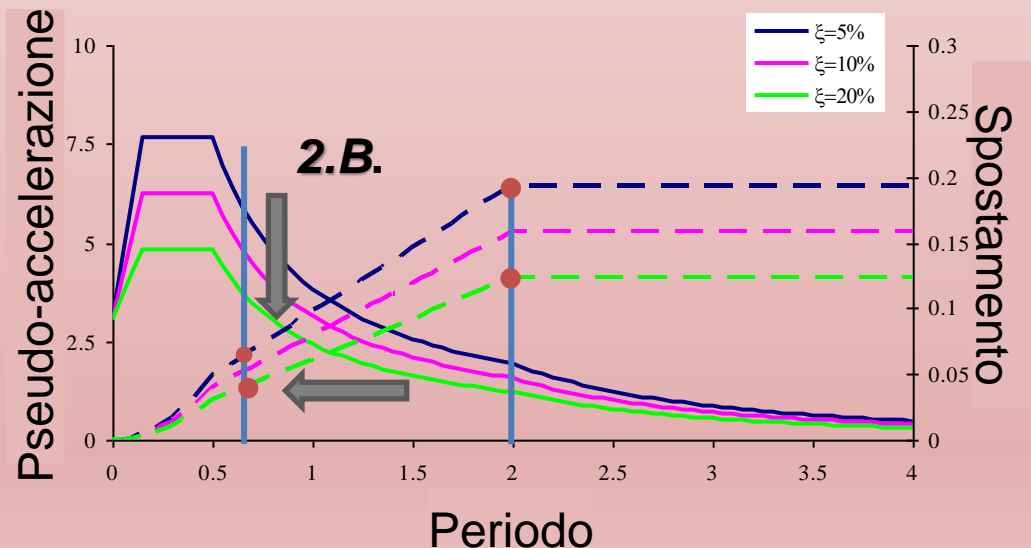
2.B. Necessità di ridurre gli spostamenti nella struttura troppo deformabile nei confronti delle azioni orizzontali con elementi di controventamento, al contempo riducendo le sollecitazioni per incremento dello smorzamento.



2.B. Inclusione di dispositivi congiuntamente elastico-dissipativi

E' preferibile adottare la soluzione **2.B.** per periodi $T > 1$ s.

Per intervalli di periodo minori il dispositivo elastico-dissipativo può non attivarsi anche per basse intensità dell'azione sismica.



Strategie di protezione sismica

➔ Progettazione per prestazione, sia riferita agli elementi strutturali che a quelli non strutturali

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

Progettazione tradizionale

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

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

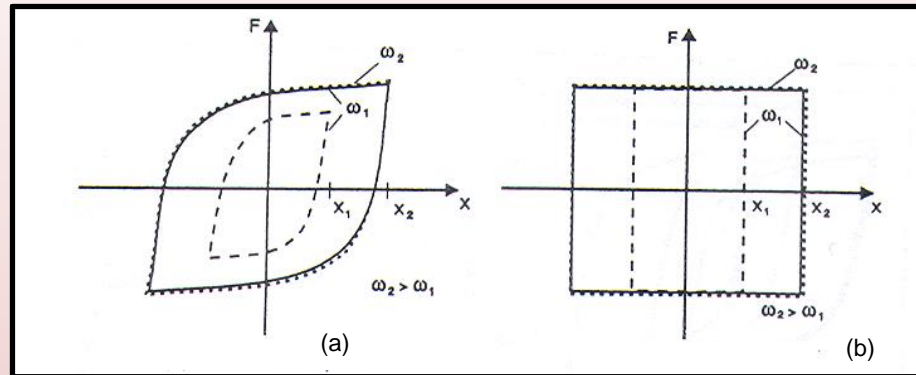


Figura. D1 – Esempificazione della risposta ciclica di dispositivi dipendenti dallo spostamento, metallici (a) e ad attrito (b), soggetti a forzanti armoniche di spostamento con pulsazioni ω_1 ed ω_2 e spostamenti massimi x_1 ed x_2 .

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

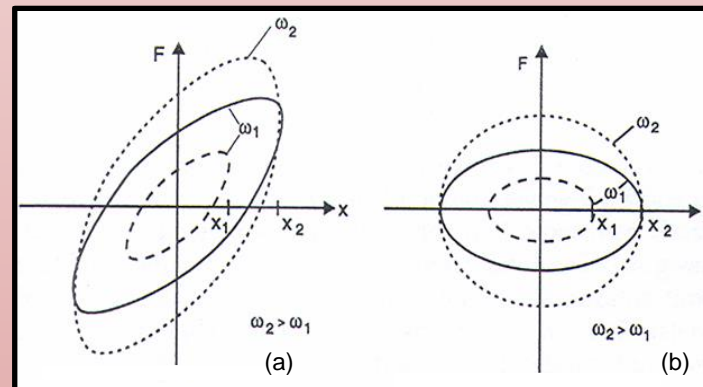


Figura. D2 – Esempificazione della risposta ciclica di dispositivi dipendenti dalla velocità, visco-elastici (a) e fluido-viscosi (b), soggetti a forzanti armoniche di spostamento con pulsazioni ω_1 ed ω_2 e spostamenti massimi x_1 ed x_2 .

➤ *Dispositivi metallici*

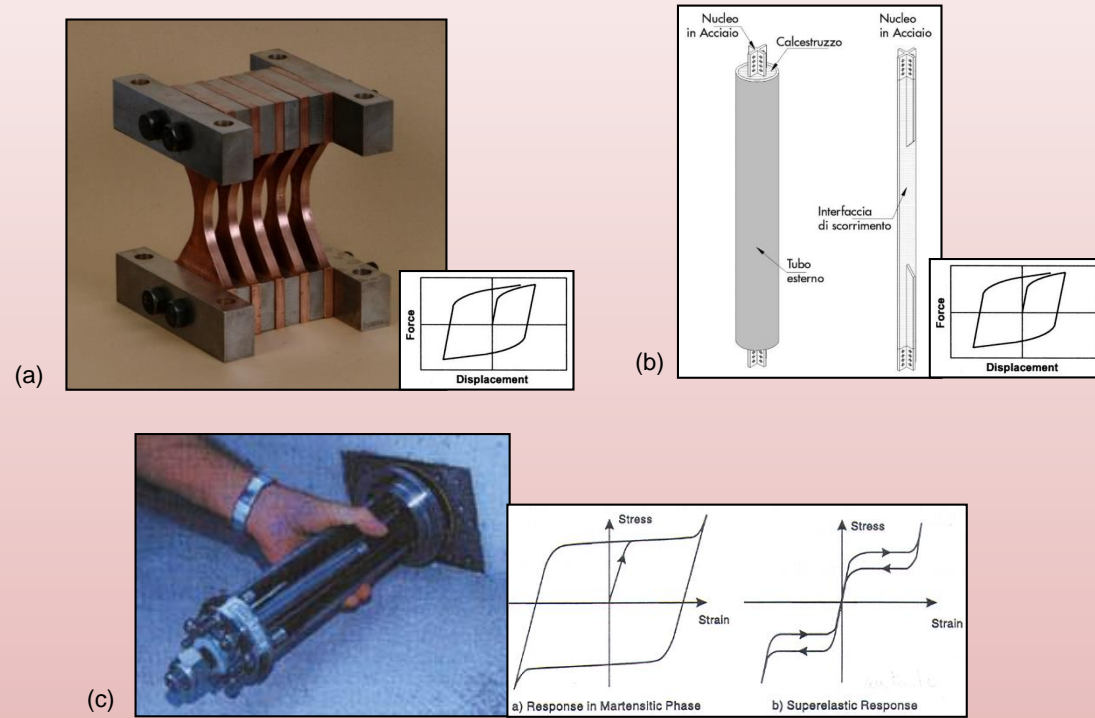


Figura. D3 – Dispositivi ADAS (a), BRB (b), SMA (c), e relativi cicli di risposta.

➤ **Dispositivi ad attrito**

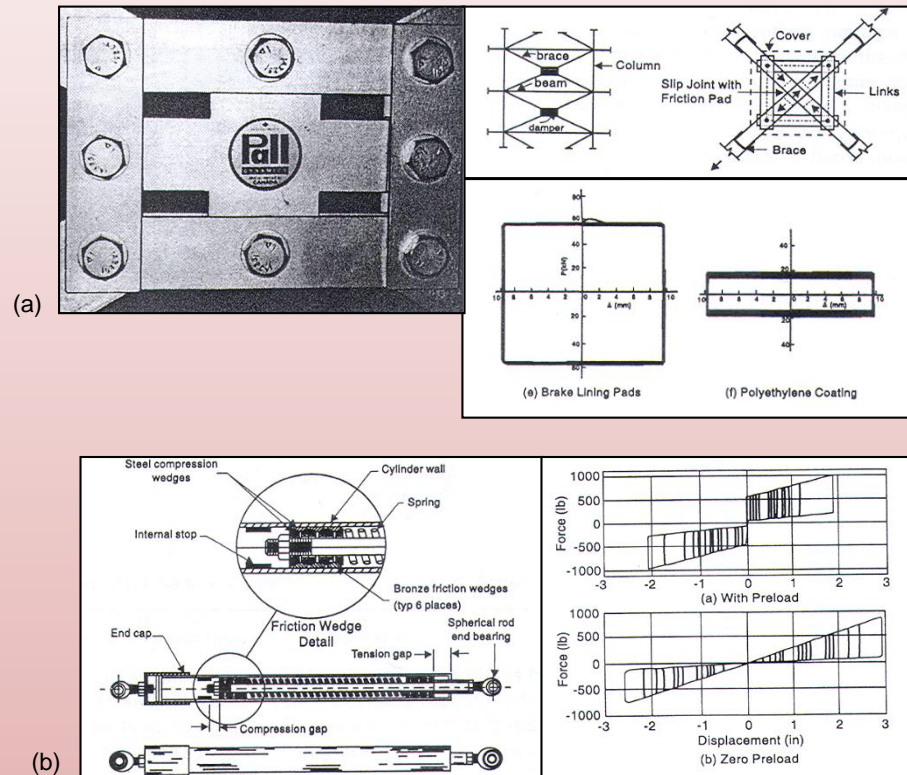


Figura. D4 – Dispositivi di dissipazione per attrito, puramente smorzanti (a), con comportamento elastico-dissipativo (b).

I dispositivi visco-elastici sono intesi come quei dispositivi il cui modello reologico è certamente in serie (modello di Maxwell), caratterizzati da un ciclo ellittico la cui forma ed inclinazione nel piano forza-spostamento dipendono sia dalla velocità che dallo spostamento (Figura D5). I dispositivi fluido-viscosi possono invece svolgere la funzione di dissipatori puri con legge dissipativa lineare oppure non lineare (Figura D6), avere un comportamento preminentemente dissipativo, ovvero con componente elastica, connessa in parallelo a quella dissipativa, trascurabile rispetto alla rigidità degli elementi strutturali in cui vengano inclusi (dispositivi fluido-viscosi pressurizzati – Figura D7), congiuntamente elastico-dissipativo, con legge di combinazione delle componenti di forza elastica e dissipativa in serie e ciclo pseudo-ellittico (dispositivi ad orifizi, a pareti dissipative – Figura D8).

➤ **Dispositivi visco-elastici**

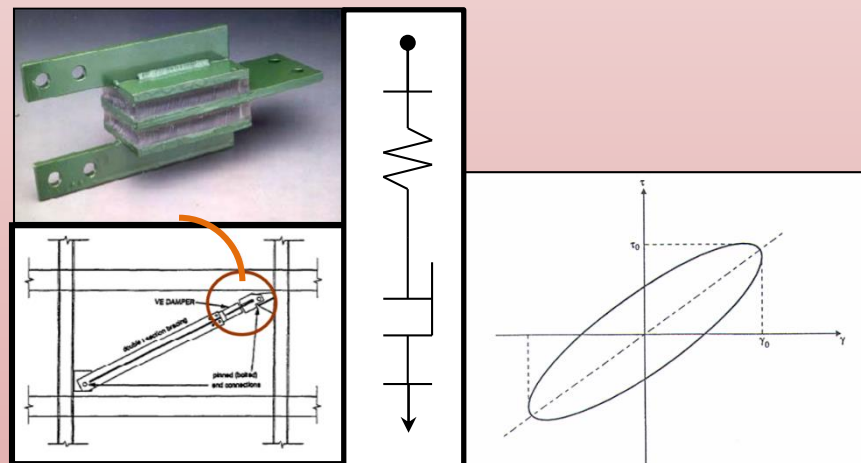


Figura. D5 – Dispositivi visco-elastici con modello reologico in serie e ciclo elastico dissipativo ellittico.

➤ Dispositivi fluido-viscosi

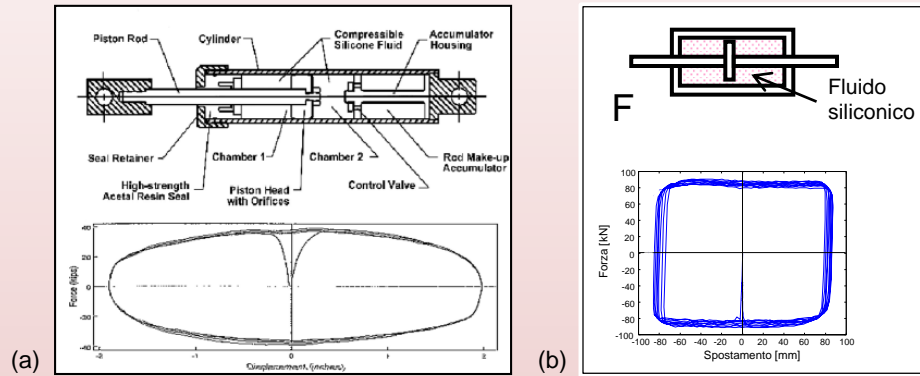


Figura. D6 – Dissipatori fluido-viscosi; ad orifizi con legge dissipativa di tipo viscoso lineare (a) e pressurizzati a comportamento non lineare (b).

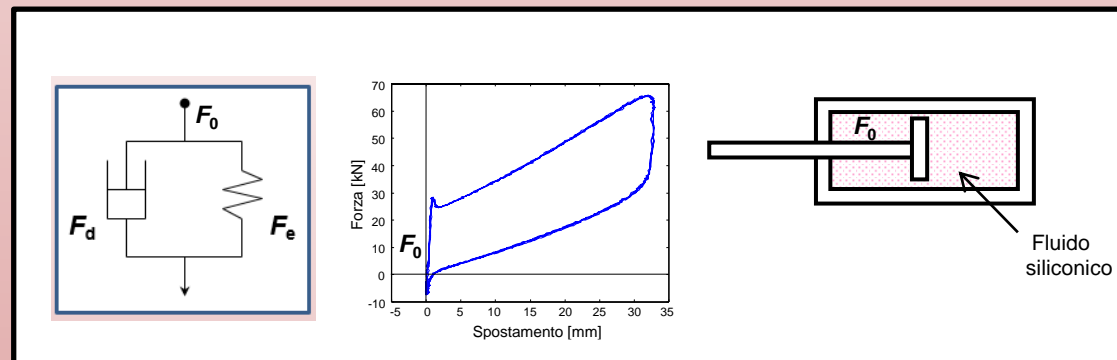


Figura. D7 – Dispositivi preminentemente dissipativi pressurizzati (F_0 diverso da 0) e non ($F_0 = 0$), rispondenti al modello reologico in parallelo.

➤ **Dispositivi fluido-viscosi**

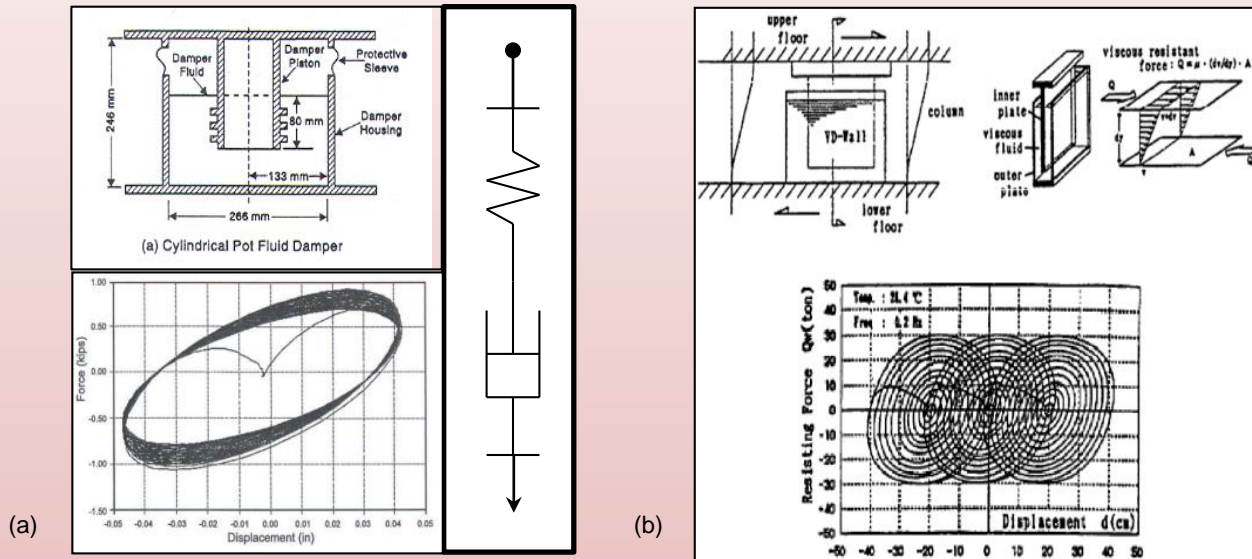


Figura. D8 – Dispositivi fluido-viscosi ad orifizi con legge reologica in serie (a); pareti dissipative con fluido viscoso (b).

I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

**Classificazione
dell'isteresi meccanica**

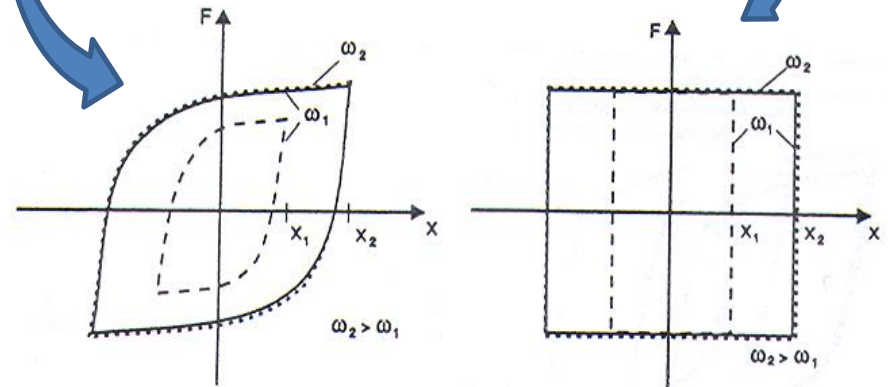
**comportamento
indipendente dalla velocità
di deformazione o di
tensione
(DIPENDENTE DALLO
SPOSTAMENTO),
senza recupero di
deformazione al termine del
caricamento**

Comportamento ciclico

**Classificazione dei
dispositivi**

**Dispositivi metallici
(metallic dampers)**

**Dispositivi ad attrito
(friction dampers)**



I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

Classificazione dell'isteresi meccanica

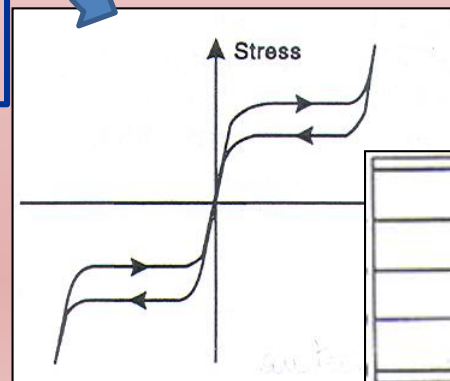
comportamento indipendente dalla velocità di deformazione o di tensione (DIPENDENTE DALLO SPOSTAMENTO), con recupero di deformazione al termine del caricamento

Comportamento ciclico

Classificazione dei dispositivi

Dispositivi metallici di tipo SMA (Shape memory alloys)

Dissipatori ad attrito con molle precaricate (spring friction dampers)



I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

Classificazione dell'isteresi meccanica



comportamento **DIPENDENTE DALLA VELOCITÀ** di deformazione o di tensione, **senza recupero di deformazione** al termine del caricamento (viscoelasticità)

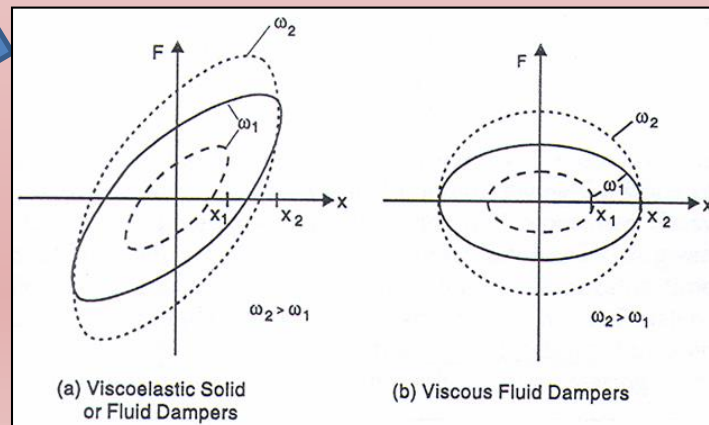
Comportamento ciclico

Classificazione dei dispositivi



Dispositivi visco-elastici (viscoelastic dampers)

Dissipatori fluido-viscosi con viscosità lineare (viscous fluid dampers)



I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

Classificazione dell'isteresi meccanica



comportamento **DIPENDENTE DALLA VELOCITÀ** di deformazione o di tensione, **senza recupero di deformazione** al termine del caricamento (viscoelasticità)

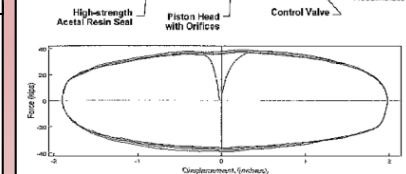
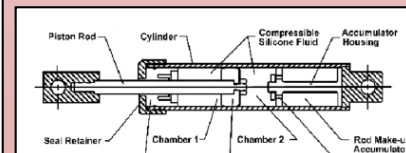
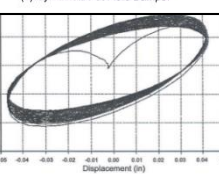
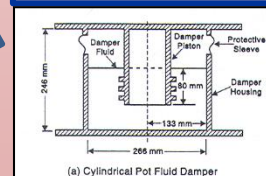
Comportamento ciclico

Classificazione dei dispositivi



Dispositivi fluido-viscosi ad orifizi con componente elastica combinata in serie (viscoelastic dampers)

Dissipatori fluido-viscosi ad orifizi con viscosità lineare (viscous fluid dampers)



I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

Classificazione dell'isteresi meccanica

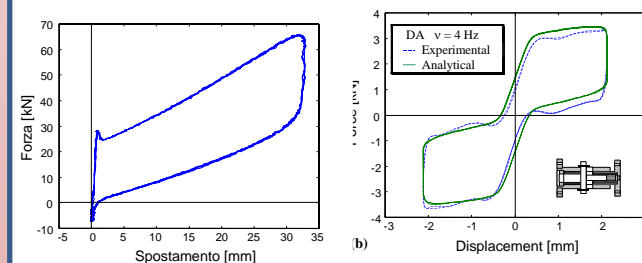


**comportamento
DIPENDENTE DALLA VELOCITÀ
di deformazione o di
tensione, con recupero di
deformazione al termine del
caricamento
(viscosità non lineare)**

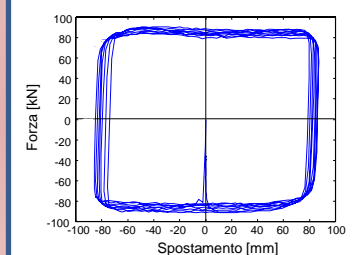
Classificazione dei dispositivi



**Dispositivi fluido-viscosi
a matrice siliconica
pressurizzati –
combinazione in parallelo
(pressurized silicone-fluid
dampers)**

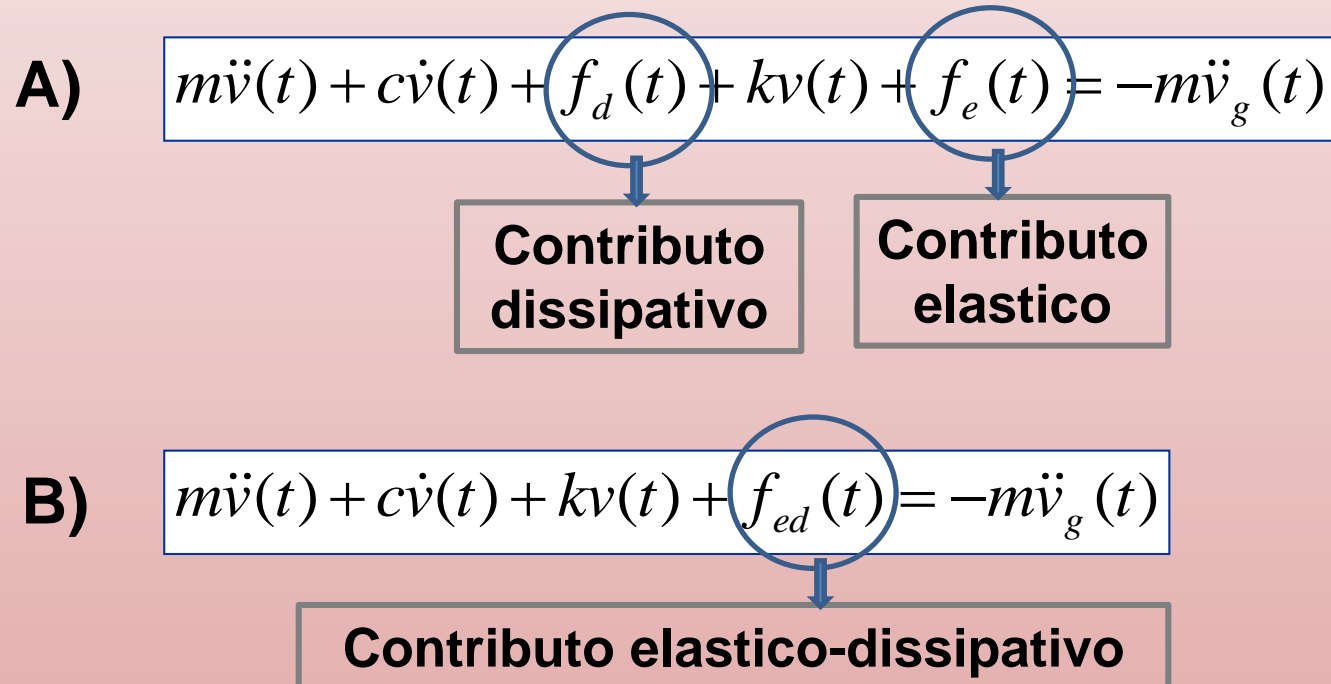


Comportamento ciclico



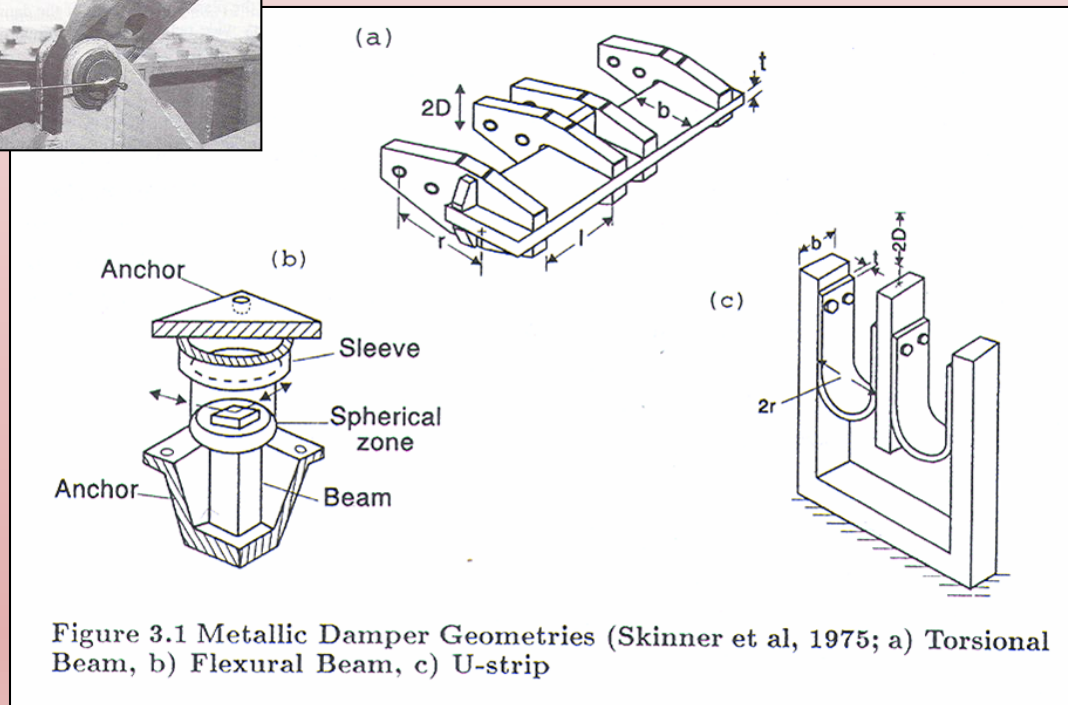
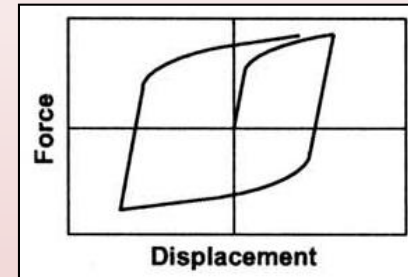
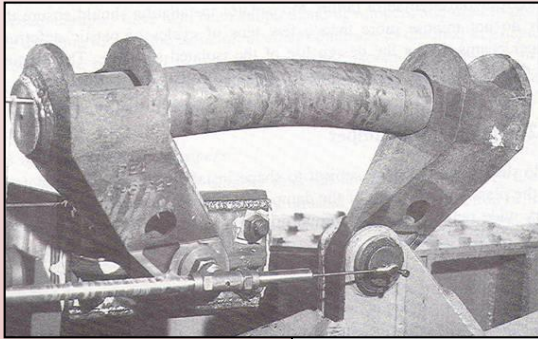
Applicazione di moderne tecnologie di dissipazione supplementare di energia: i controventi dissipativi

- ❖ Di che tipo sono i dispositivi di dissipazione supplementare di energia?



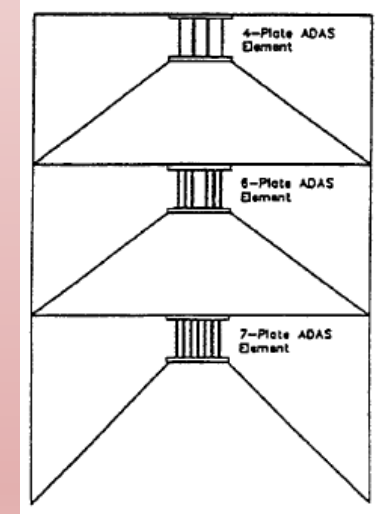
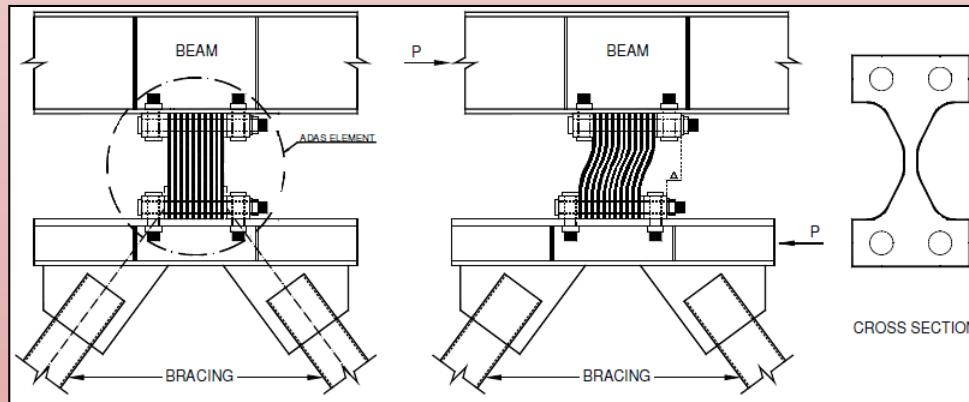
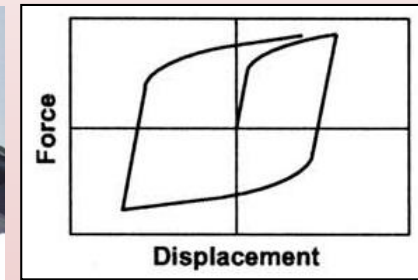
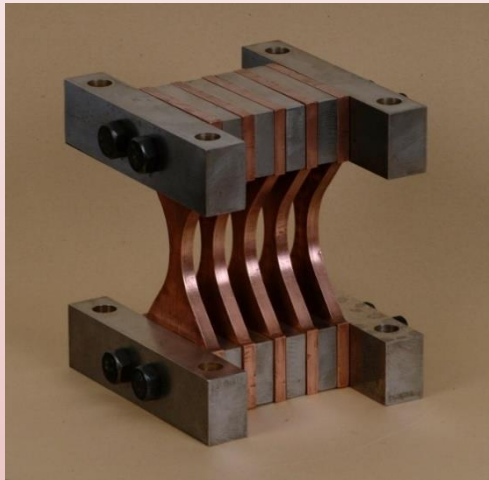
I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

Dispositivi metallici (Tipo B)



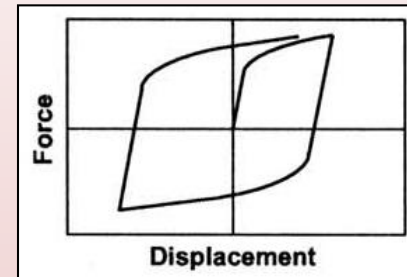
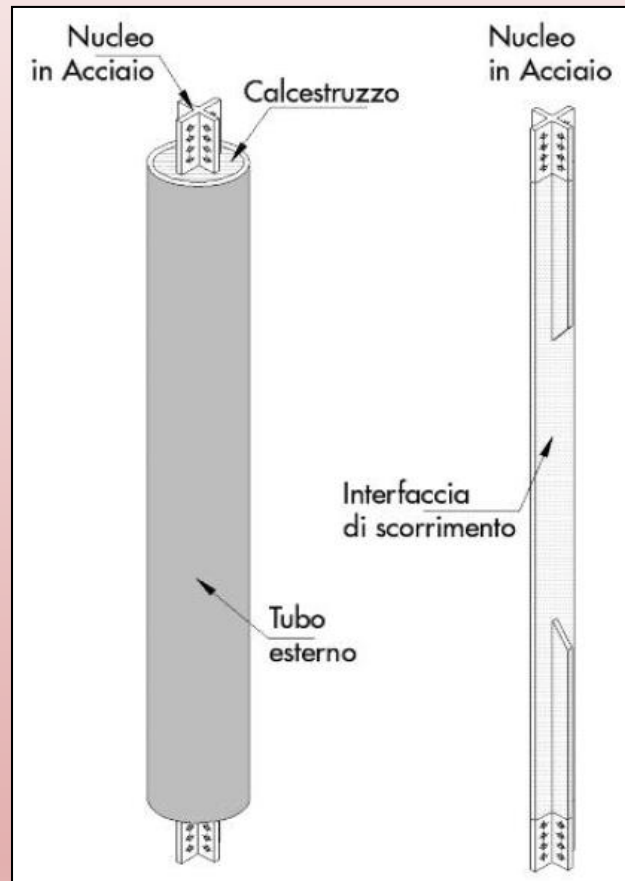
I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

Dispositivi metallici – «ADAS» (Tipo B)



I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

Dispositivi metallici – «BRAD» (Tipo B)

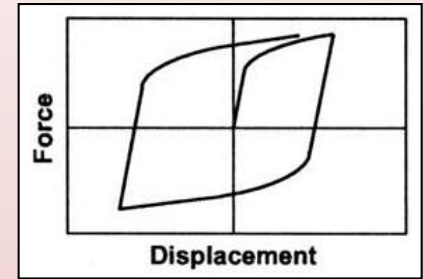


Università delle Marche – Ancona



I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

***Controventi includenti dispositivi metallici – «BRAD»
(Tipo B)***

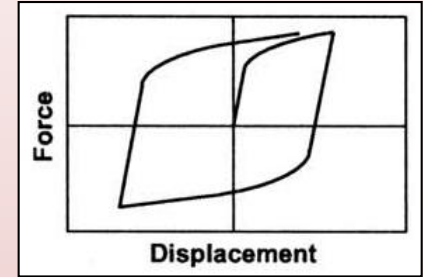


SCUOLA ELEMENTARE «IGNAZIO SILONE», Pescara



I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

***Controventi includenti dispositivi metallici – «BRAD»
(Tipo B)***



COMPLESSO OSPEDALIERO, Fermo

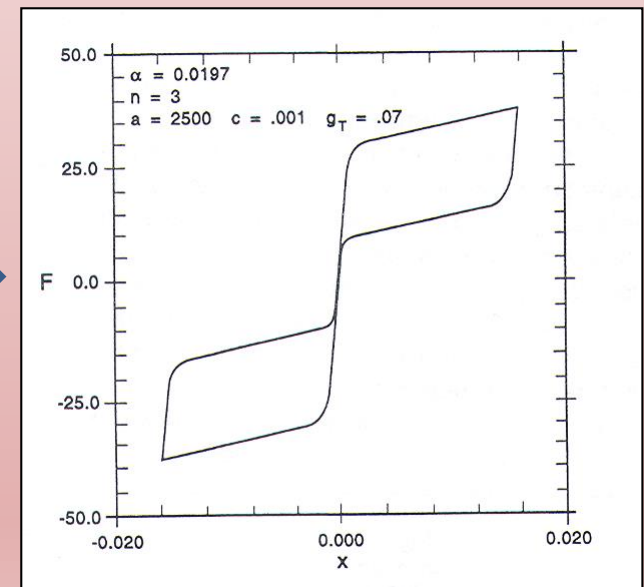
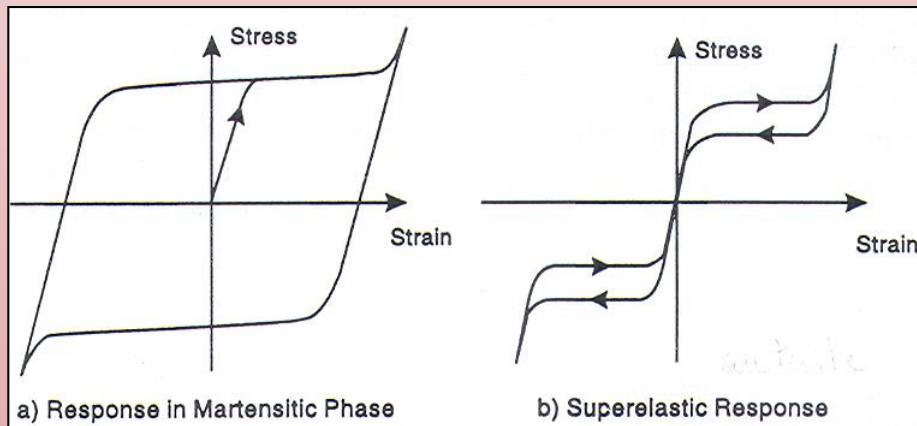


I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

Dispositivi «SMA» in leghe a memoria di forma, (Tipo A o B)

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

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



I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

Controventi includenti dispositivi «SMA» (Tipo A o B)

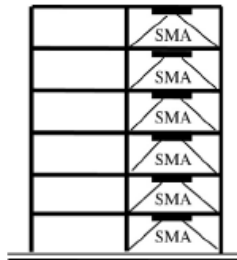
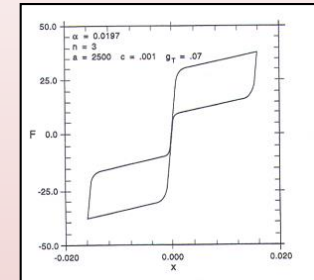


Fig. 8. Schematic of the setup of the SMA brace reinforced frame structure [3].

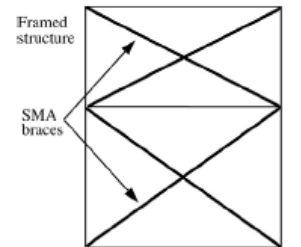


Fig. 9. Schematic of the SMA braces for a two-story steel frame [15].

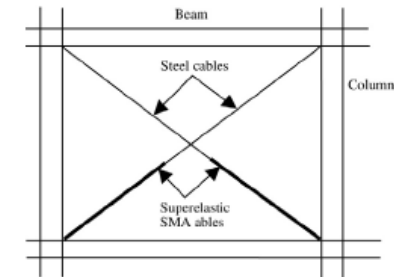


Fig. 10. Schematic of the SMA braces for a frame structure [36].

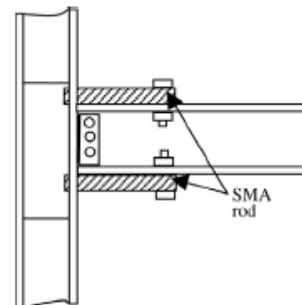
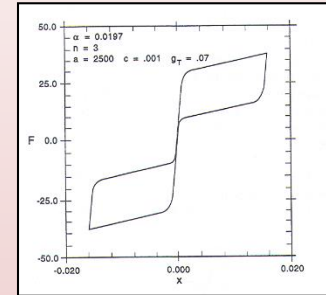


Fig. 14. Schematic of SMA connector for steel structures.

I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

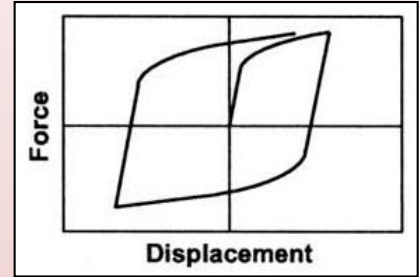
Impiego di dispositivi «SMA» (Tipo A)

BASILICA SUPERIORE DI SAN FRANCESCO, Assisi



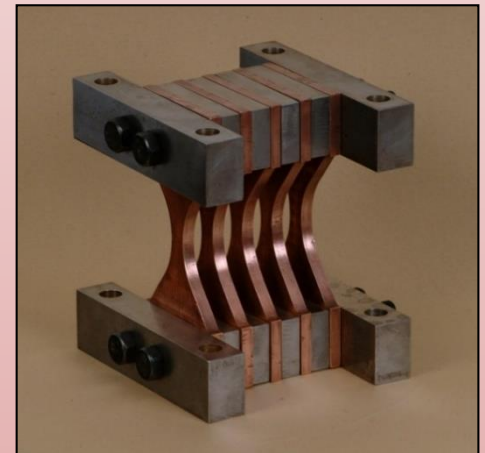
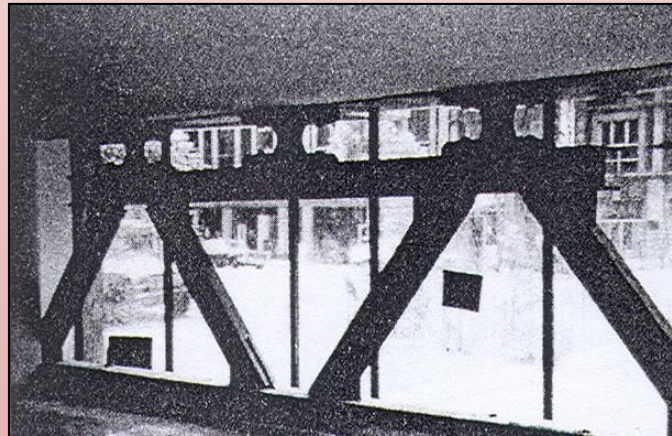
I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

***Controventi includenti dispositivi metallici – «ADAS»
(Tipo B)***



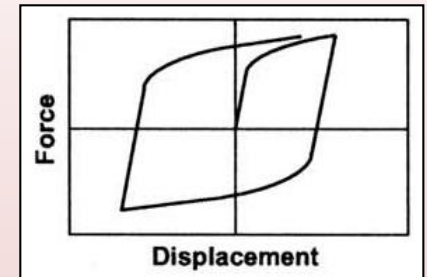
IZAZAGA BUILDING Mexico City (1990)

Telaio in c.a. di 12 piani adeguato sismicamente con 200 dispositivi ADAS.



I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

Controventi includenti dissipatori metallici (Tipo B)



Adeguamento sismico della scuola "D. Viola" di Potenza

Adeguamento sismico della scuola "G. Leopardi" di Potenza



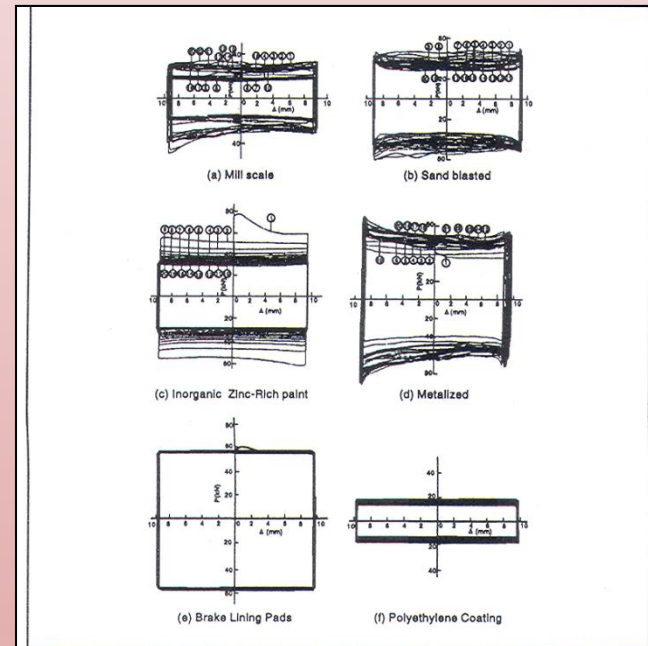
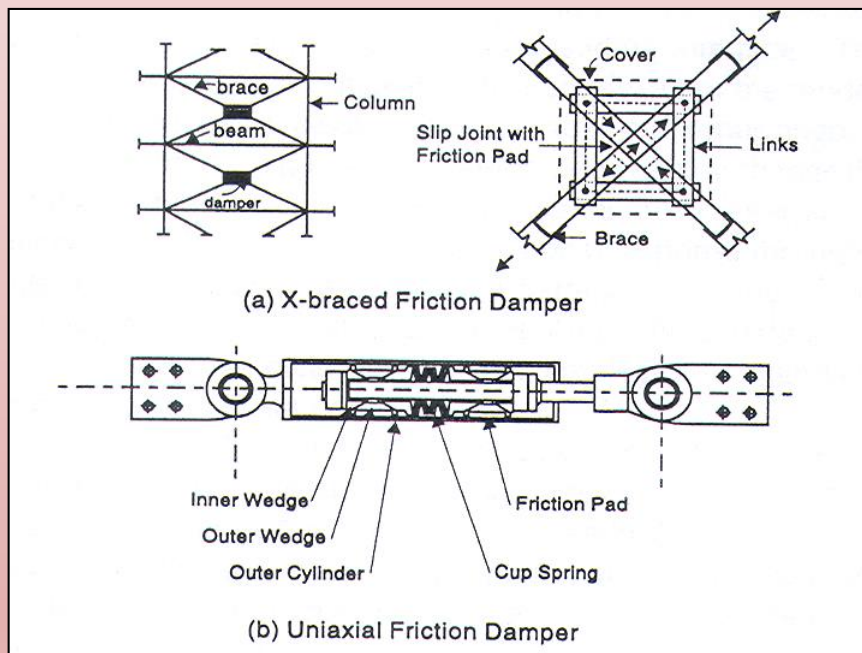
I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

Dispositivi ad attrito (Tipo A)

$$F_t = \mu F_n$$

$$\mu_s > \mu_c$$

μ_s = coefficiente di attrito statico;
 μ_c = coefficiente di attrito dinamico.



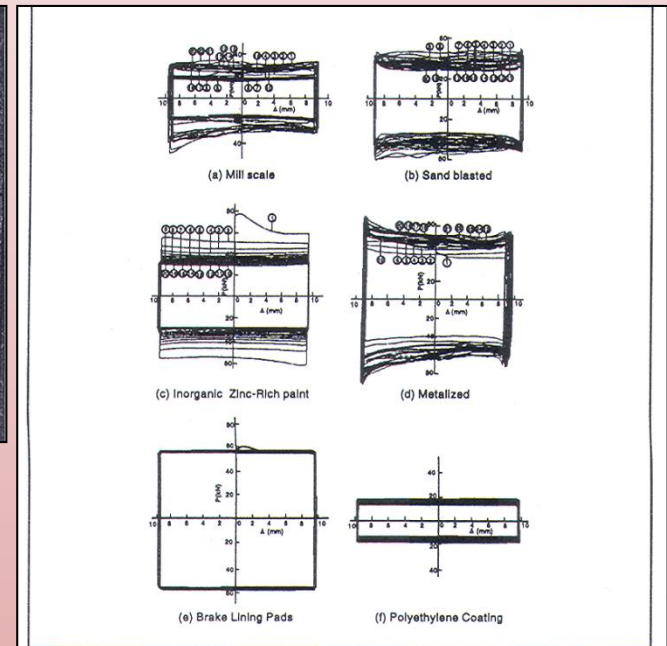
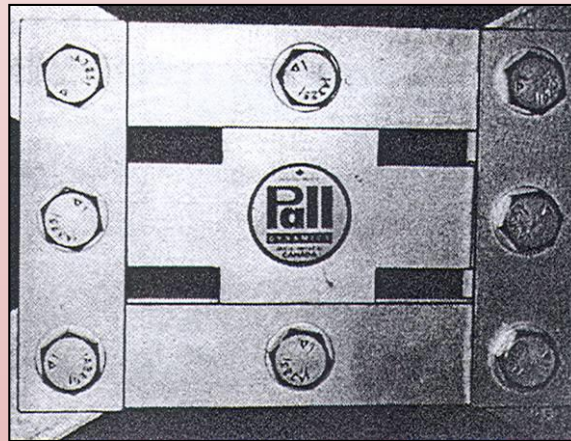
Pall et al., 1980

■ Figure 3.9 Hysteresis Loops of Limited Slip Bolted Joints

I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

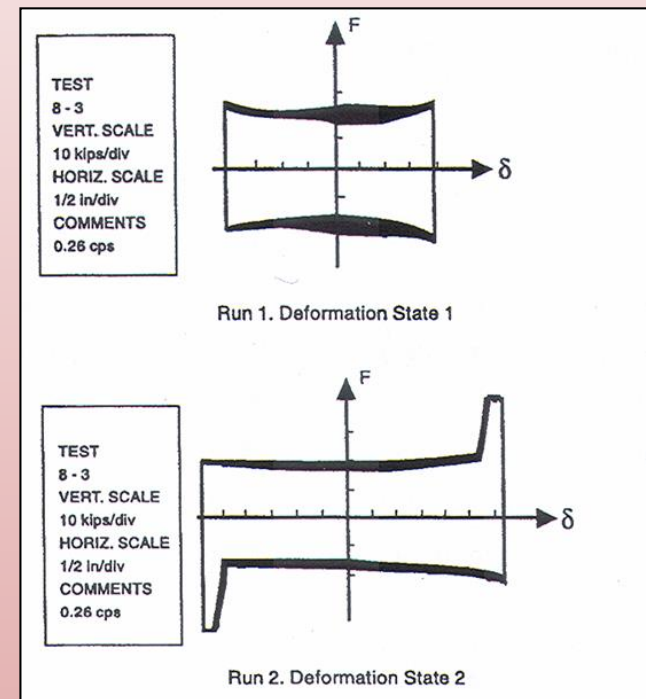
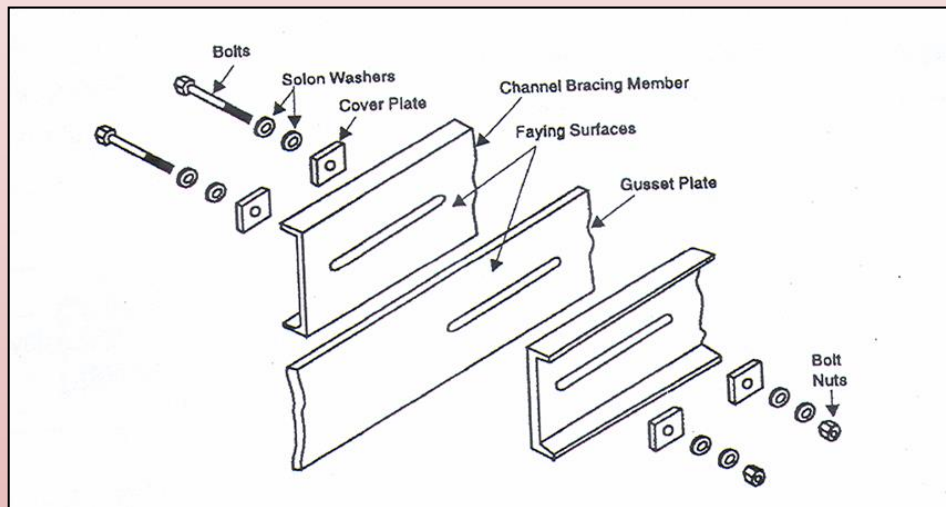
Controventi includenti dissipatori ad attrito (Tipo A)

MC CONNEL LIBRARY AT CONCORDIA UNIVERSITY, Montreal



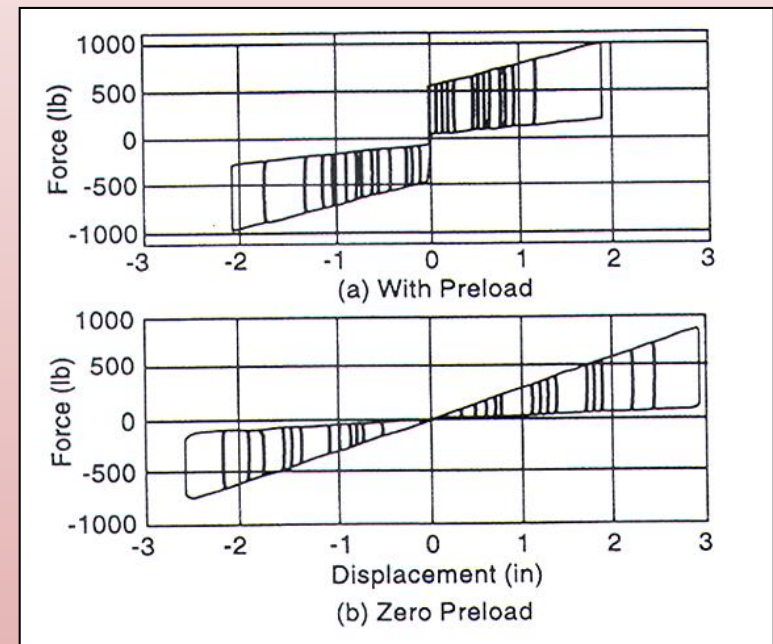
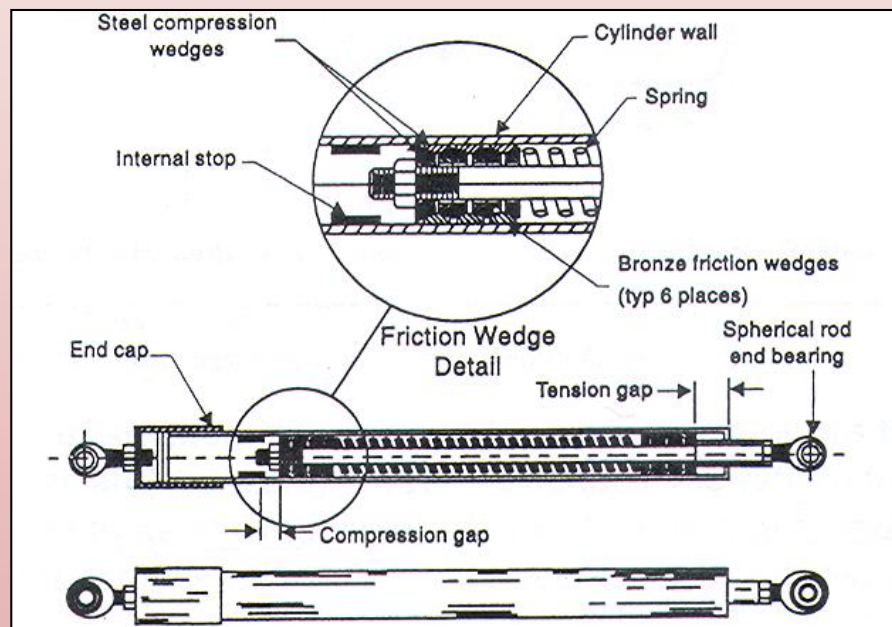
I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

Dispositivi ad attrito «Slotted bolted connection» (Tipo A)



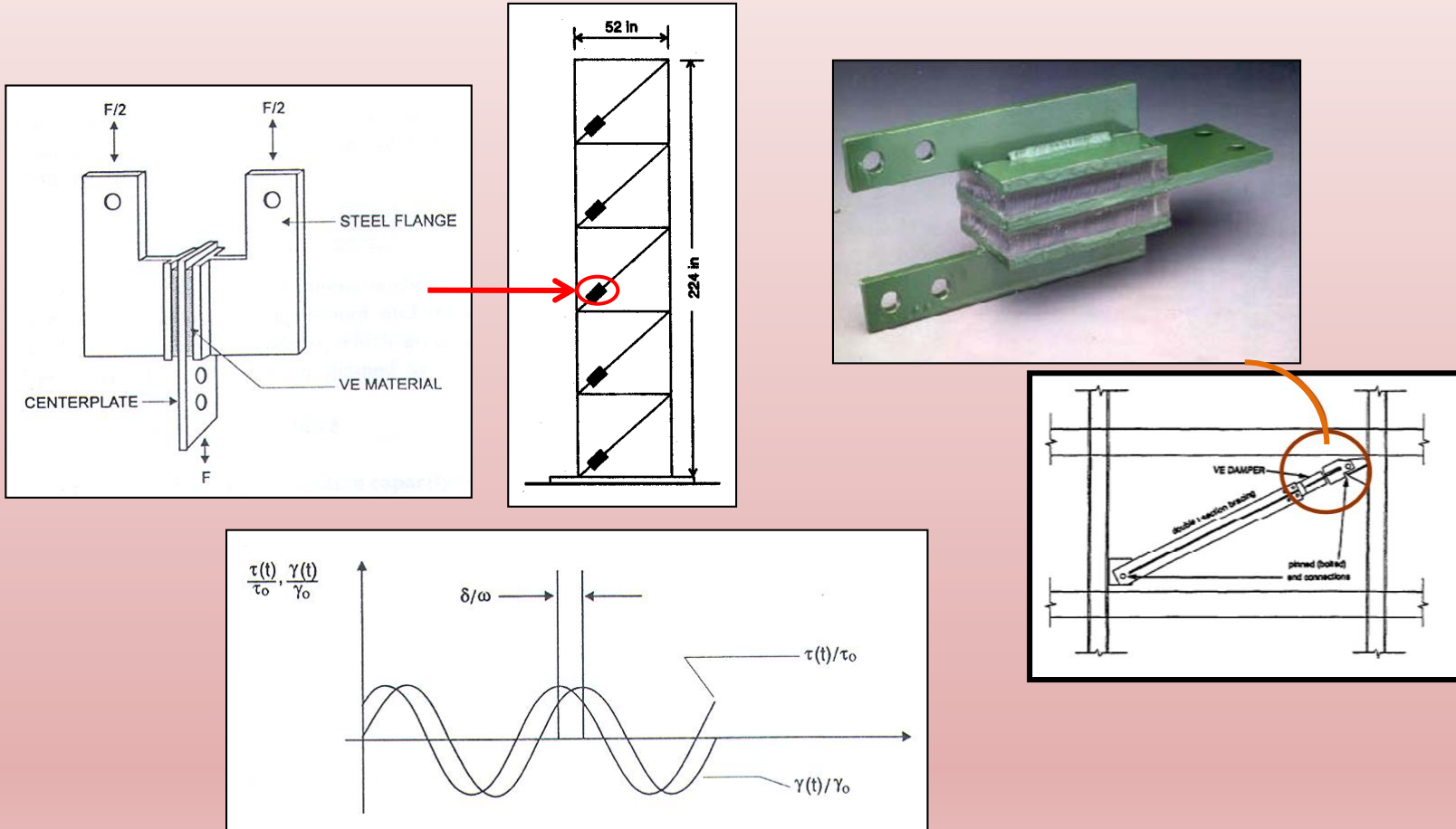
I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

Dispositivi ad attrito «Spring friction damper» (Tipo A o B)



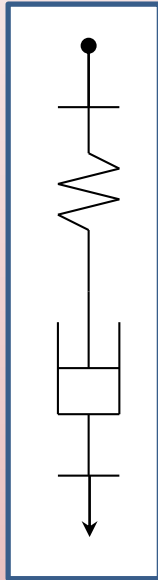
I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

Dispositivi visco-elastici (Tipo B)

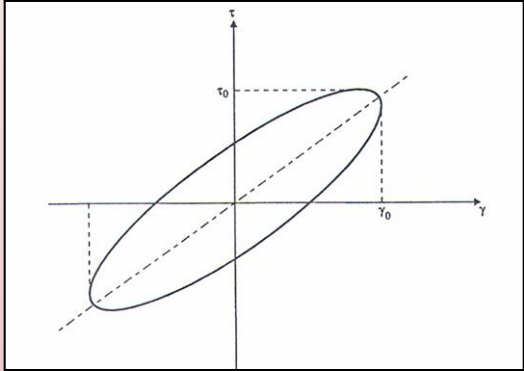


I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

Dispositivi visco-elastici (Tipo B)



$$F_e = F_d = F$$
$$X_e + X_d = X$$



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

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

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

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

I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

Dispositivi visco-elastici (Tipo B)

I moduli G' e G'' sono generalmente funzione della frequenza di eccitazione (ω), della temperatura ambiente (T), della deformazione a taglio (γ), e della temperatura del materiale (θ).

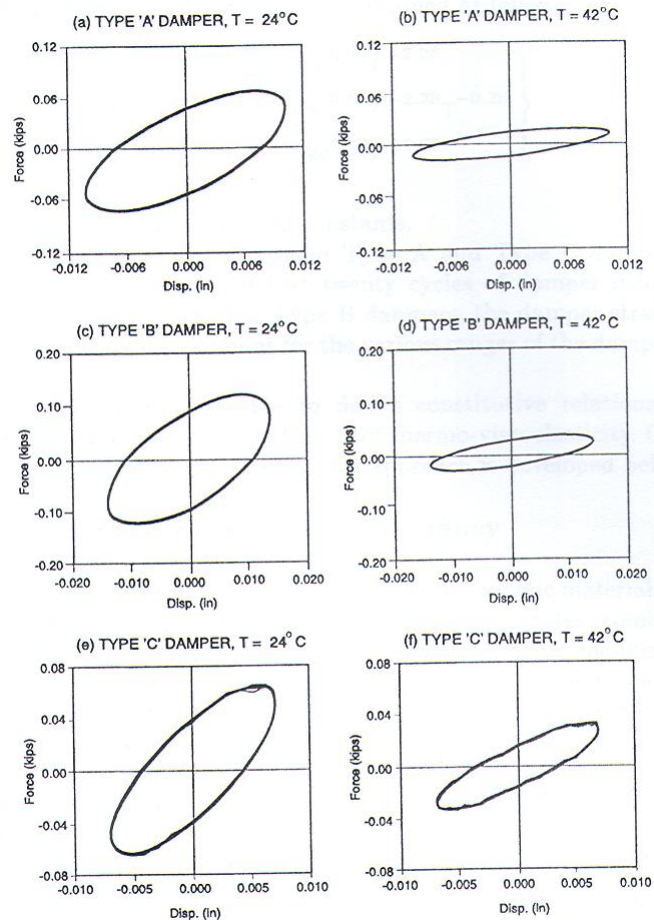
Table 5.1 Viscoelastic Damper Dimensions

Type	Area(in ²)	Thickness (in)	Volume (in ³)
A	$1.0 \times 1.5 = 1.50$	0.20	0.30
B	$2.0 \times 1.5 = 3.00$	0.30	0.90
C	$6.0 \times 3.0 = 18.0$	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)	η
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



I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

Dispositivi visco-elastici (Tipo B)

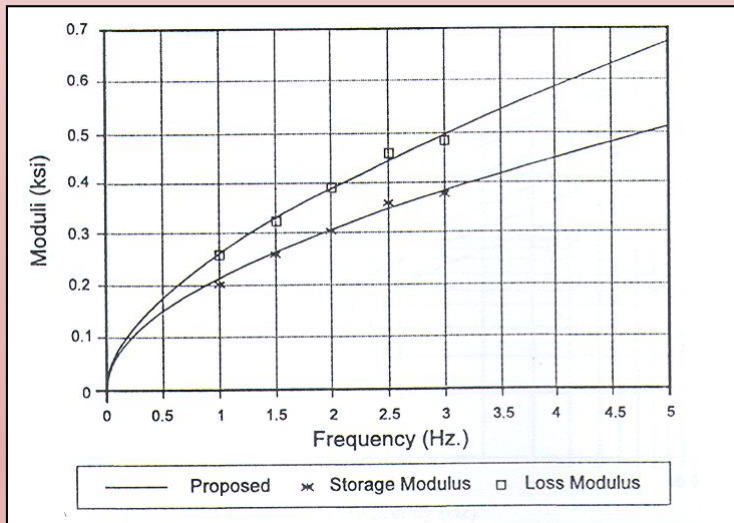
Dipendenza dalla deformazione (γ)

Table 5.3 Typical Damper Properties

Temp. (°C)	Freq. (Hz)	Strain (%)	G' (psi)	G'' (psi)	η
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 (ω)



Dipendenza dalla temperatura interna del materiale (θ)

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: ρ = densità di massa; c_v = calore specifico; κ = coefficiente di conduttività termica;

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

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

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

I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

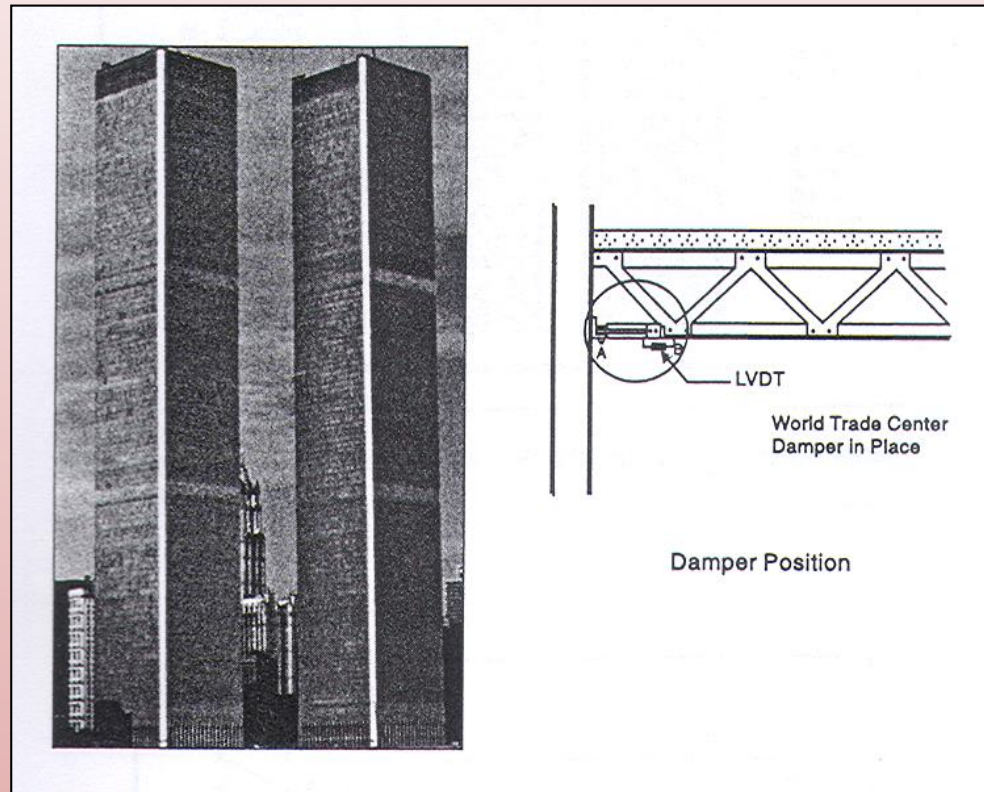
Controventi includenti dispositivi visco-elastici elastomerici (Tipo B)

SCUOLA «GENTILE FERMI», Fabriano



I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

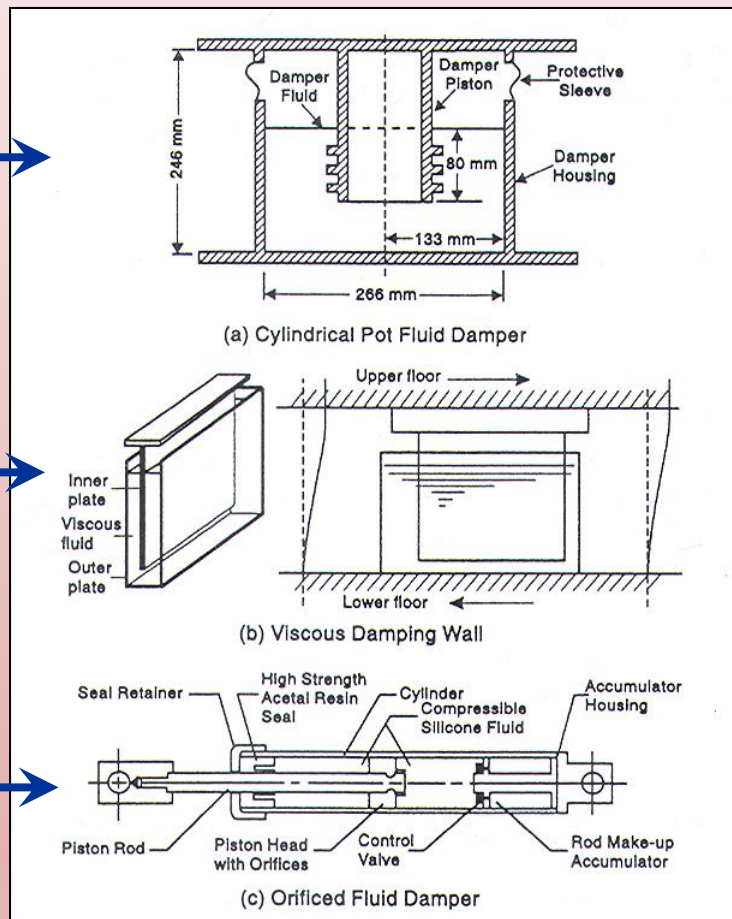
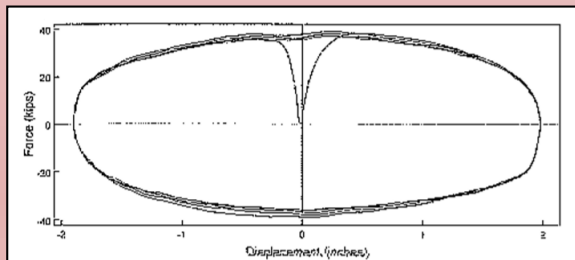
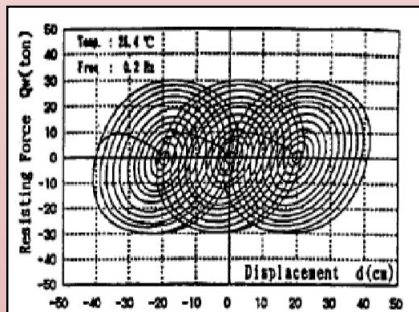
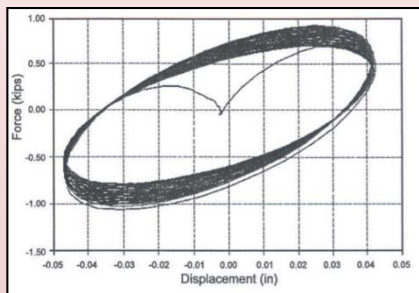
Dispositivi visco-elastici per la riduzione delle vibrazioni indotte dal vento



Twin Towers - World Trade Center, New York

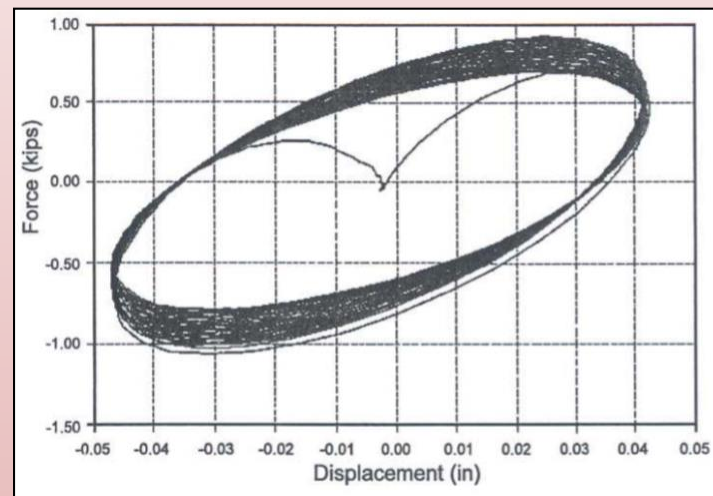
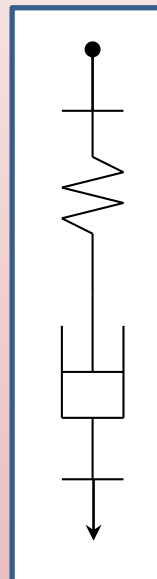
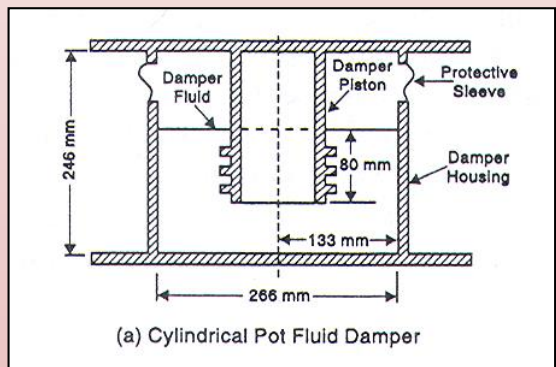
I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

Dispositivi fluidoviscosi (Tipo B)



I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

Dispositivi fluidoviscosi «Cylindrical Pot fluid Dampers» (Tipo B)



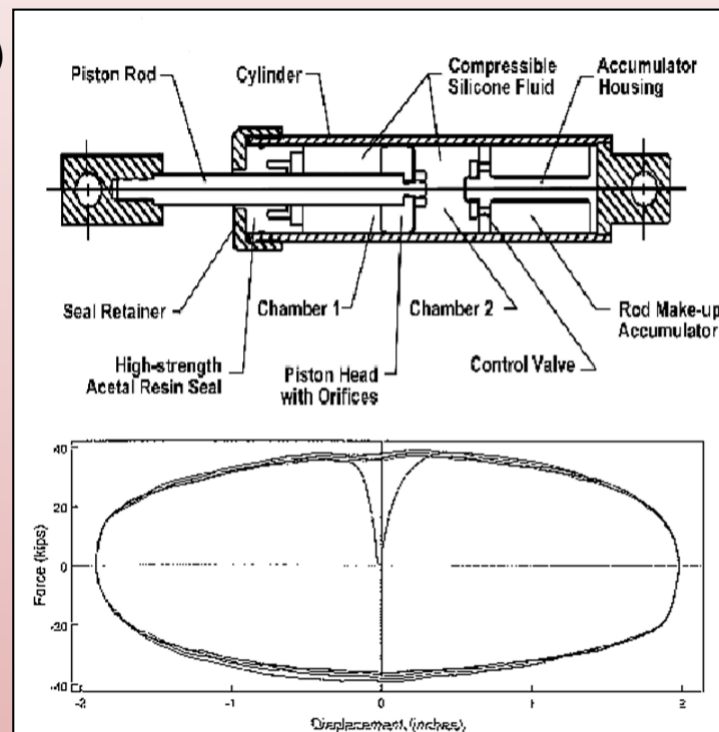
Legge costitutiva conforme al modello reologico di Maxwell, proposta per l'interpretazione del comportamento meccanico di dispositivi fluido-viscosi a base di polibutano, con dipendenza dalla frequenza e dalla temperatura.

I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

Dispositivi fluidoviscosi ad orifizi (Tipo B)

WOODLAND HOTEL, Woodland, California (1927)

Uso dei dispositivi Taylor per un progetto di adeguamento sismico

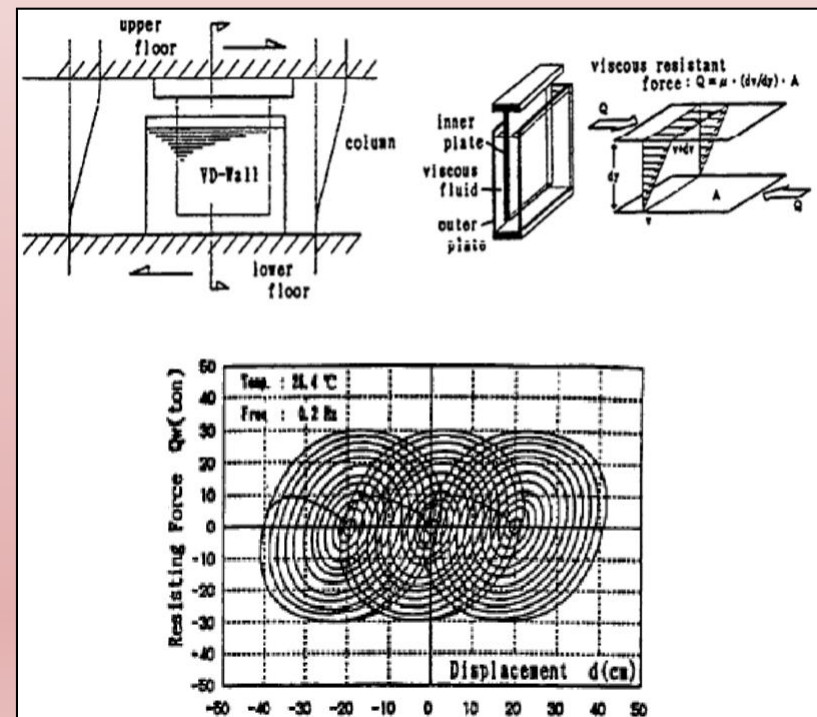
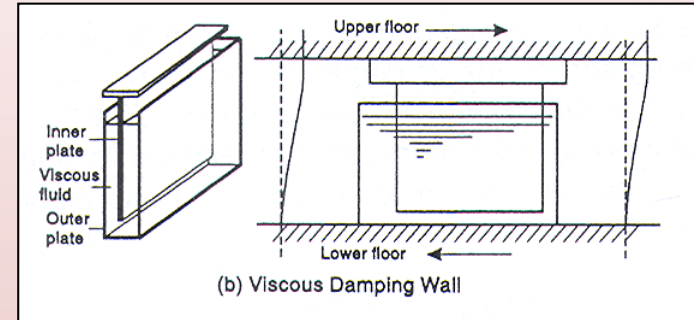
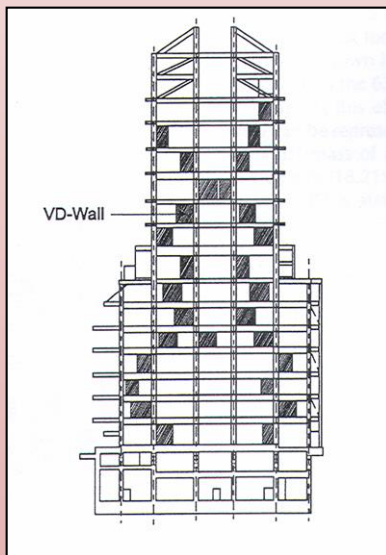


I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

Dispositivi fluidoviscosi «Viscous damping walls» (Tipo B)

SUT-BUILDING, Shizuka City, Japan

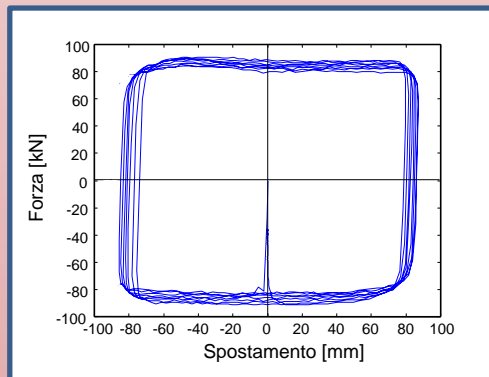
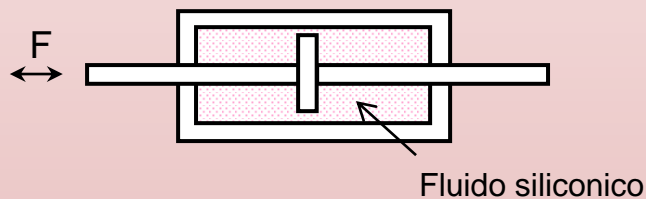
Uso di “viscous damping wall” per un edificio di nuova realizzazione



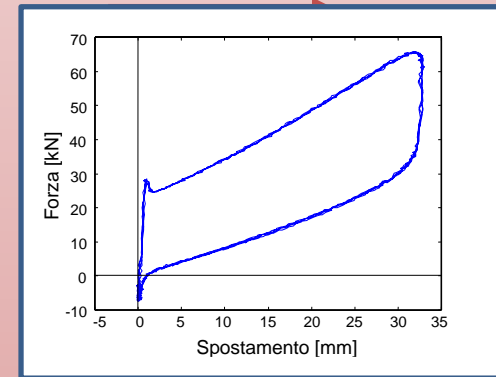
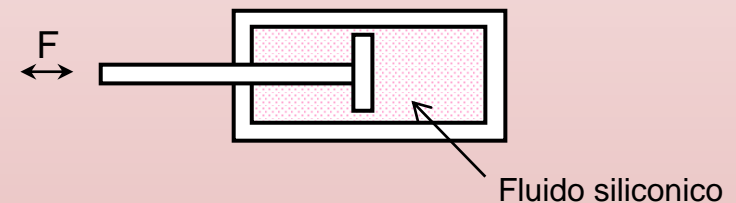
I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

Dispositivi fluidoviscosi pressurizzati a matrice siliconica (Tipo A)

✓ Dissipatore puro



✓ Dispositivo elastico-dissipativo a singolo effetto

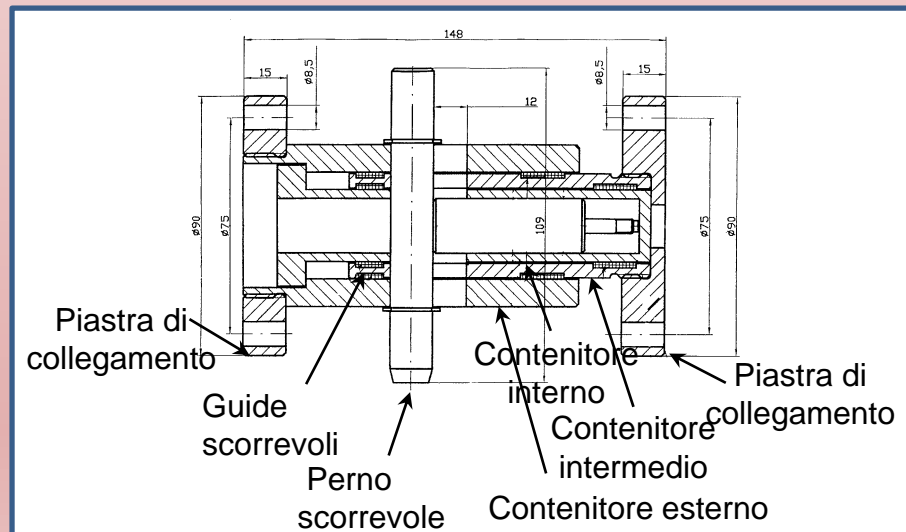
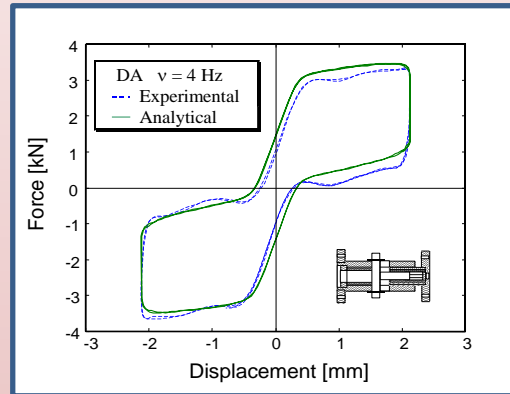


I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

Dispositivi fluidoviscosi pressurizzati a matrice siliconica (Tipo A)

✓ Dispositivo elastico-dissipativo a doppio effetto

a doppio effetto

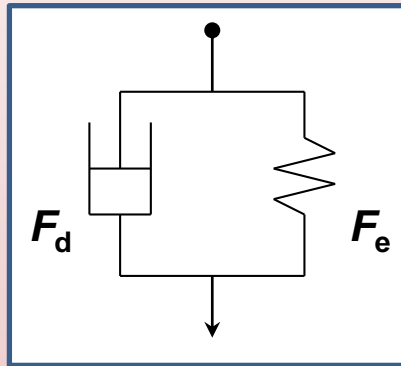


I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

Dispositivi fluidoviscosi pressurizzati a matrice siliconica (Tipo A)

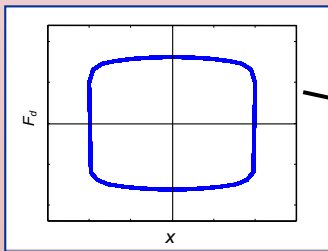
Componente di forza dissipativa

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

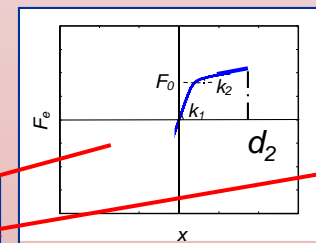


Componente di forza elastica non lineare

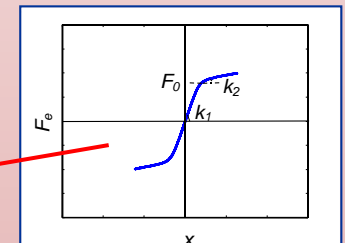
$$F_e(t) = k_2 x(t) + \frac{(k_1 - k_2) x(t)}{\left[1 + \left| \frac{k_1 x(t)}{F_0} \right|^R \right]^{1/R}}$$



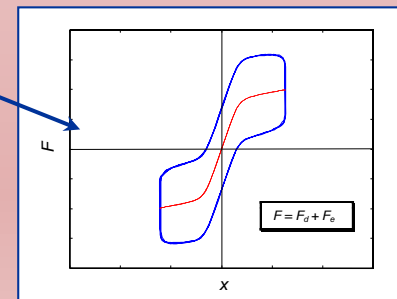
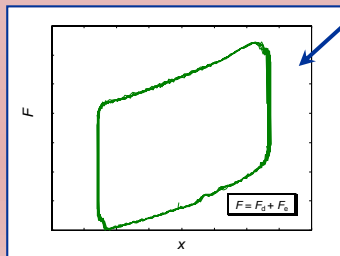
Dispositivo a singolo effetto



Dispositivo a doppio effetto

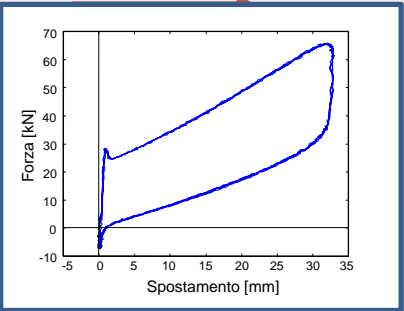


$$F(t) = F_d(t) + F_e(t)$$

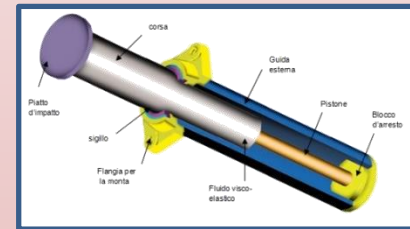


I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

Controventi includenti dissipatori fluidoviscosi a matrice siliconica (Tipo A)



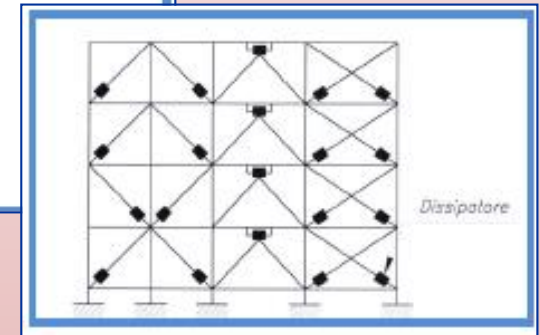
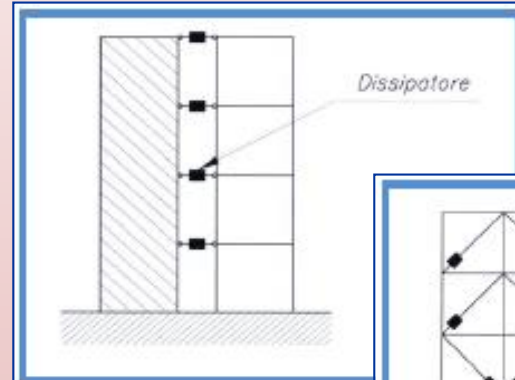
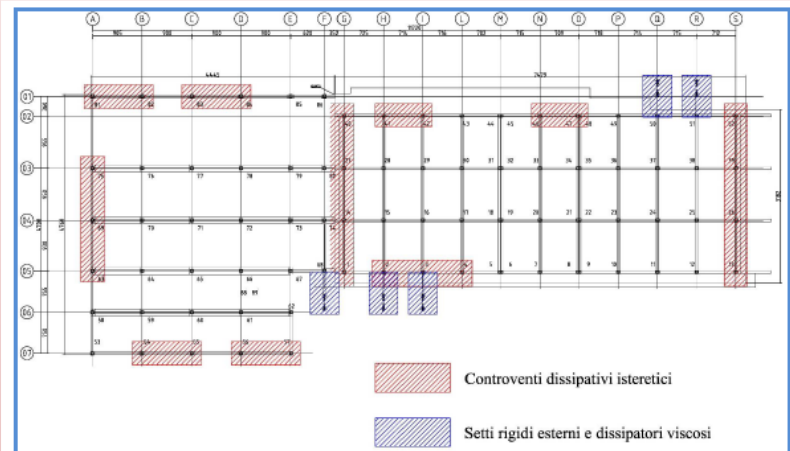
EDIFICIO «Ex-PRETURA», Borgo San Lorenzo



I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

Dissipatori metallici combinati a dissipatori viscosi

COMPLESSO INDUSTRIALE FRATELLI CARLI SPA, Imperia

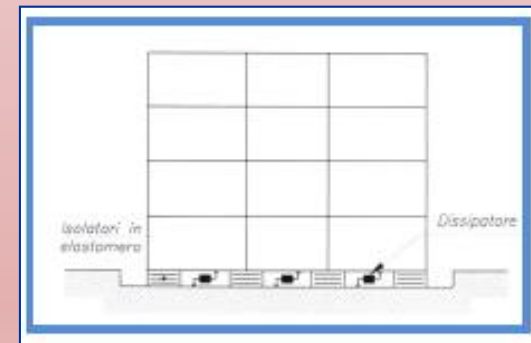
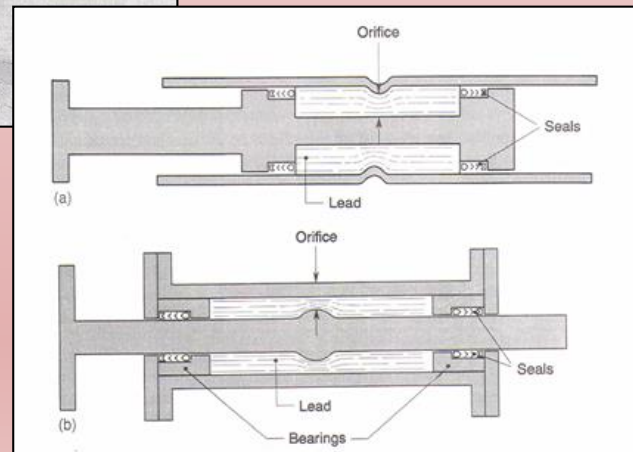
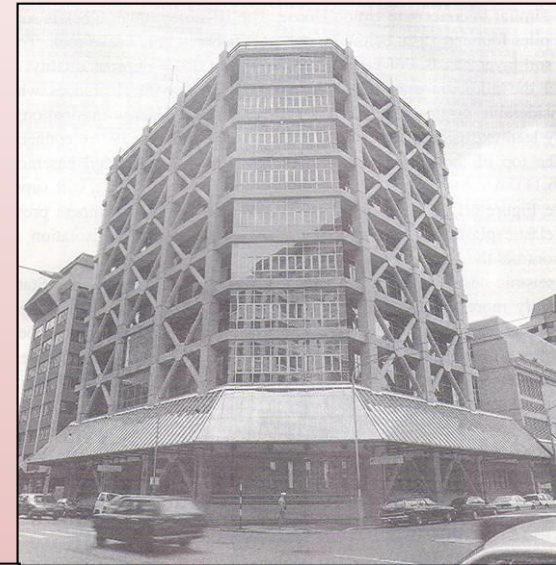
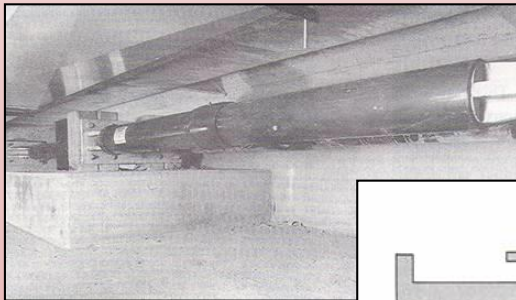


I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

Dissipatori ad estrusione di piombo utilizzati come dispositivi ausiliari del sistema d'isolamento alla base

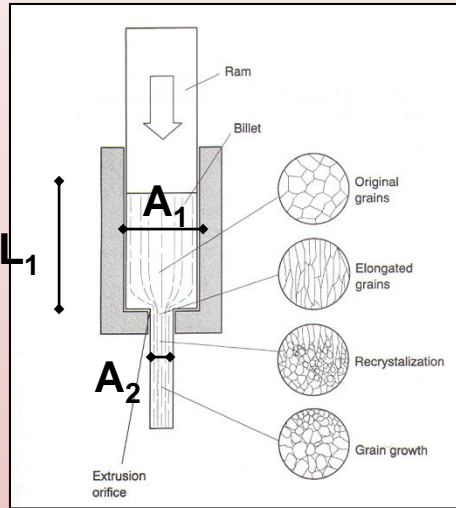
Wellington Central Police Station

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



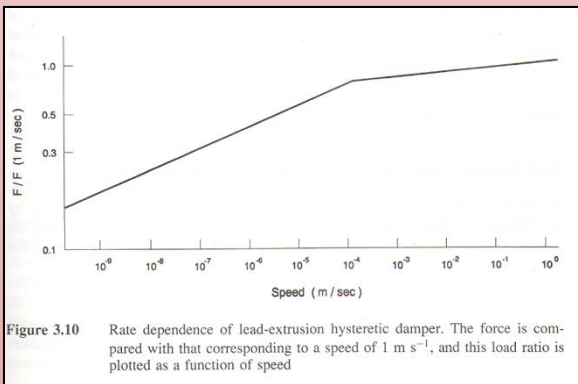
I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

Dispositivi ad estrusione di piombo



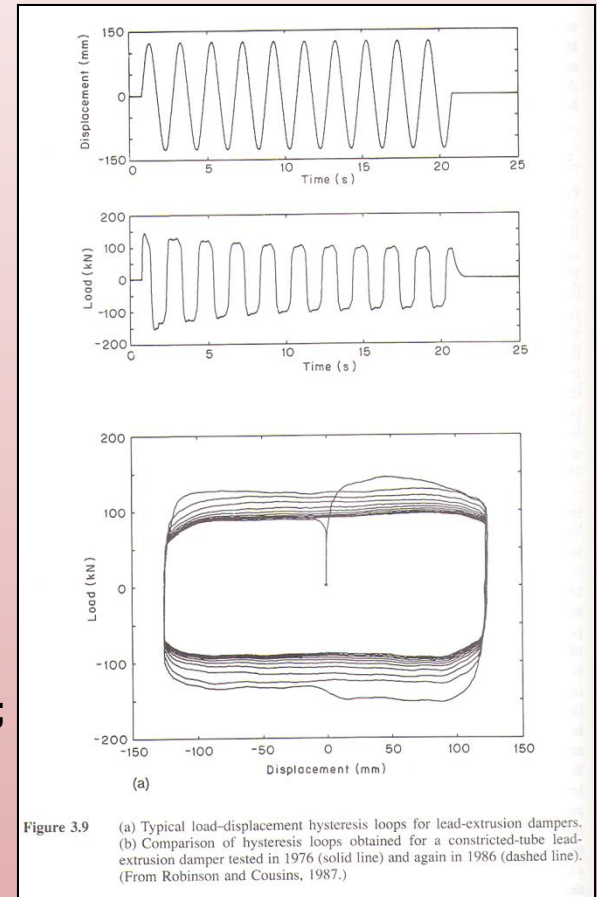
$$W = A_1 L_1 \sigma_y \ln \left[\frac{A_1}{A_2} \right]$$

W = lavoro relativo al processo di estrusione fra le due sezioni A₁ ed A₂;



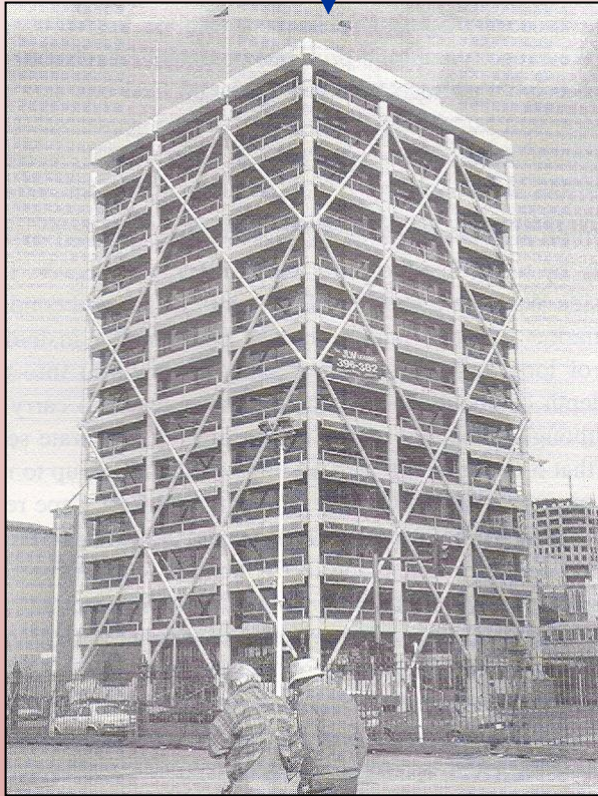
$$p = av^b$$

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



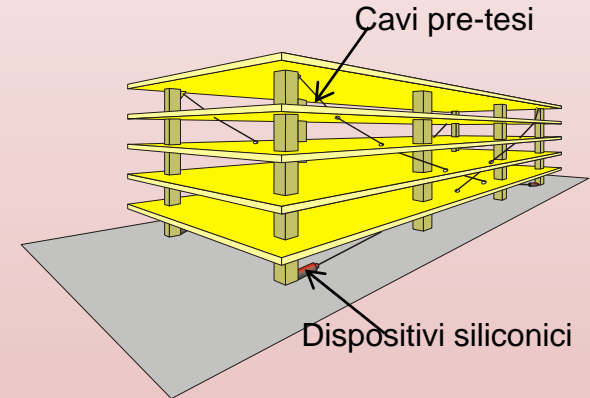
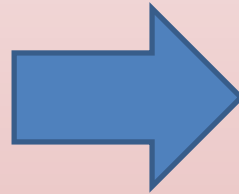
Applicazione di moderne tecnologie di dissipazione supplementare di energia: il sistema a cavi smorzanti

Esempio applicativo di controventi dissipativi coinvolgenti più piani

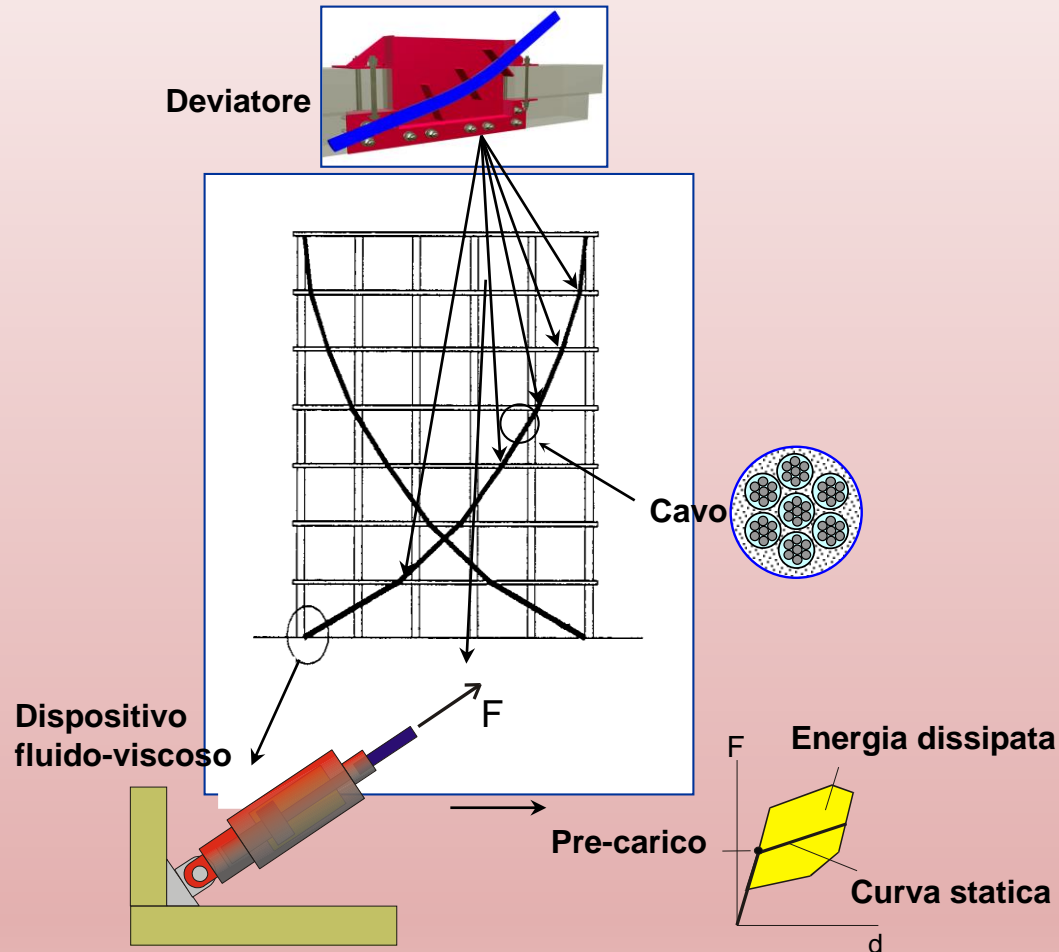


Union House – Auckland City

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

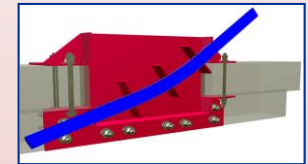
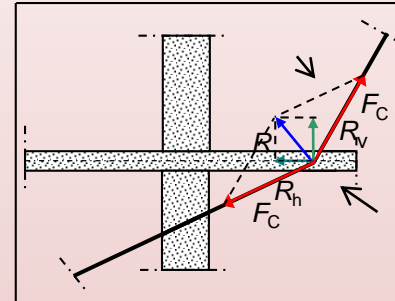


Applicazione di moderne tecnologie di dissipazione supplementare di energia: il sistema a cavi smorzanti per il controllo degli spostamenti globali dell'edificio

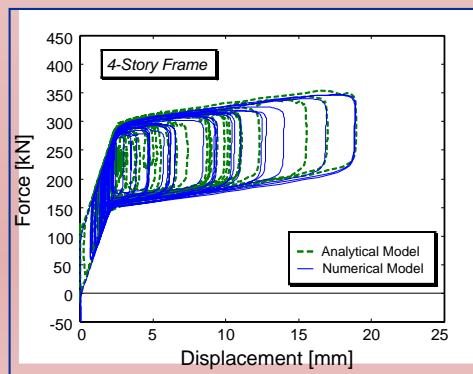
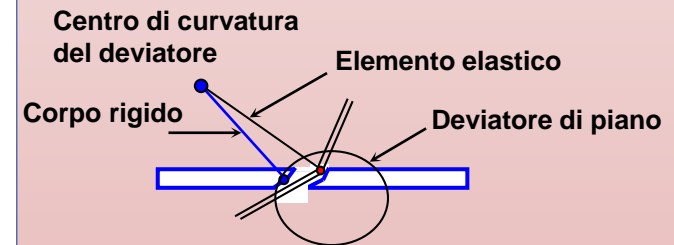
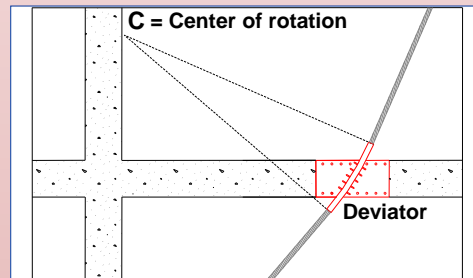


Applicazione di moderne tecnologie di dissipazione supplementare di energia: il sistema a cavi smorzanti per il controllo degli spostamenti globali dell'edificio

Modello analitico: forze agenti a livello di ogni deviatore

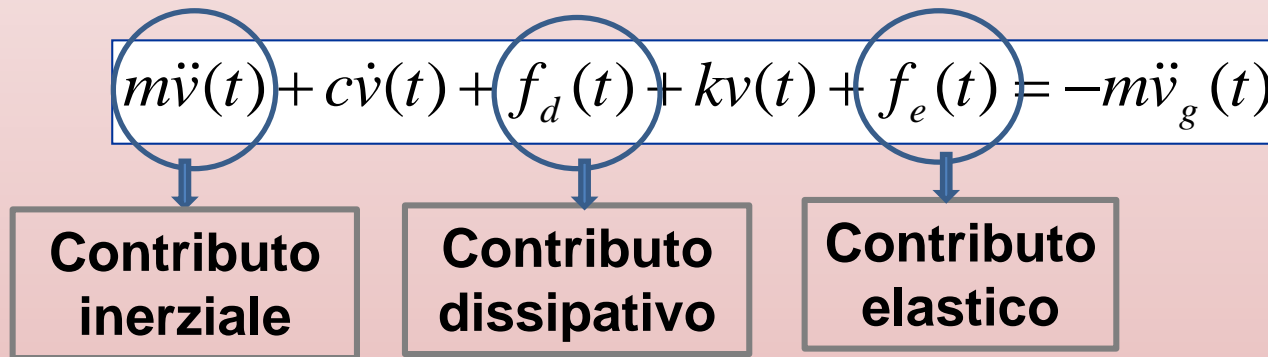


Modello computazionale



Applicazione di moderne tecnologie di dissipazione supplementare di energia: i sistemi dissipativi

- ❖ Di che tipo sono i sistemi di dissipazione supplementare di energia?

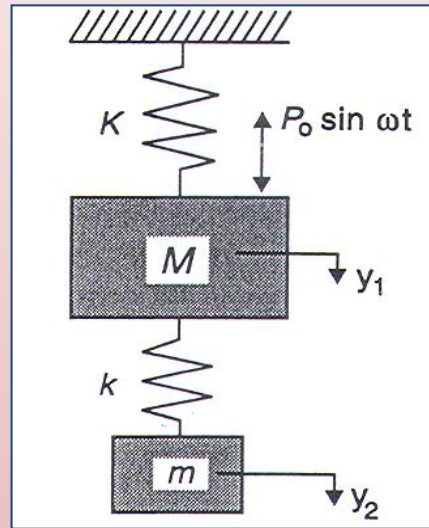


 **Modificano il comportamento dinamico del sistema principale**

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

Applicazione di moderne tecnologie di dissipazione supplementare di energia: i sistemi smorzati

1. Sistemi a massa accordata (TMD)

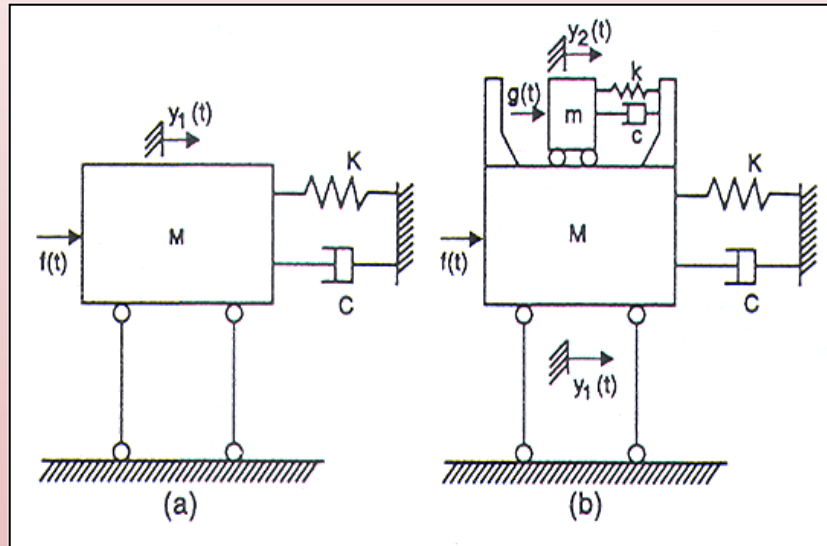


Il concetto di “tuned mass damper” per applicazioni strutturali trae origine dai sistemi di assorbimento delle vibrazioni studiati da Frahm nel 1909 (Den Hartog, 1956), consistenti in una piccola massa m ed in una molla k connessi al sistema principale di massa M e rigidezza K .

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.

Applicazione di moderne tecnologie di dissipazione supplementare di energia: i sistemi smorzati

1. Sistemi a massa accordata (TMD)



$g(t)$ = 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.

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

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

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

Applicazione di moderne tecnologie di dissipazione supplementare di energia: i sistemi smorzati

1. Sistemi a massa accordata (TMD)

- 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 ω ($f(t)=P_0 \sin \omega t$ e $g(t)=0$).

R = fattore di amplificazione della risposta;

$$y_{st} = P_0/K;$$

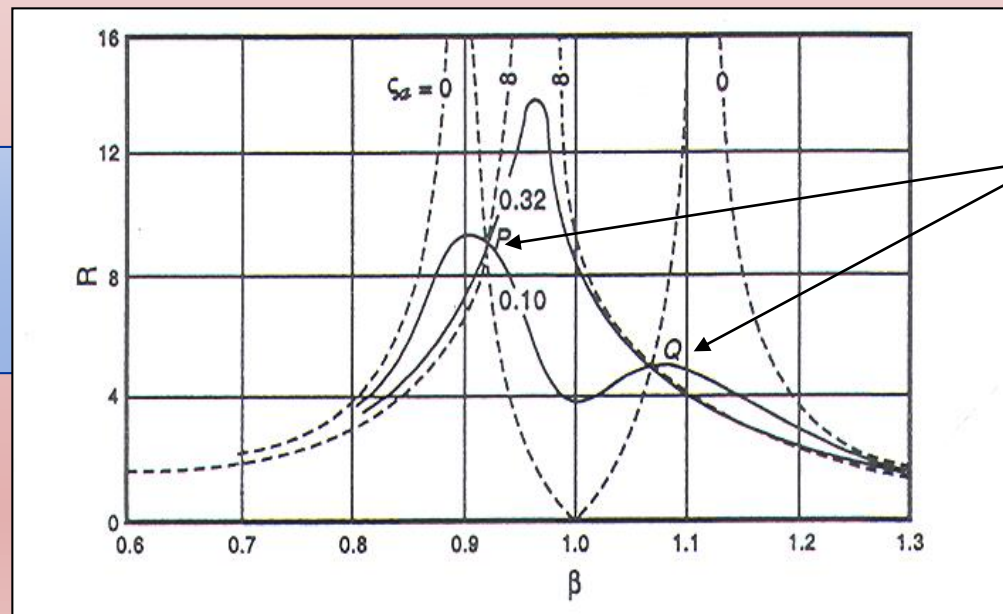
$$\omega_a = \sqrt{k/m}; \quad \omega_s = \sqrt{K/M};$$

$$\zeta_a = c/2m\omega_a;$$

$$\alpha = \omega_a/\omega_s; \quad \beta = \omega/\omega_s.$$

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

Diagrammi R - β per $\alpha=1$ (caso accordato), $\mu=0.05$ e per differenti valori di ζ_a



P e Q
punti
invarianti

Applicazione di moderne tecnologie di dissipazione supplementare di energia: i sistemi smorzati

1. Sistemi a massa accordata (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 β quanto più prossimo ad 1.

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

$$\alpha_{\text{opt}} = \frac{1}{1 + \mu}$$

$$\zeta_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}}$$



$$R(P) = R(Q) = \sqrt{1 + \frac{2}{\mu}}$$

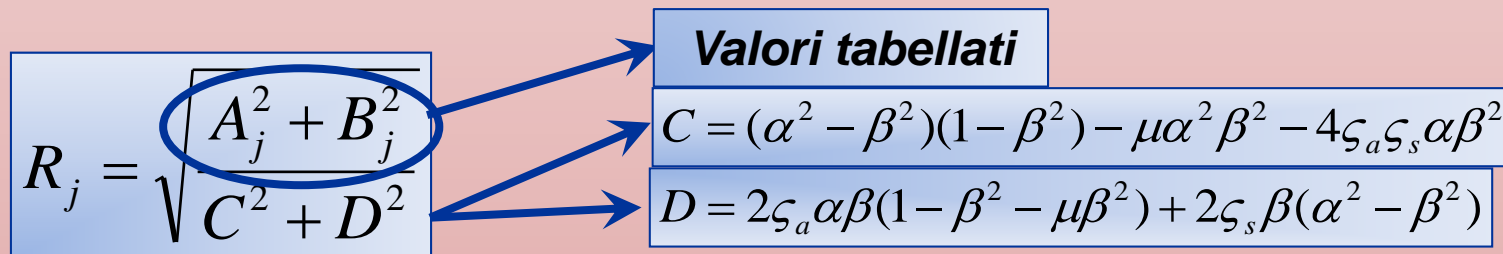
Applicazione di moderne tecnologie di dissipazione supplementare di energia: i sistemi smorzati

1. Sistemi a massa accordata (TMD)

- 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 α e ζ_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:


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

Valori tabellati

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

Applicazione di moderne tecnologie di dissipazione supplementare di energia: i sistemi smorzati

1. Sistemi a massa accordata (TMD)

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

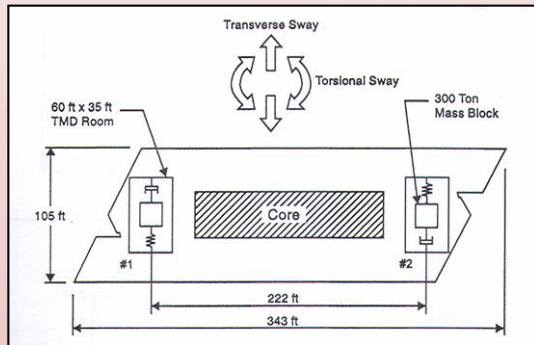
Case	Excitation	Response Parameter Considered	Response Amplitude R_j	A_j	B_j
1	$P_o e^{i\omega t}$	y_1	$\frac{K y_1}{P_o}$	$\alpha^2 - \beta^2$	$2\zeta_a \alpha \beta$
2	$P_o e^{i\omega t}$	\dot{y}_1	$\frac{K \dot{y}_1}{P_o \omega_s}$	$-2\zeta_a \alpha \beta^2$	$\beta(\alpha^2 - \beta^2)$
3	$P_o e^{i\omega t}$	\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 moderne tecnologie di dissipazione supplementare di energia: i sistemi smorzati

1. Sistemi a massa accordata (TMD - Tuned Mass Dampers)



John Hancock, Boston, MA

Citygroup Center New, New York, NY

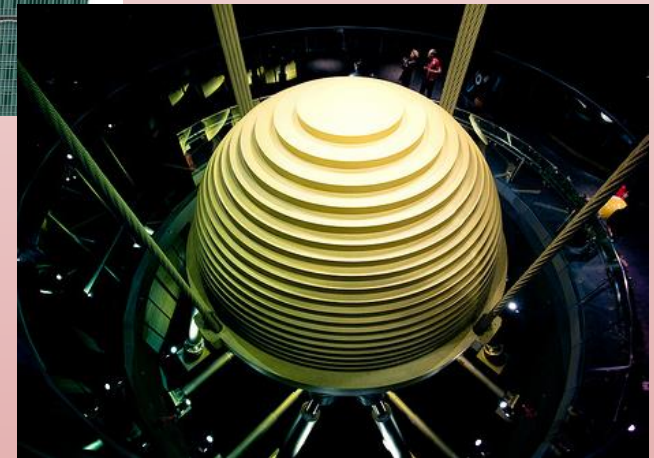


		John Hancock Boston, MA	Citicorp Center New York, NY
Typical floor size	(ft)	343 x 105	160 x 160
Floor area	(sq ft)	36,015	25,600
Building height	(ft)	800	920
Building modal weight	(tons)	47,000	20,000
Building period 1st mode	(sec)	7.00	6.25
Design wind storm	(years)	100	30
Mass block weight	(tons)	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

Applicazione di moderne tecnologie di dissipazione supplementare di energia: i sistemi smorzati

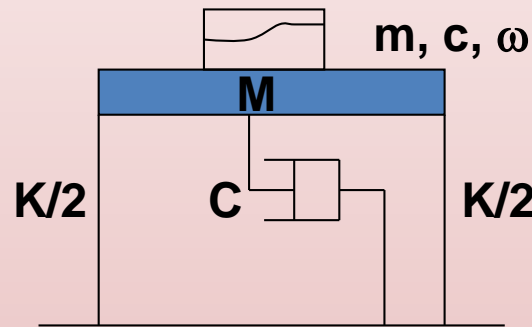
1. Sistemi a massa accordata (TMD - Tuned Mass Dampers)



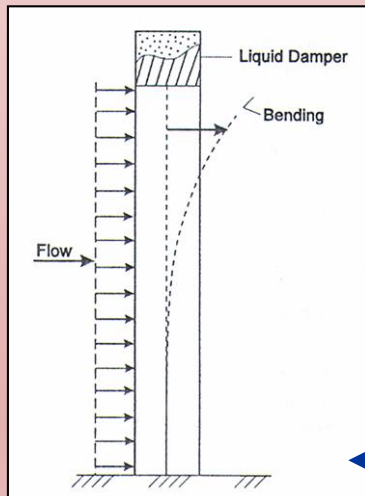
Taipei 101, Taipei, Taiwan (2004) - Il Taipei 101 ospita lo smorzatore a massa accordata più grande del mondo (660 tonnellate)

Applicazione di moderne tecnologie di dissipazione supplementare di energia: i sistemi smorzati

2. Sistemi a liquido accordato (TLD - Tuned Liquid Dampers)



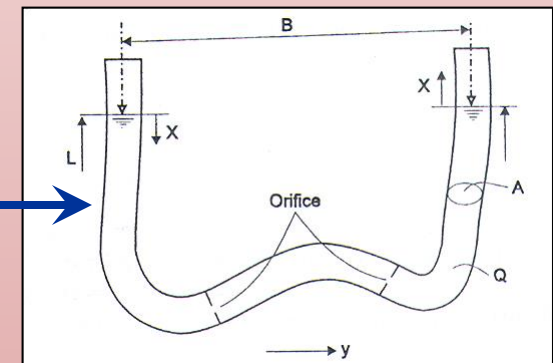
Fluidi insolubili



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.

Moto toroidale



Applicazione di moderne tecnologie di dissipazione supplementare di energia: i sistemi smorzati

2. Sistemi a liquido accordato (TLD - Tuned Liquid Dampers)

- Contrariamente a quanto si verifica nel caso dei TMD (generalmente con comportamento lineare, descrivibile tramite costanti di massa μ , frequenza α e smorzamento ζ_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)

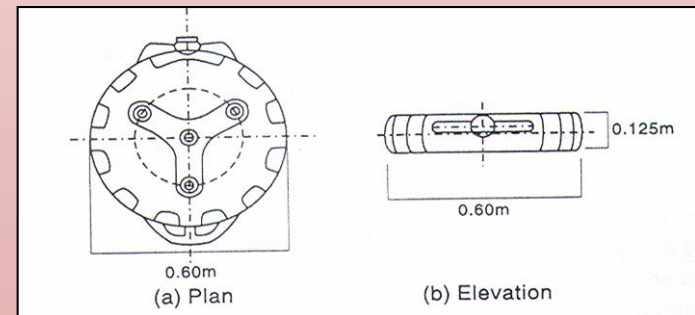
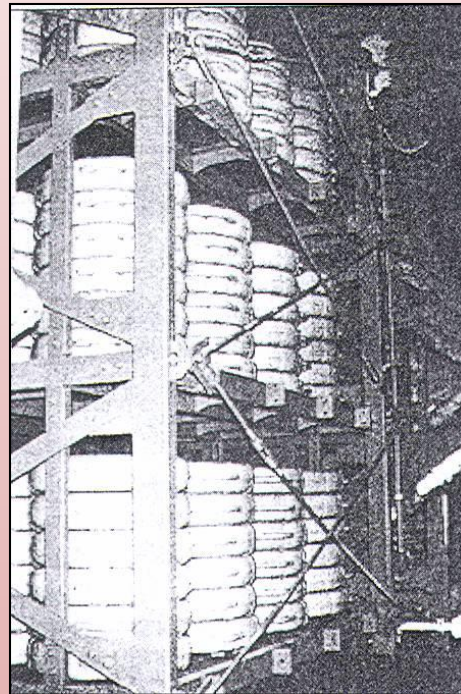
$$m_v = m \frac{(1 - \Omega^2) + (2\zeta_a \Omega)^2}{(1 - \Omega^2)^2 + (2\zeta_a \Omega)^2}$$

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

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

Applicazione di moderne tecnologie di dissipazione supplementare di energia: i sistemi smorzati

2. Sistemi a liquido accordato (TLD - Tuned Liquid Dampers)



Torre dell'aeroporto Haneda a Tokyo

Applicazione di moderne tecnologie di dissipazione supplementare di energia: i sistemi smorzati

2. Sistemi a liquido accordato (TLD - Tuned Liquid Dampers)

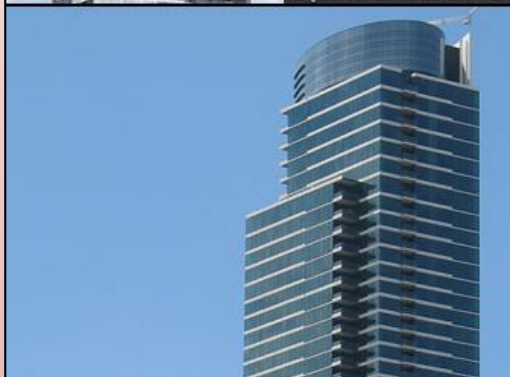
One Rincon Hill Tower (2008) – S. Francisco



Applicazione di moderne tecnologie di dissipazione supplementare di energia: i sistemi smorzati

2. Sistemi a liquido accordato (TLD - Tuned Liquid Dampers)

One Rincon Hill Tower (2008) - S. Francisco



Principali riferimenti

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

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.

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 (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.

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.
- L. Vergari, I. Costoli, G. Terenzi, P. Spinelli (2017). Analisi di vulnerabilità sismica ed interventi di adeguamento per dissipazione supplementare di energia di un edificio ad uso scolastico. *Atti del XVII Convegno Nazionale ANIDIS*, Pistoia, 17-21 settembre 2017, ISBN: 978-886741-8541, SS06-114
- G. Terenzi, E. Rossi (2018). Seismic analysis and retrofit of the oldest R/C elevated water tank in Florence. *Bulletin of Earthquake Engineering*, DOI: 10.1007/s10518-017-0306-4; ID SCOPUS: 2-s2.0-85041301578, July 2018, Volume 16, Issue 7, pp 3081–3102.
- G. Terenzi (2018). Energy-based design criterion of dissipative bracing systems for seismic retrofit of framed structures. *Applied Sciences*, 8, 268; DOI:10.3390/app8020268, www.mdpi.com/journal/applsci; ID SCOPUS: 2-s2.0-85041834540
- G. Terenzi, I. Costoli, S. Sorace, P. Spinelli (2018). Verification of an energy-based design procedure for seismic retrofit of a school building. *14th International Conference on Building Pathology and Constructions Repair, CINPAR 2018*, 20-22 June 2018, Firenze, Italy.

- Lazan, B.J. (1968). *Damping of materials and members in structural mechanics*, Pergamon Eds, Oxford.
- Soong, T.T., and Dargush, G. F. (1997). *Passive energy dissipation systems in structural engineering*, J. Wiley & Sons Eds., New York
- 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.
- Song, G., Ma, N., Li, H.-N. (2006). Applications of shape memory alloys in civil structures, *Engineering Structures*, Vol. 28, pp. 1266-1274.
- Skinner, R.I., Robinson, W.H., Mc Verry, G.H. (1993). *An introduction to seismic isolation*, J. Wiley & Sons Eds.
- Martinez-Romero, E. (1993). *Experiences on the use of supplemental energy dissipators on building structures*, *Earthquake Spectra*, (9)3, 581-624.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

- 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.
- Warburton, G.B. (1982). *Optimal absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters*, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 10, 381-401.
- Petersen, N.R. (1980). *Design of large scale TMD*, Structural control, North Holland, 581-596.
- 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.
- 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.
- 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.