



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 A*

Prof.ssa Ing. Gloria Terenzi

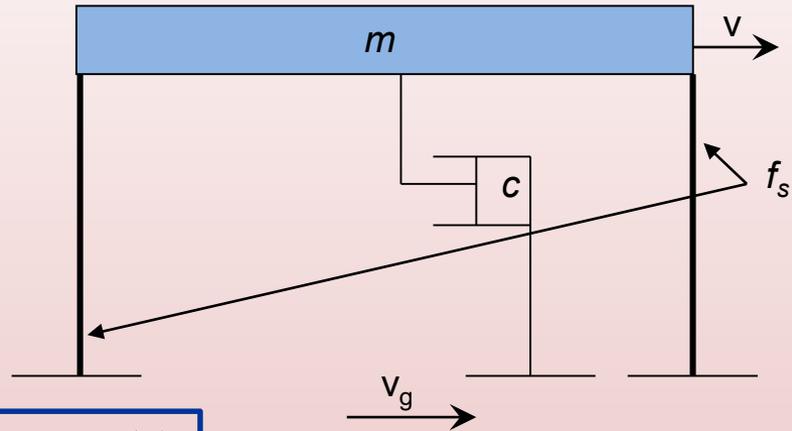
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Firenze

Progettazione tradizionale

Approccio per duttilità

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

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



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

Obiettivi progettuali:

$(P_{VR}$ del 63%/ V_R) LS2 → SLD

$(P_{VR}$ del 10%/ V_R) LS3 → SLV

si ammette il danno strutturale, conferendo alla struttura una prestabilita capacità di duttilità

Definizione dell'intensità dell'azione

D.M. 17 gennaio 2018

§ 3.2.1. Stati limite e relative probabilità di superamento

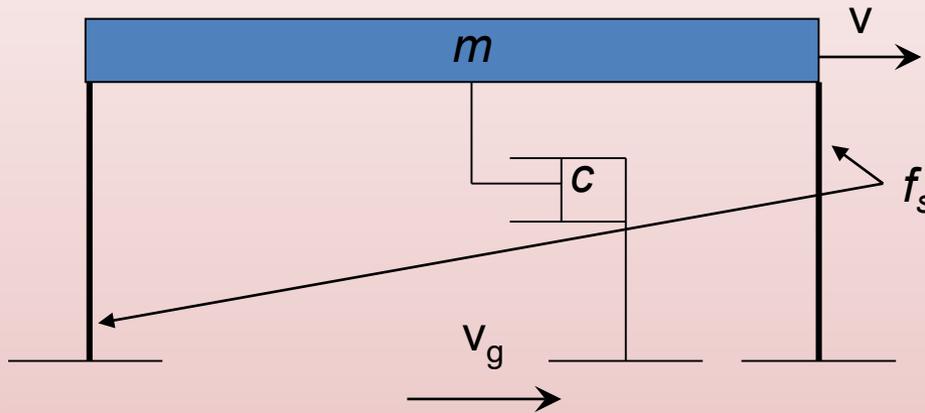
Tab. 3.2.I – Probabilità di superamento P_{VR} in funzione dello stato limite considerato

Stati Limite	P_{VR} : Probabilità di superamento nel periodo di riferimento V_R	
Stati limite di esercizio	SLO	81%
	SLD	63%
Stati limite ultimi	SLV	10%
	SLC	5%

- LS1** → azioni con P_{VR} del 81%/ V_R
- LS2** → azioni con P_{VR} del 63%/ V_R
- LS3** → azioni con P_{VR} del 10%/ V_R
- LS4** → azioni con P_{VR} del 5%/ V_R

Progettazione tradizionale

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

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

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

$$E_i = \int m\dot{v}_t dv_g \longrightarrow \text{Energia in ingresso}$$

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

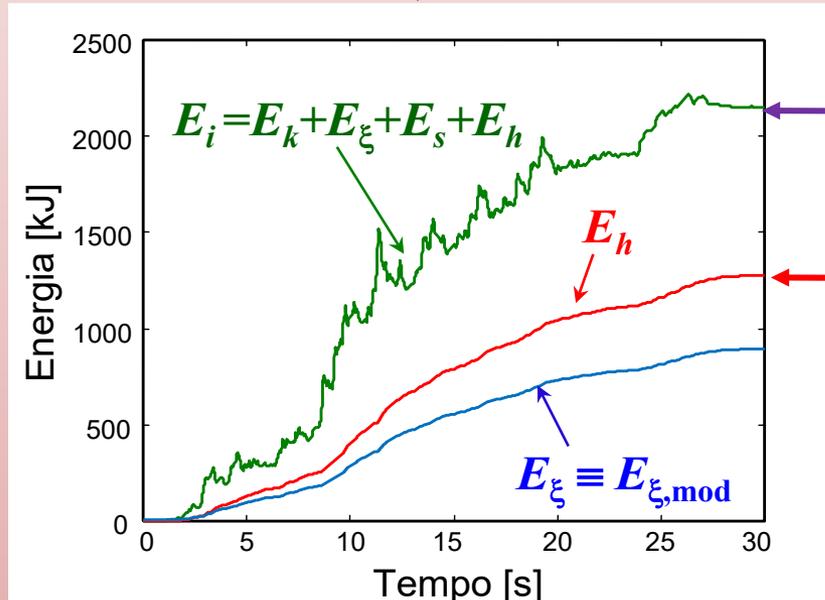
$$E_a = \int f_s dv = E_s + E_h = \frac{(f_s)^2}{2k} + E_h \longrightarrow \text{Energia potenziale elastica ed energia dissipata per isteresi}$$

Progettazione tradizionale

Approccio energetico

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

LS3 → SLV



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

Forte
danneggiamento
della struttura

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

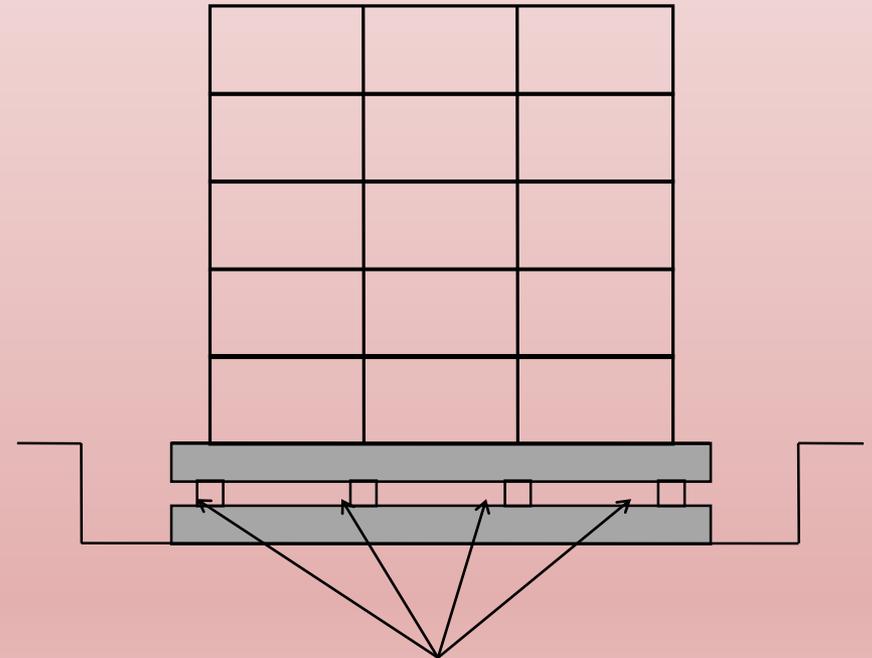
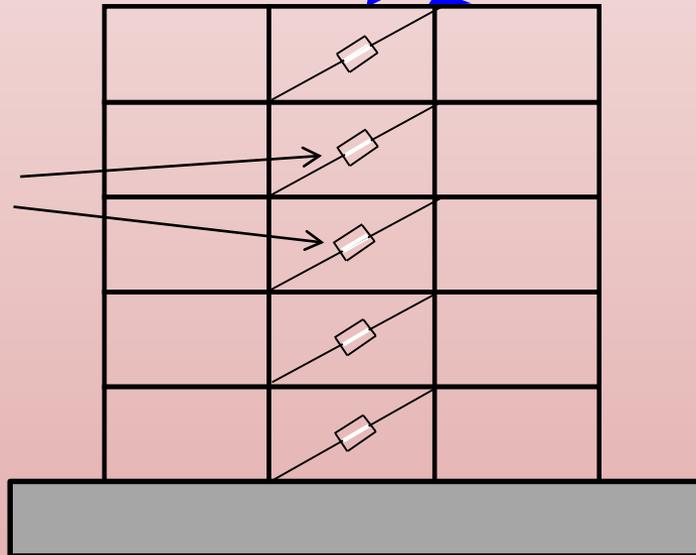
➤ **Tecnologie avanzate di protezione sismica delle strutture**

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

Dissipazione supplementare di energia

Isolamento alla base

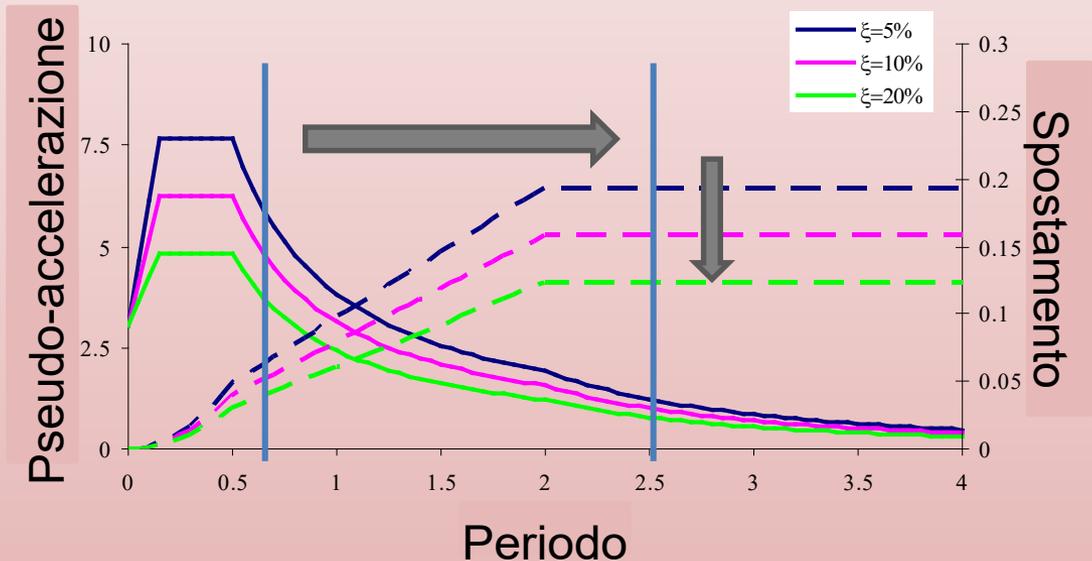
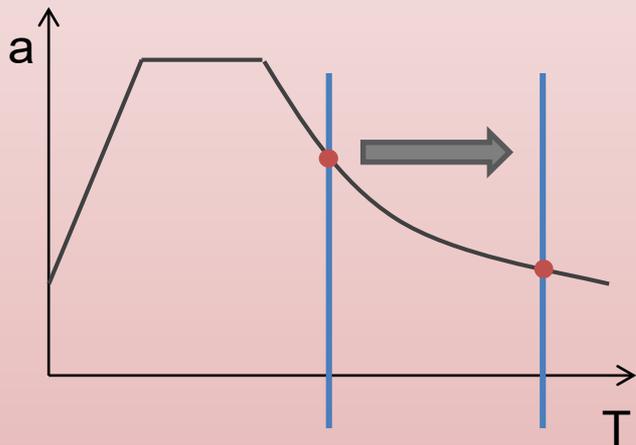
Dispositivi dissipativi



Isolatori

Strategie di protezione sismica

- 1) Riduzione delle azioni per amplificazione del periodo e per limitazione della massima forza orizzontale trasmessa



Le prestazioni dell'isolamento possono essere migliorate attraverso la dissipazione di una certa aliquota dell'energia meccanica trasmessa dal terreno.

Strategie di protezione sismica

D.M. 17 gennaio 2018 - § 7.10. Costruzioni con isolamento e/o dissipazione

§ 7.10.1. Scopo

Il presente capitolo fornisce criteri e regole per il progetto di costruzioni nuove e per l'adeguamento di quelle esistenti, nelle quali un sistema d'isolamento sismico sia posto al di sotto della costruzione medesima, o sotto una sua porzione rilevante, allo scopo di migliorarne la risposta nei confronti delle azioni sismiche orizzontali.

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

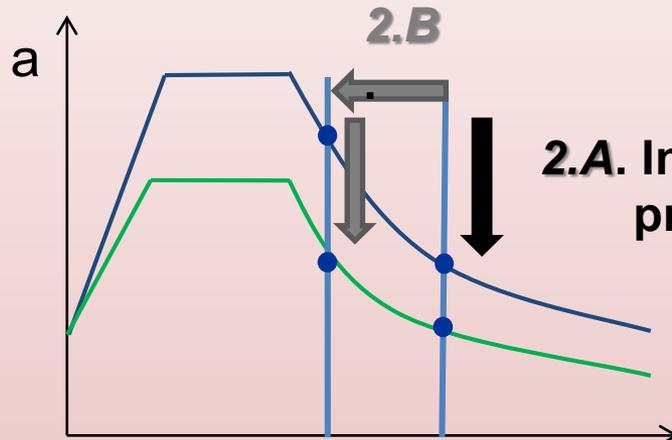
a) **incrementando il periodo fondamentale della costruzione per portarlo nel campo delle minori accelerazioni di risposta;**

**Generalmente
non sono
alternative!**

b) **limitando la massima forza orizzontale trasmessa.**

Strategie di protezione sismica

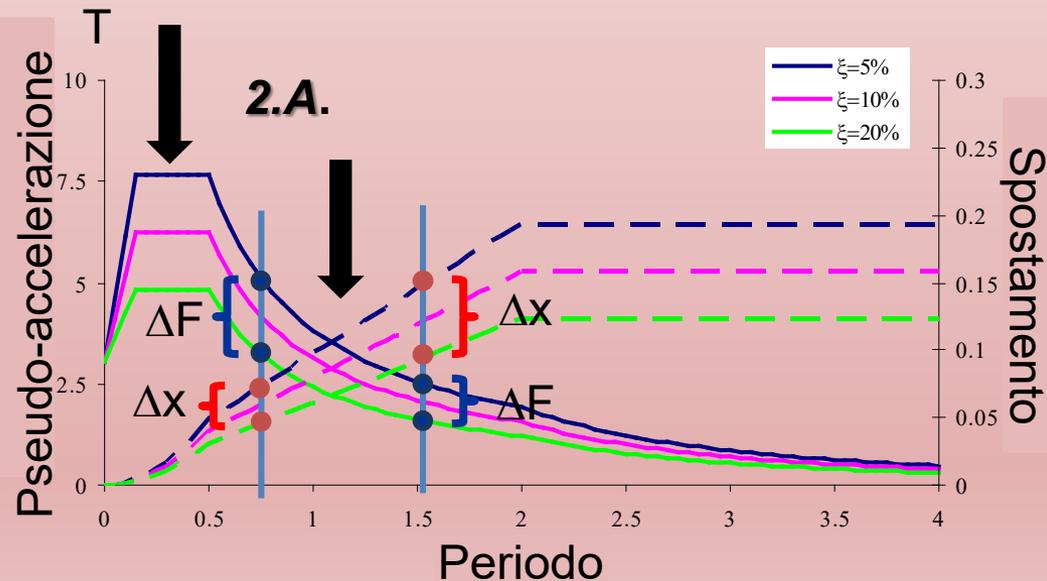
2) Riduzione delle azioni per dissipazione di energia



2.A. Inclusione di dispositivi preminentemente dissipativi

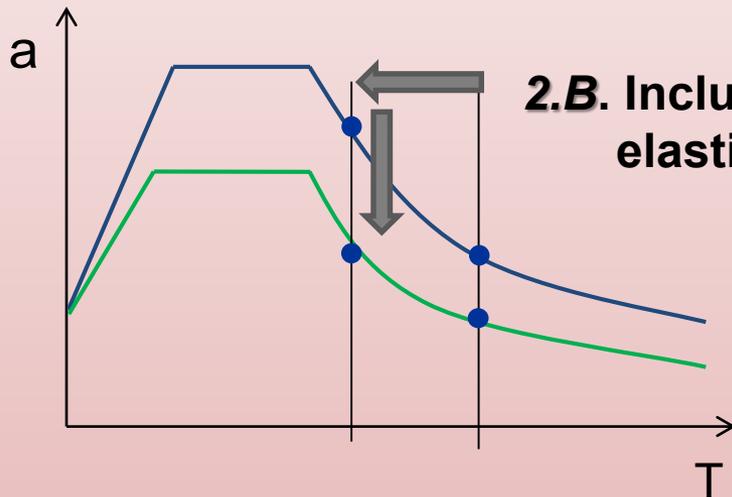
E' preferibile adottare la soluzione **2.A.** per periodi $T \leq 1$ s.

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



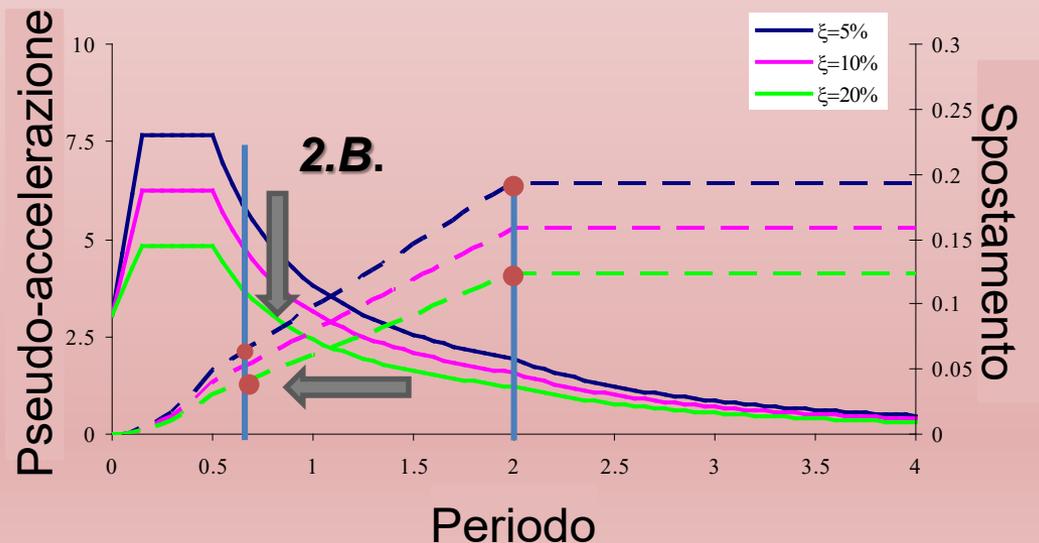
Strategie di protezione sismica

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.



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

D.M. 17 gennaio 2018 - § 7.10. Costruzioni con isolamento e/o dissipazione

§ 7.10.1. Scopo

.....

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.

C.M. n. 7, 21 gennaio 2019

.... **Per questi schemi applicativi (*controventi dissipativi*) lo spostamento interpiano prodotto dal sisma attiva i meccanismi di dissipazione di energia prima che gli spostamenti relativi possano produrre danni significativi sugli elementi strutturali.....**



Se il dispositivo prescelto è del tipo giusto e dimensionato adeguatamente!

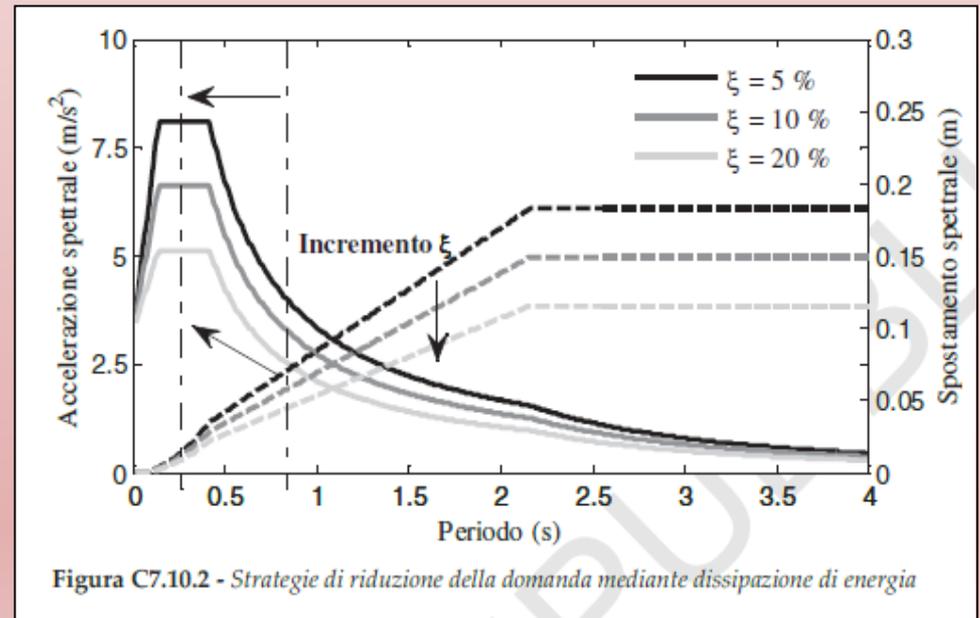
Strategie di protezione sismica

C.M. n. 7, 21 gennaio 2019 - §C7.10.1

.... Facendo riferimento alle forme tipiche degli spettri di risposta elastici delle accelerazioni e degli spostamenti di Fig. C7.10.2, il comportamento di una struttura dotata di dispositivi dissipativi, assimilata ad oscillatore elementare, può essere interpretato osservando che l'introduzione del sistema di dissipazione produce un aumento dello smorzamento e, se il sistema determina un irrigidimento della struttura, una riduzione del periodo, oltreché, per molti sistemi di uso corrente, un aumento della resistenza complessiva.

Ciò determina una sensibile riduzione degli spostamenti complessivi (si vedano gli spettri di spostamento) e, quindi, degli spostamenti interpiano, con conseguente riduzione dei danni agli elementi strutturali e non.....

Se il dispositivo prescelto si attiva prima che si danneggi la tamponatura!



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

Strategie di protezione sismica



Trattazione del problema ricorrendo all'approccio energetico

C.M. n. 7, 21 gennaio 2019

.... Per questi schemi applicativi (*controventi dissipativi*) lo spostamento interpiano prodotto dal sisma attiva i meccanismi di dissipazione di energia prima che gli spostamenti relativi possano produrre danni significativi sugli elementi strutturali.....

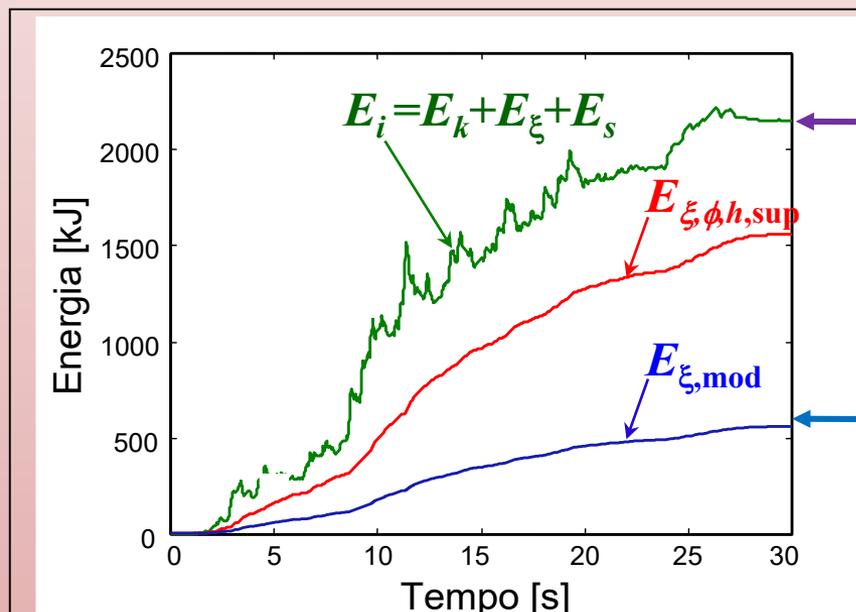
.... In tal modo la maggior parte dell'energia in entrata viene immagazzinata e dissipata nei dispositivi, mentre la funzione di sostegno dei carichi verticali rimane attribuita alla struttura convenzionale.»

Applicazione di moderne tecnologie di dissipazione supplementare di energia

Approccio energetico

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

LS3 → SLO/SLD



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

Pressoché nullo
danneggiamento
della struttura

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

Applicazione di moderne tecnologie di dissipazione supplementare di energia

Importanza della definizione del termine

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

e della sua correlazione con la componente modale

$$E_{\xi}$$

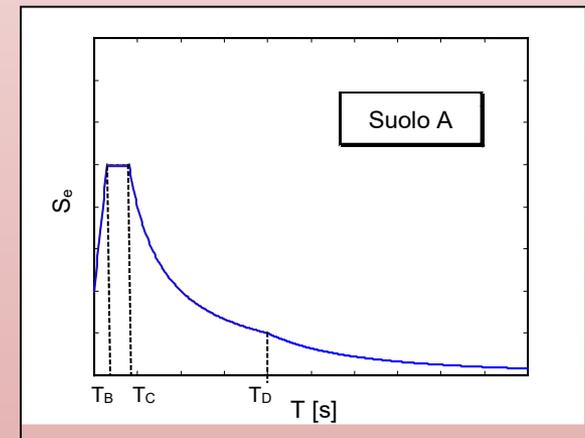
NTC2018 - §3.2.3.2 **Spettro di risposta elastico in accelerazione**

«.....smorzamento convenzionale ξ del 5%»

.....

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

..... η è il fattore che modifica lo spettro elastico per coefficienti di smorzamento viscosi convenzionali ξ diversi dal 5%

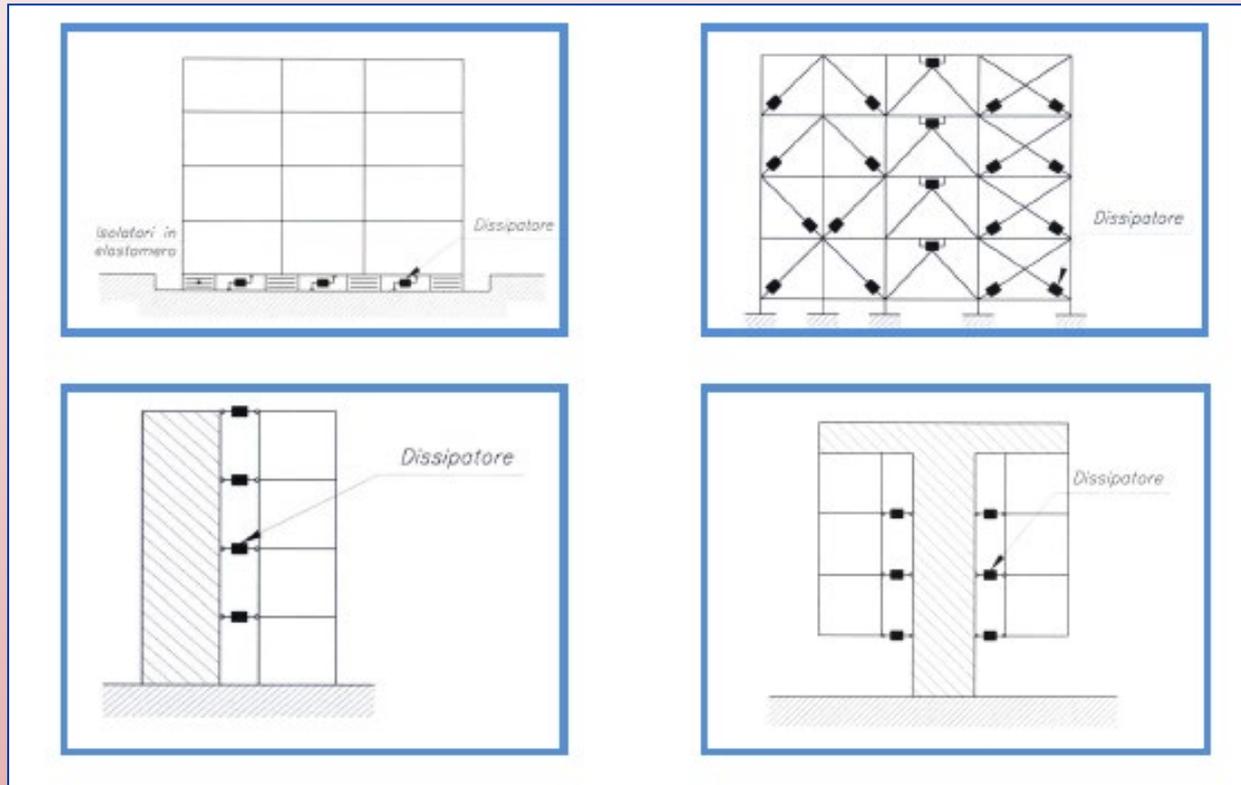


$$\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)} \leq 0,55$$

$$\xi \leq 28\%$$

Applicazione di moderne tecnologie di dissipazione supplementare di energia

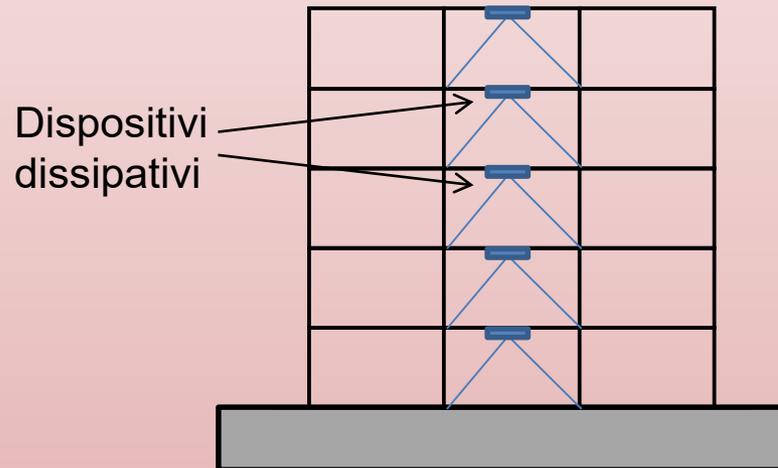
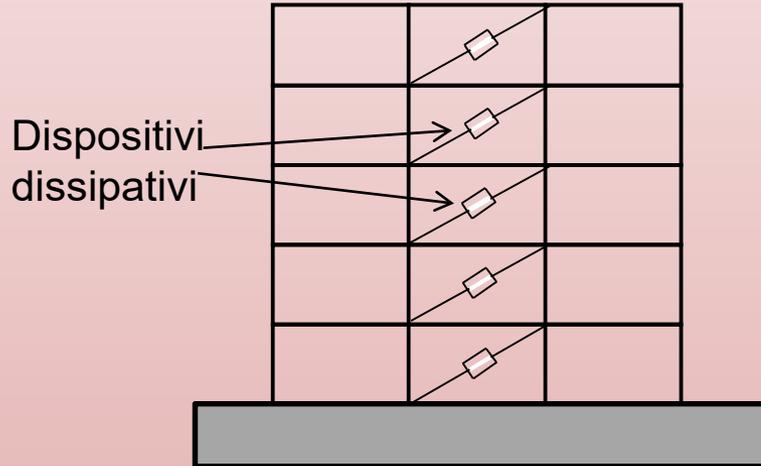
❖ **Come si dispongono rispetto all'alzato?**



La loro disposizione dipende dalla *tipologia di dispositivo* e dalla *problematica rispetto alla quale si richieda una dissipazione supplementare di energia*

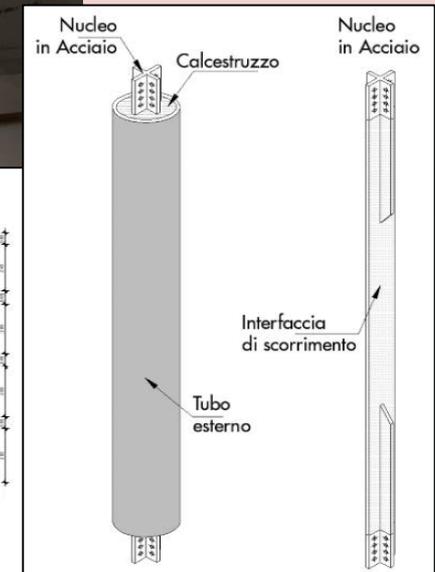
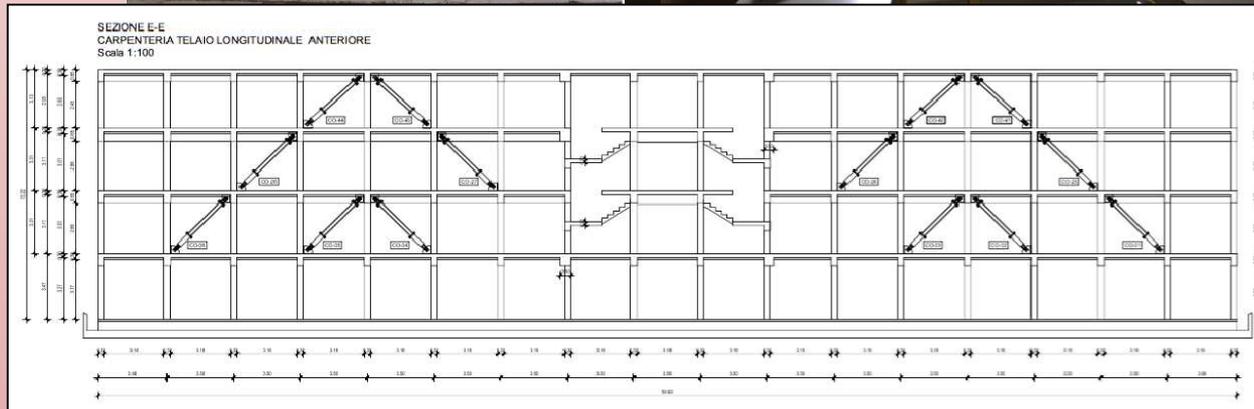
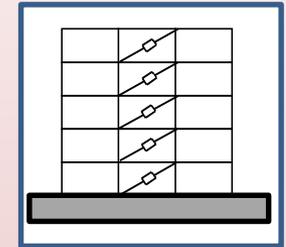
Applicazione di moderne tecnologie di dissipazione supplementare di energia: i controventi dissipativi

❖ **Come si dispongono rispetto all'alzato?**



La loro disposizione dipende dalla *tipologia di dispositivo* e dalle *caratteristiche architettoniche e strutturali* dell'edificio in cui vanno inseriti

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

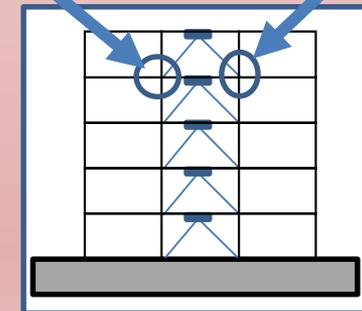


Adeguamento sismico mediante dissipatori elastoplastici del tipo BRAD della scuola "A. De Gasperi - R. Battaglia" di Norcia

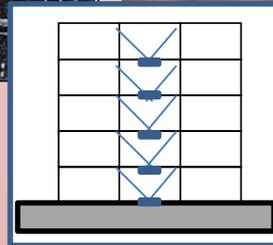
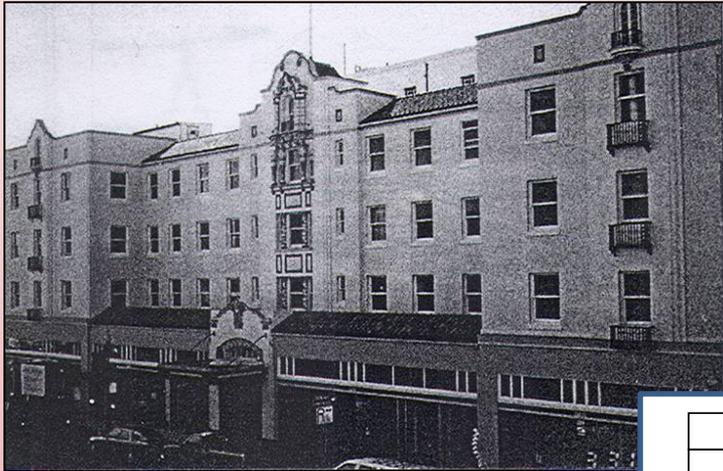
Applicazione di moderne tecnologie di dissipazione supplementare di energia: i controventi dissipativi



Adeguamento sismico mediante coprighiunti dissipativi metallici della scuola "D. Viola" a Potenza

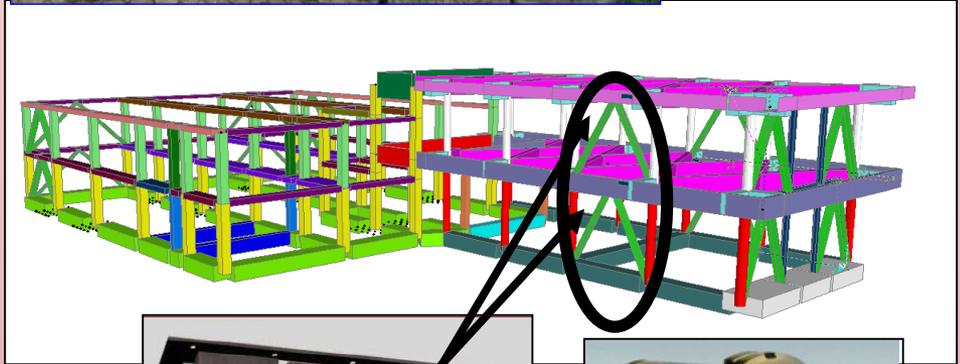
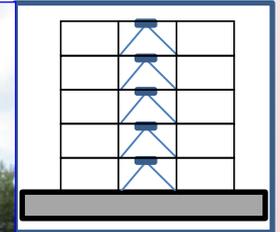


Applicazione di moderne tecnologie di dissipazione supplementare di energia: i controventi dissipativi



Adeguamento sismico mediante dispositivi fluido-viscosi del Woodland Hotel, Woodland, California

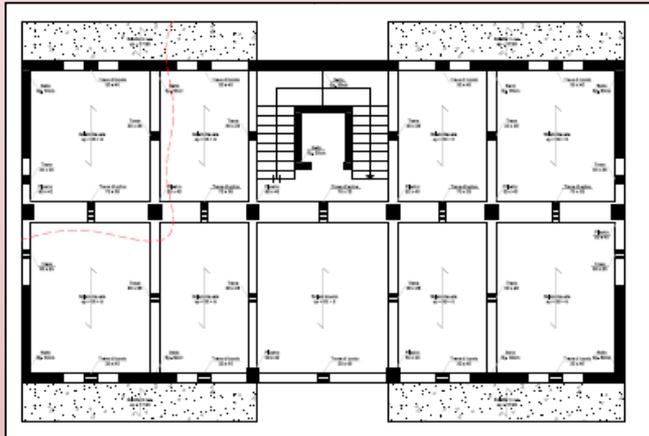
Applicazione di moderne tecnologie di dissipazione supplementare di energia: i controventi dissipativi



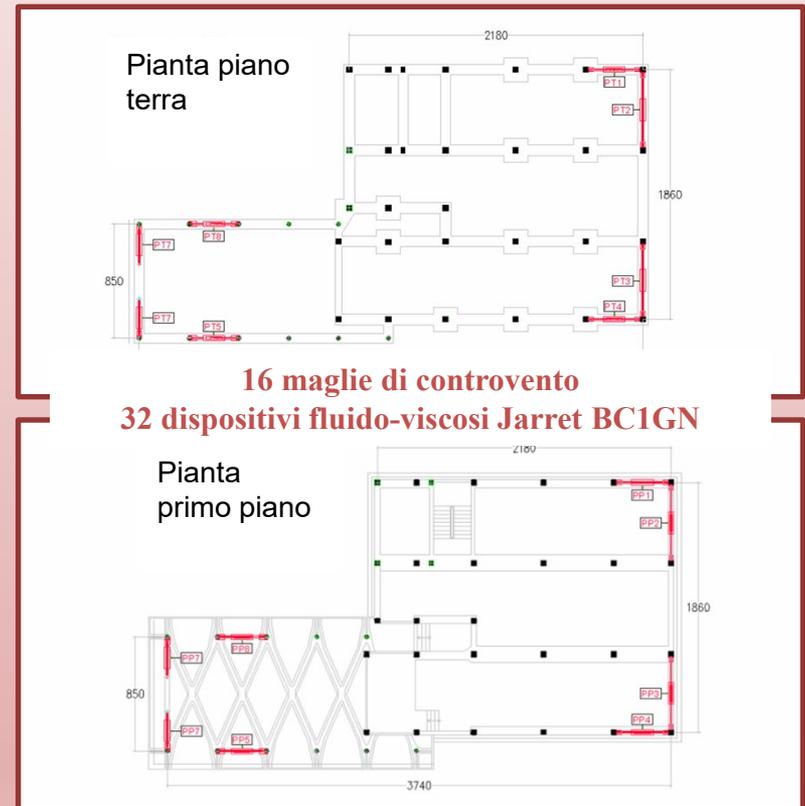
Adeguamento sismico mediante dispositivi fluido-viscosi dell'edificio «ex Pretura» di Borgo San Lorenzo (FI)

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

❖ Dove si collocano rispetto alla pianta?



La loro disposizione dipende dalla *tipologia di dispositivo* e dalle *caratteristiche architettoniche e strutturali* dell'edificio in cui vanno inseriti



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

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

La loro prima classificazione dipende dalla modalità di smorzamento che li caratterizza.

▪ Concetto di smorzamento

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 (smorzamento per irraggiamento).

I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

Importanza della definizione del termine
modalità di smorzamento.

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

in relazione alla

**TALE PARAMETRO RAPPRESENTA
L'AREA DEI CICLI D'ISTERESI DEI DISPOSITIVI**

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:

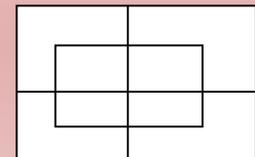
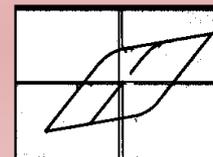
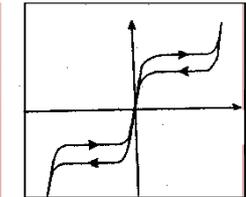
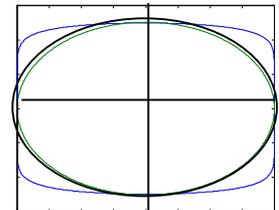
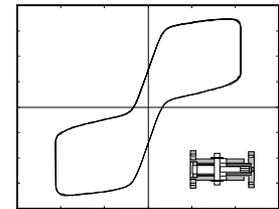
Terenzi, G. (1994). Effetti dissipativi nell'isolamento sismico, Tesi di Dottorato in Ingegneria delle Strutture, VII Ciclo, Università di Firenze;

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



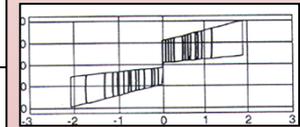
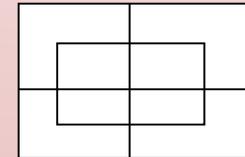
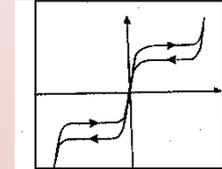
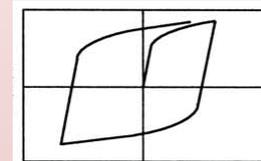
I dispositivi di dissipazione supplementare di energia

❖ 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

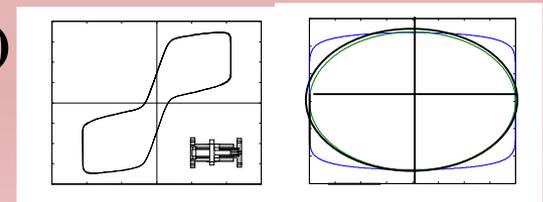
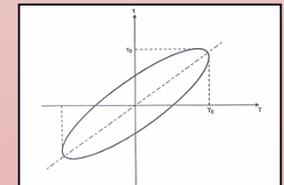
Comportamento dipendente dallo spostamento (*rate independent*)

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)**



Modellazione e analisi di strutture dotate di dispositivi o sistemi di dissipazione supplementare di energia

Requisiti generali dei dispositivi

I dispositivi ad oggi in uso nell'ambito della protezione sismica per dissipazione supplementare di energia sono molteplici, caratterizzati da differenti proprietà elastico-dissipative. Secondo il più noto criterio di classificazione, peraltro applicato da normative internazionali come le americane ASCE/SEI 41-17 (2017), possono essere suddivisi in “displacement-dependent devices” (con comportamento indipendente dalla velocità e dipendente dallo spostamento) e “velocity-dependent devices” (con comportamento dipendente dalla velocità e dallo spostamento). Al primo gruppo appartengono i dispositivi dissipativi per isteresi metallica (ADAS, altri dissipatori per cui il comportamento elastico-dissipativo sia regolato da leggi elasto-plastiche come BRB, SMA, e similari – Figura D1), per attrito (con, oppure senza, componente elastica – Figura D2). Del secondo fanno parte le due categorie di dispositivi visco-elastici e fluido-viscosi (pressurizzati e non, ad orifizi). Per differenziarne la risposta ciclica si devono tener presenti altri due aspetti, ovvero il modello reologico, in serie od in parallelo, e la natura, lineare o non lineare, della legge di viscosità.

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

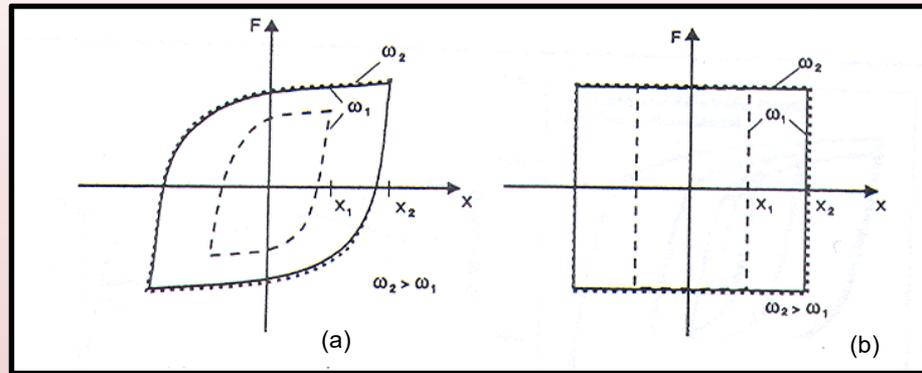


Figura. D1 – Esempificazione della risposta ciclica di dispositivi dipendenti dallo spostamento, metallici (a) e ad attrito (b), soggetti a forzanti armoniche di spostamento con pulsazioni ω_1 ed ω_2 e spostamenti massimi x_1 ed x_2 .

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

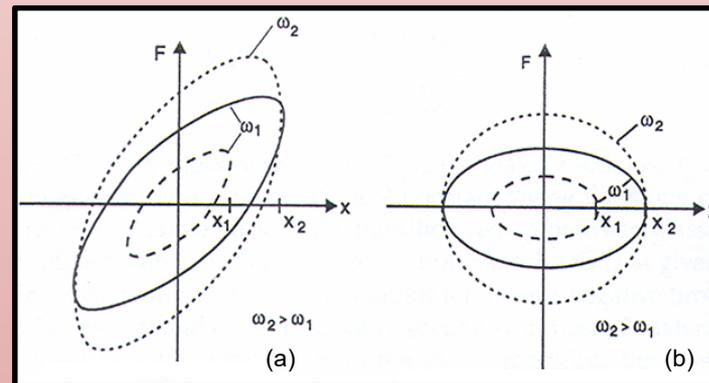


Figura. D2 – Esempificazione della risposta ciclica di dispositivi dipendenti dalla velocità, visco-elastici (a) e fluido-viscosi (b), soggetti a forzanti armoniche di spostamento con pulsazioni ω_1 ed ω_2 e spostamenti massimi x_1 ed x_2 .

➤ **Dispositivi metallici**

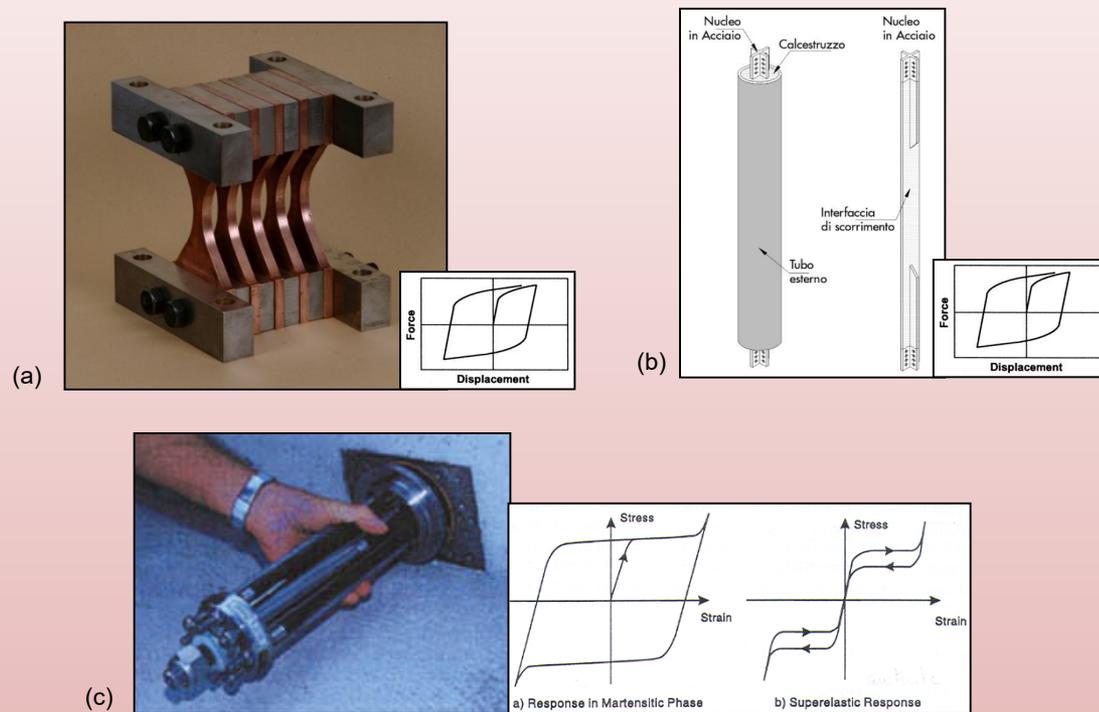


Figura. D3 – Dispositivi ADAS (a), BRB (b), SMA (c), e relativi cicli di risposta.

➤ **Dispositivi ad attrito**

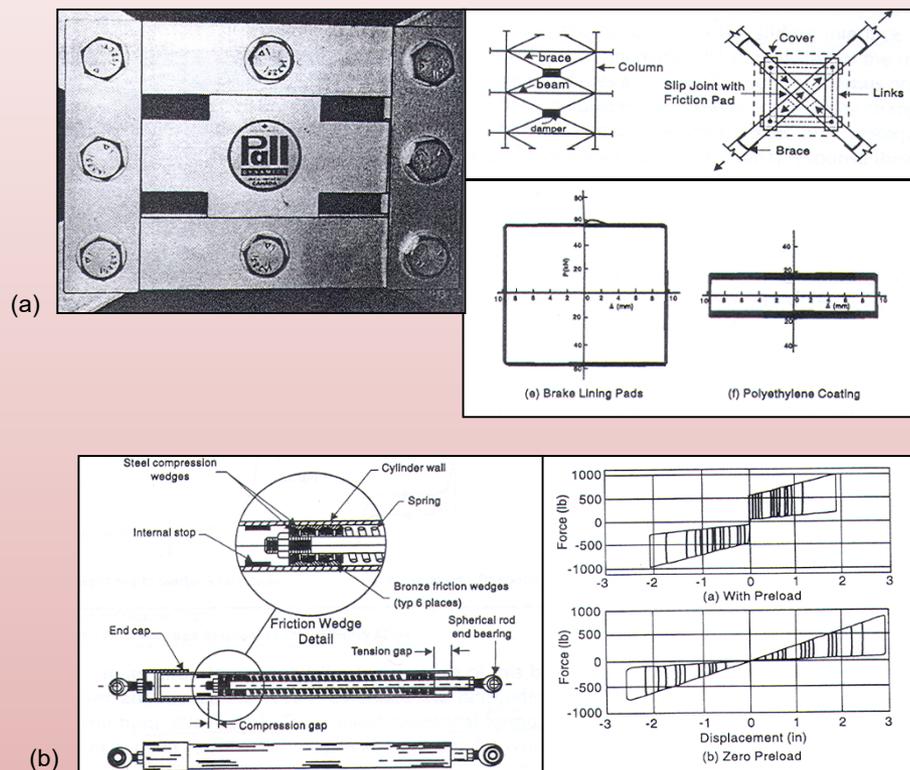


Figura. D4 – Dispositivi di dissipazione per attrito, puramente smorzanti (a), con comportamento elastico-dissipativo (b).

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**

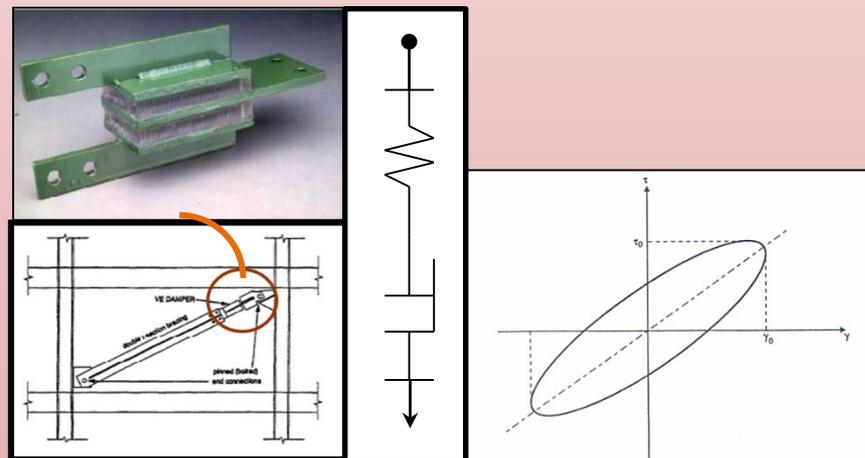


Figura. D5 – Dispositivi visco-elastici con modello reologico in serie e ciclo elastico dissipativo ellittico.

➤ **Dispositivi fluido-viscosi**

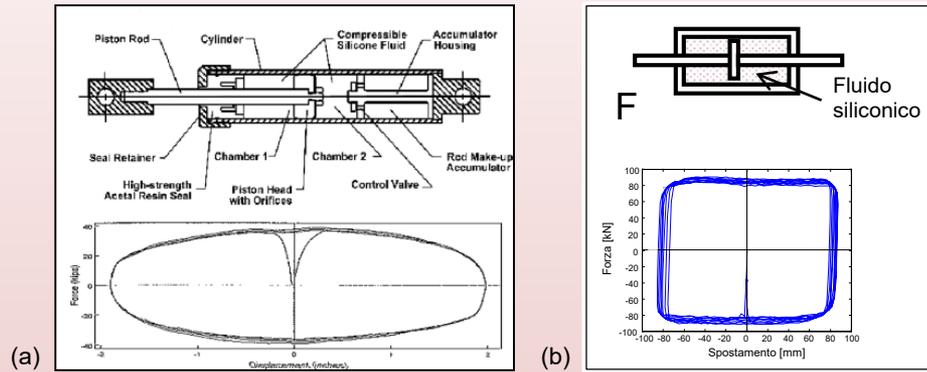


Figura. D6 – Dissipatori fluido-viscosi; ad orifizi con legge dissipativa di tipo viscoso lineare (a) e pressurizzati a comportamento non lineare (b).

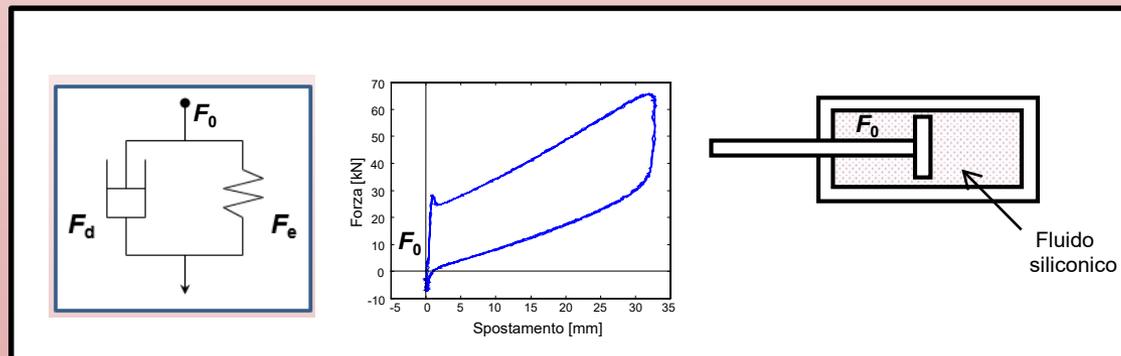


Figura. D7 – Dispositivi preminentemente dissipativi pressurizzati (F_0 diverso da 0) e non ($F_0 = 0$), rispondenti al modello reologico in parallelo.

➤ **Dispositivi fluido-viscosi**

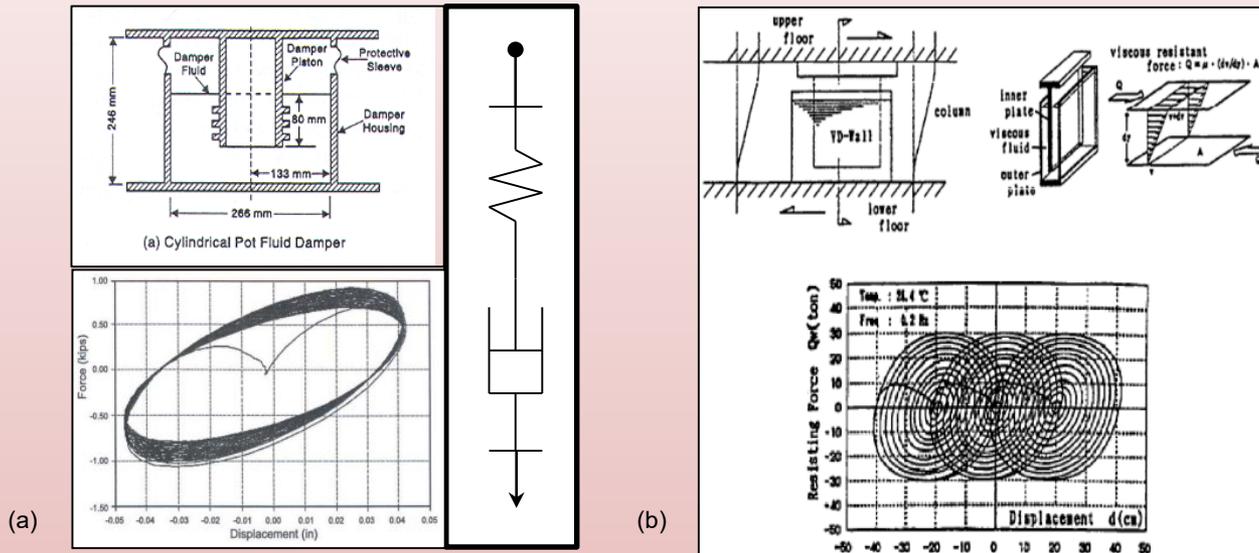


Figura. D8 – Dispositivi fluido-viscosi ad orifizi con legge reologica in serie (a); pareti dissipative con fluido viscoso (b).