



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

*Dissipazione supplementare di energia
Riepilogo*

Prof.ssa Ing. Gloria Terenzi

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Firenze

Dissipazione supplementare di energia

C.M. n. 7, 21 gennaio 2019 - §C7.10.1

.... l'introduzione del sistema di dissipazione produce

un aumento dello smorzamento

e, se il sistema determina

un irrigidimento della struttura (riduzione del periodo)

per molti sistemi di uso corrente anche

un aumento della resistenza complessiva

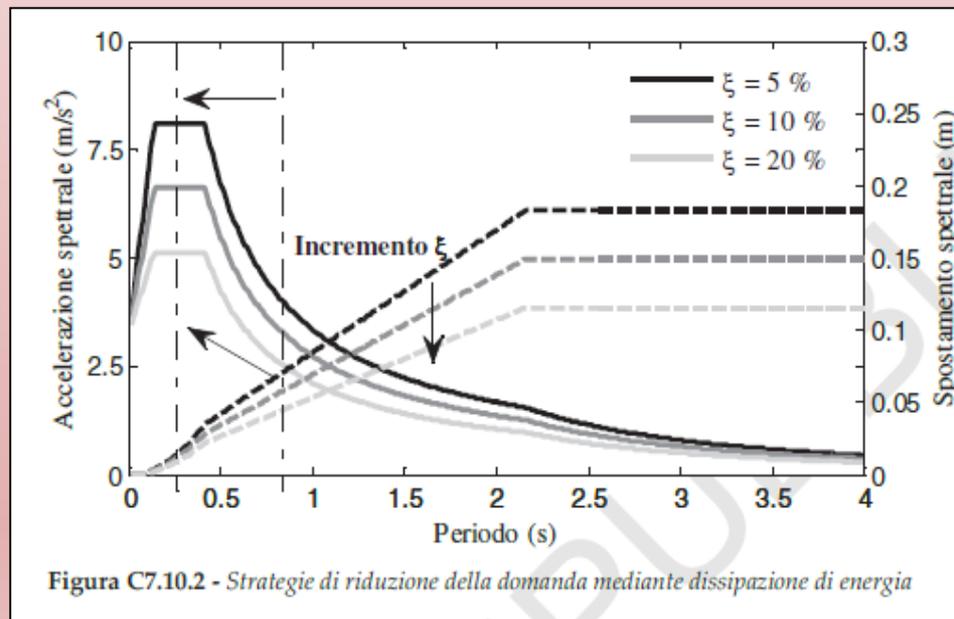


Figura C7.10.2 - Strategie di riduzione della domanda mediante dissipazione di energia

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 simili – 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.

Classificazione in relazione ai seguenti fattori:

- **Caratteristica d'isteresi meccanica con dipendenza dalla velocità o dallo spostamento;**
- **proprietà meccaniche elastico-dissipative o puramente dissipative;**
- **modello reologico, in serie od in parallelo, di combinazione delle componenti elastica e dissipativa**

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

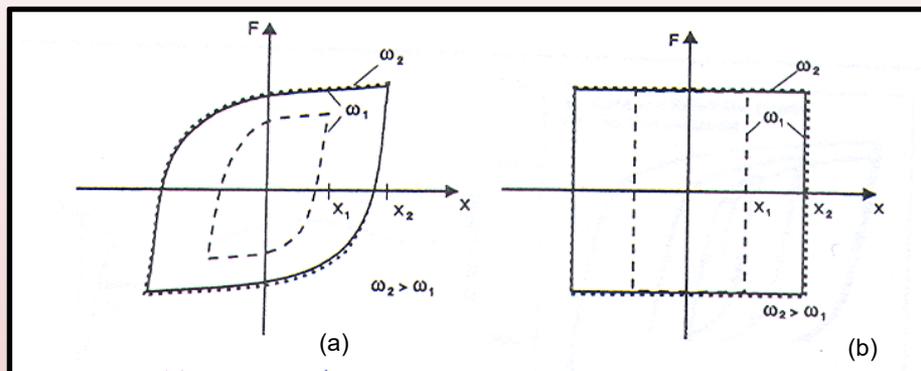


Figura. D1 – Esempificazione della risposta ciclica di dispositivi dipendenti dallo spostamento, metallici (a) e ad attrito (b), soggetti a forzanti armoniche di spostamento con pulsazioni ω_1 ed ω_2 e spostamenti massimi x_1 ed x_2 .

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

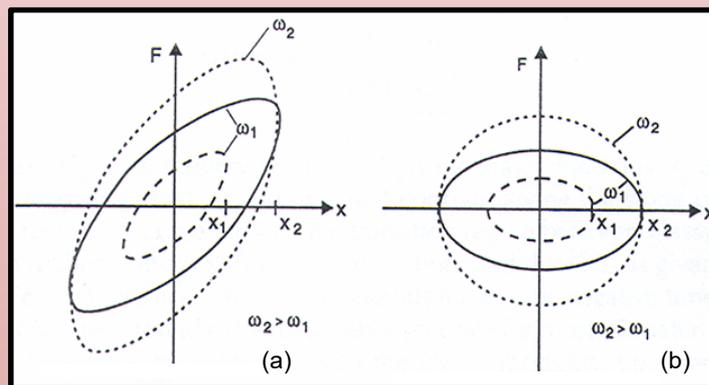


Figura. D2 – Esempificazione della risposta ciclica di dispositivi dipendenti dalla velocità, visco-elastici (a) e fluido-viscosi (b), soggetti a forzanti armoniche di spostamento con pulsazioni ω_1 ed ω_2 e spostamenti massimi x_1 ed x_2 .

➤ *Dispositivi metallici*

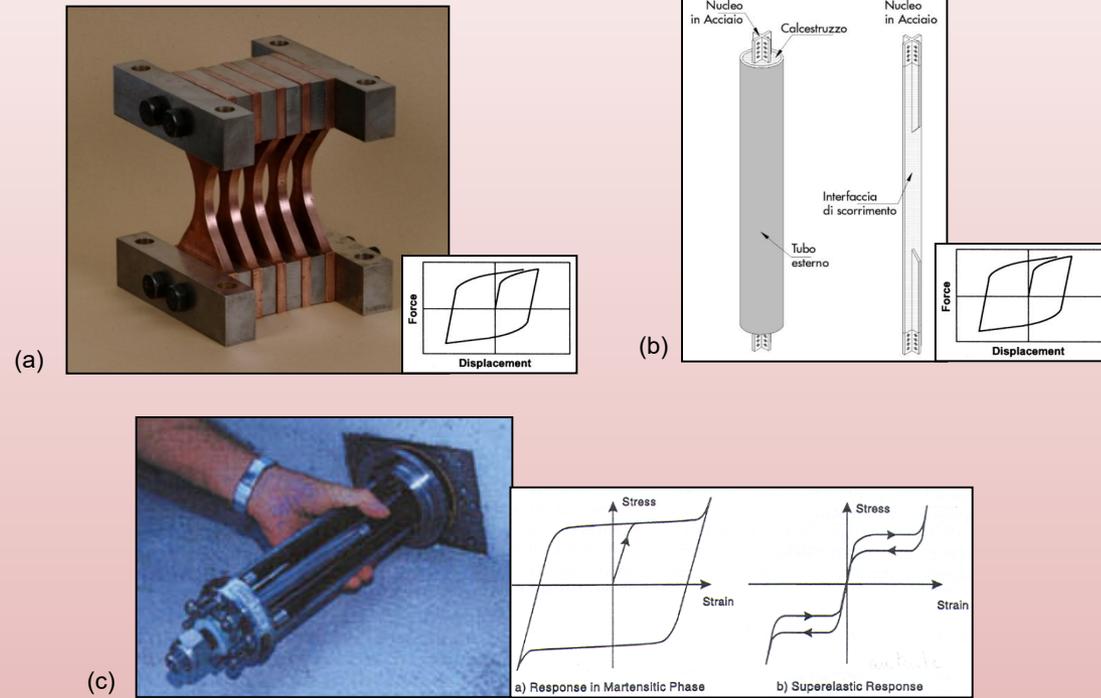


Figura. D3 – Dispositivi ADAS (a), BRB (b), SMA (c), e relativi cicli di risposta.

➤ **Dispositivi ad attrito**

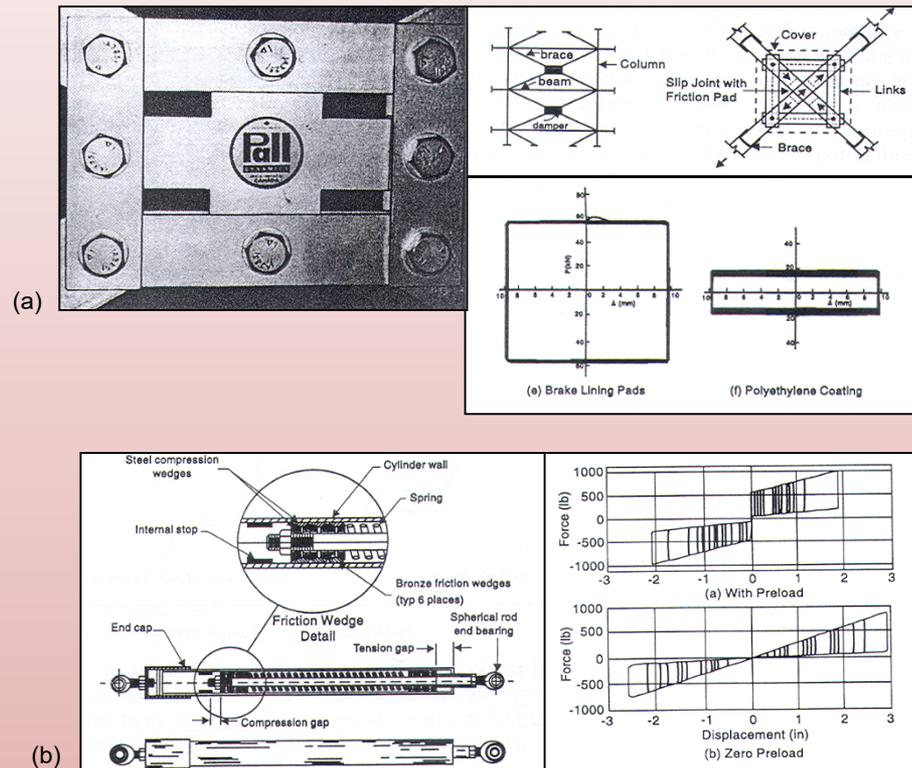


Figura. D4 – Dispositivi di dissipazione per attrito, puramente smorzanti (a), con comportamento elastico-dissipativo (b).

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**

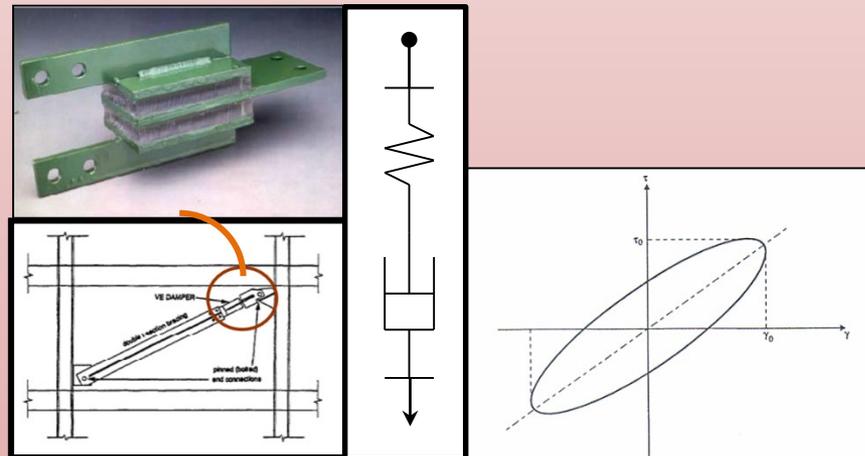


Figura. D5 – Dispositivi visco-elastici con modello reologico in serie e ciclo elastico dissipativo ellittico.

➤ Dispositivi fluido-viscosi

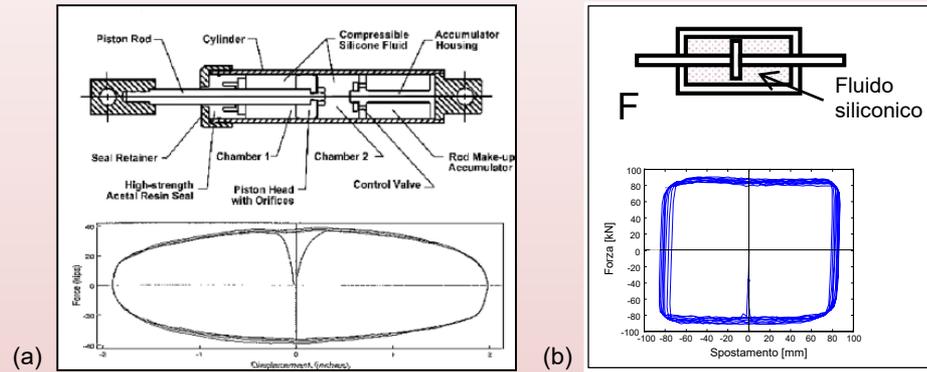


Figura. D6 – Dissipatori fluido-viscosi; ad orifizi con legge dissipativa di tipo viscoso lineare (a) e pressurizzati a comportamento non lineare (b).

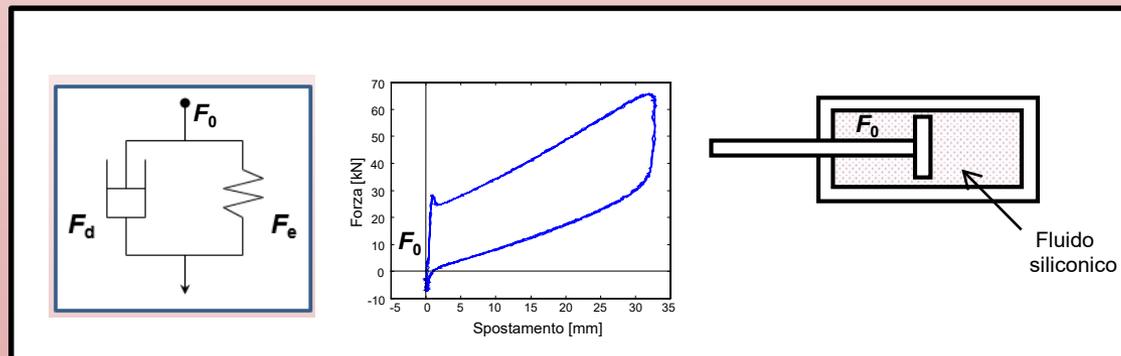


Figura. D7 – Dispositivi preminentemente dissipativi pressurizzati (F_0 diverso da 0) e non ($F_0 = 0$), rispondenti al modello reologico in parallelo.

➤ **Dispositivi fluido-viscosi**

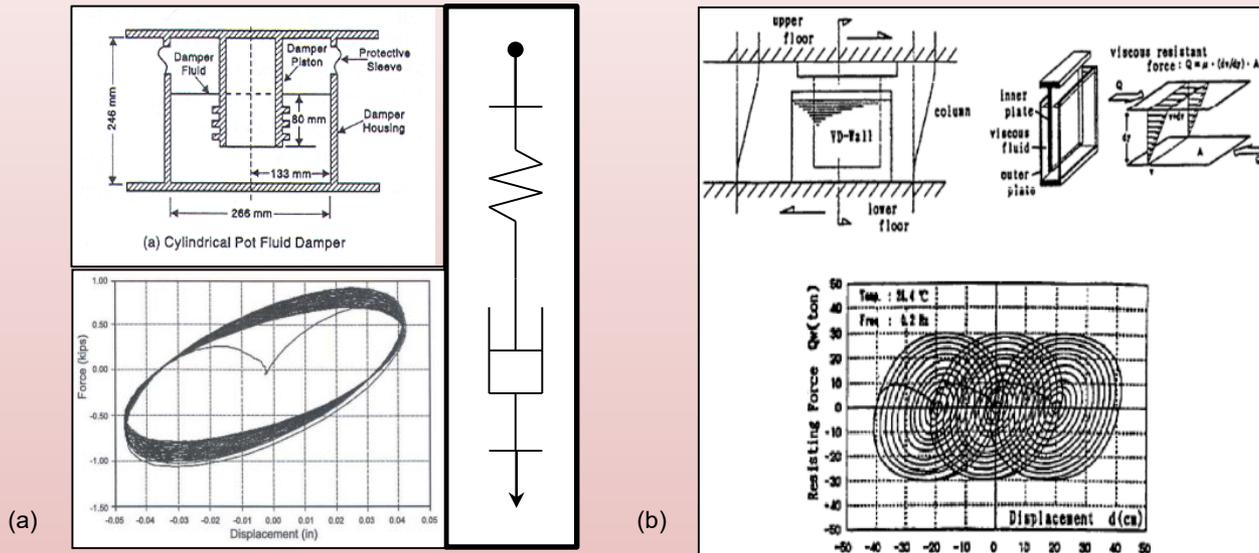
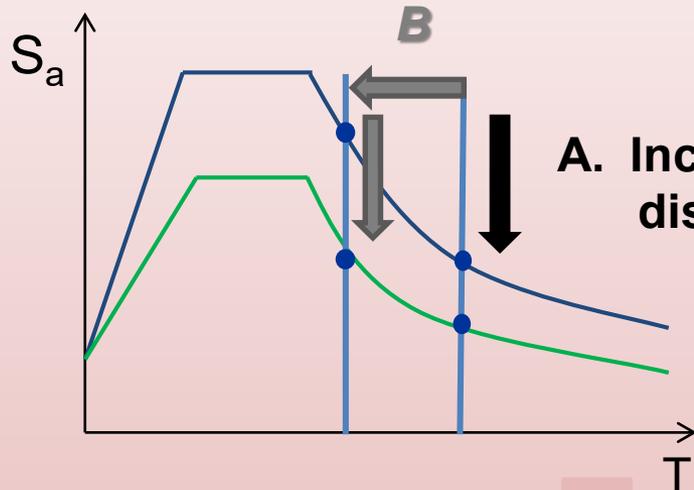


Figura. D8 – Dispositivi fluido-viscosi ad orifizi con legge reologica in serie (a); pareti dissipative con fluido viscoso (b).

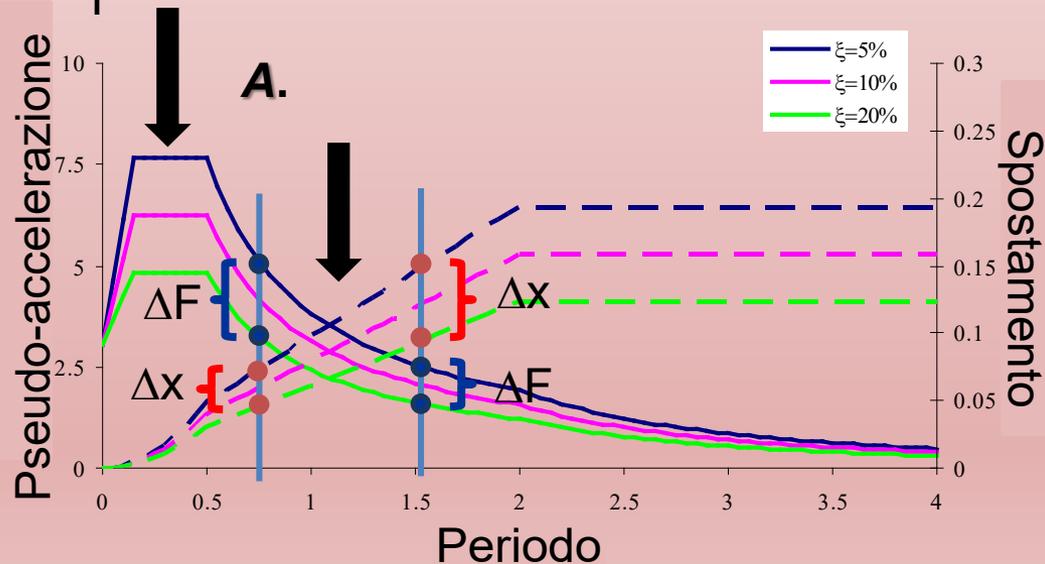
Dissipazione supplementare di energia



A. Inclusione di dispositivi preminentemente dissipativi

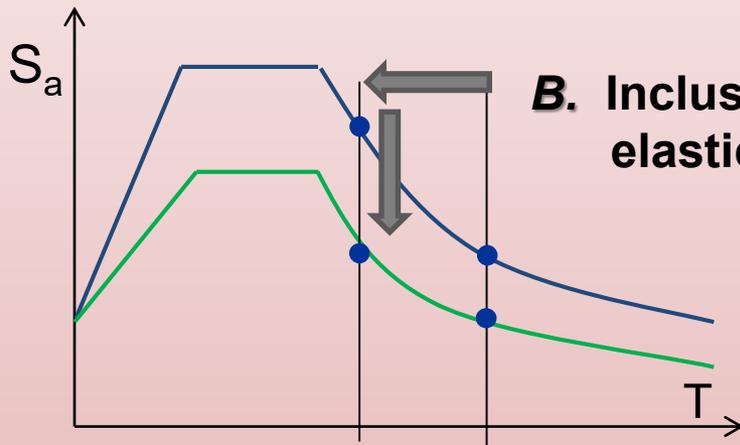
E' preferibile adottare la soluzione A. per periodi $T \leq 1$ s.

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



Dissipazione supplementare di energia

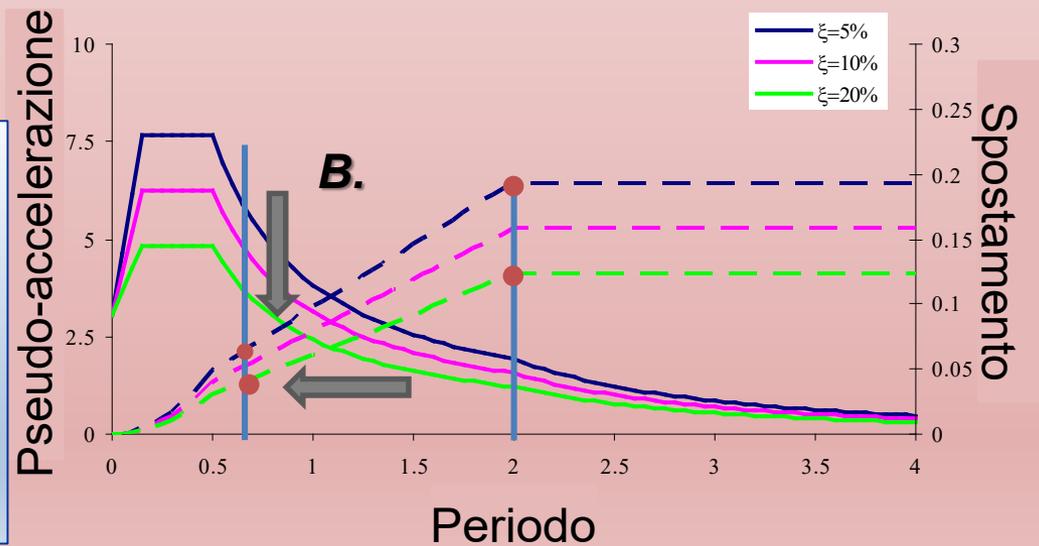
- B.** Necessità di ridurre gli spostamenti nella struttura troppo deformabile nei confronti delle azioni orizzontali per incremento della rigidezza e dello smorzamento.



B. Inclusione di dispositivi congiuntamente elastico-dissipativi

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

Per $0.8 \text{ s} < T < 1.5 \text{ s}$ i benefici derivanti dai dispositivi di **Tipo A.** e **B.** sono confrontabili.
Per periodi minori il dispositivo elastico-dissipativo di **Tipo B.** può non attivarsi anche per basse intensità dell'azione sismica.



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

*Classificazione in base al modello reologico:
in parallelo (Tipo A) od in serie (Tipo B)*

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

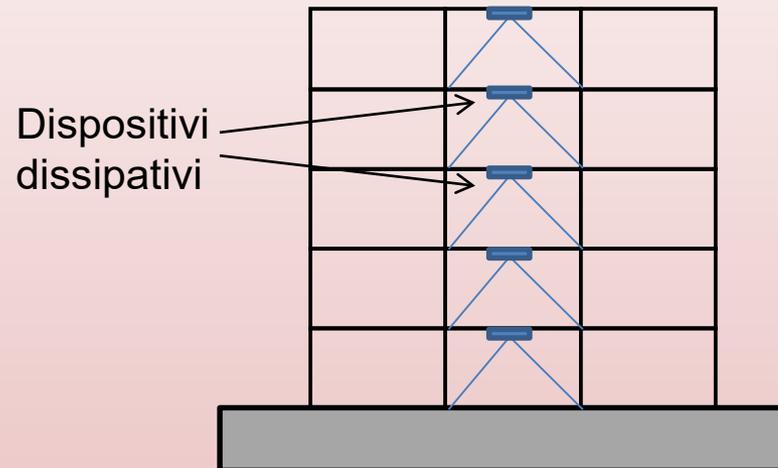
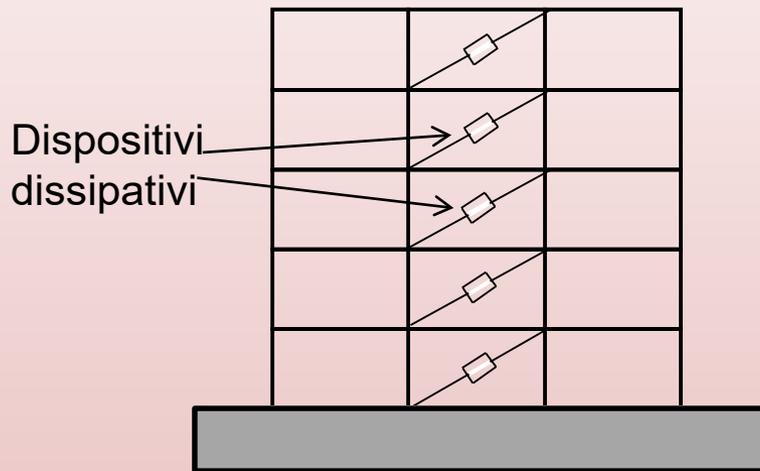
**Contributo
dissipativo**

**Contributo
elastico**

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

Contributo elastico-dissipativo

Dissipazione supplementare di energia



La loro disposizione dipende dalla *tipologia di dispositivo* e dalle *caratteristiche architettoniche e strutturali* dell'edificio in cui vanno inseriti
L'importanza della componente elastica influisce sull'importanza di k_C , rigidezza dell'assemblaggio dispositivo+aste di sostegno.

I parametri modali cambiano in ragione del funzionamento in serie di aste diagonali e dispositivi



$$k_C = \frac{k_d \cdot k_a}{k_d + k_a}$$

Dissipazione supplementare di energia

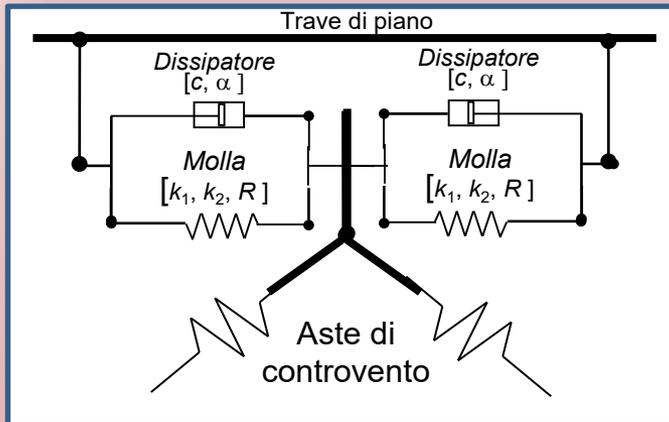
C.M. n. 7, 21 gennaio 2019 - §7.10.4.1

La rigidezza del sistema dissipativo deriva dalla combinazione delle rigidezze dei singoli componenti, ossia del dispositivo dissipativo e della struttura, generalmente metallica, di supporto.

Indicando con: k_c la rigidezza del sistema dissipativo, k_s la rigidezza del telaio, k_d la rigidezza del dispositivo e k_a la rigidezza del supporto metallico, e con riferimento alla Figura C7.10.2, si ha:

$$k_C = \frac{1}{\frac{1}{k_d} + \frac{1}{k_a}} \quad \text{rigidezza del sistema;} \quad [C7.10.1]$$

$$k_{TOT} = k_s + k_c \quad \text{rigidezza del telaio rinforzato.} \quad [C7.10.2]$$



IN SERIE

$$k_C = \frac{k_d \cdot k_a}{k_d + k_a}$$

IN PARALLELE

$$k_{tot} = k_c + k_s$$

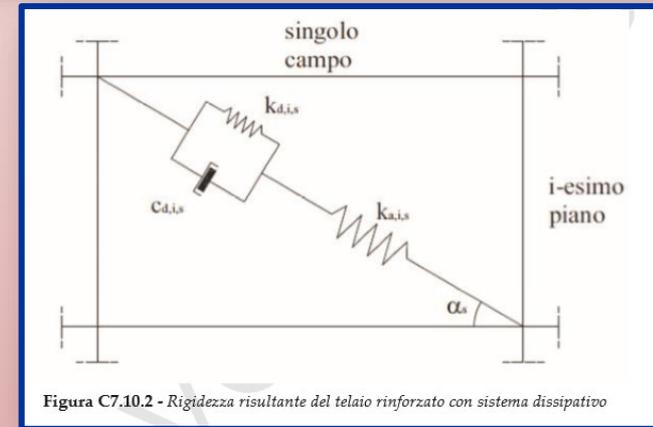


Figura C7.10.2 - Rigidezza risultante del telaio rinforzato con sistema dissipativo

Dissipazione supplementare di energia

Parametri di progetto



Dissipazione supplementare di energia

Parametri di progetto

Progetto per prestazione

```
graph TD; A[Progetto per prestazione] --> B[Tipo A e B]; B --> C[Se il dispositivo prescelto si attiva prima che si danneggi la tamponatura!];
```

Tipo A e B

C.M. n. 7, 21 gennaio 2019 - (*l'irrigidimento prodotto*) 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.....

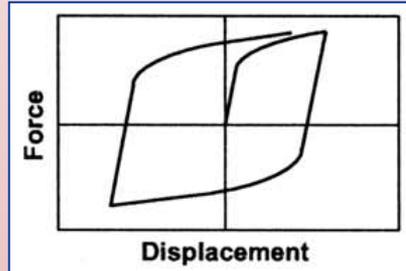
**Se il dispositivo prescelto
si attiva prima che si
danneggi la tamponatura!**

Dissipazione supplementare di energia

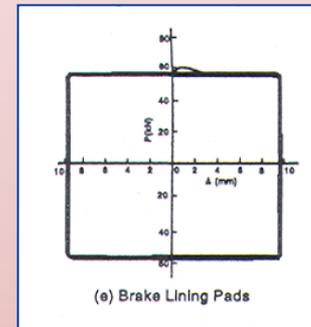
Parametri di progetto

Lo smorzamento

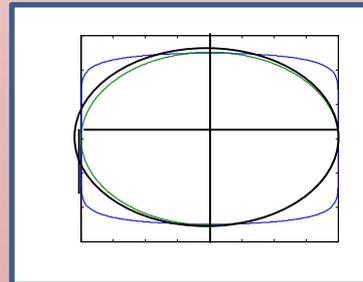
(definizione della modalità di smorzamento per tipologia di dispositivo)



Isteresi metallica



Attrito



Viscosità lineare e non lineare

Dissipazione supplementare di energia

Parametri di progetto

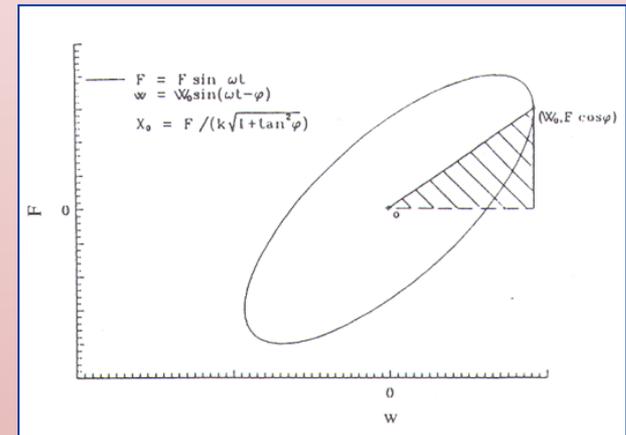
Lo smorzamento (come lo si quantifica)

6. “Loss Factor” κ :

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

E_D = Energia dissipata;

E_e = Energia di deformazione elastica.



Sempre stimabile!

Dissipazione supplementare di energia

Parametri di progetto

Lo smorzamento (come lo si quantifica)

Equivalenza accettabile per basse entità dello smorzamento:

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

Assunzione di normativa per lo
smorzamento equivalente



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

Dissipazione supplementare di energia

Metodi di predimensionamento delle capacità dissipative dei dispositivi

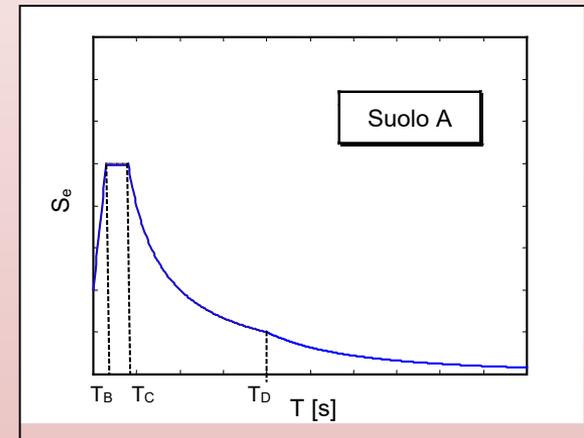
NTC2018 - §3.2.3.2 Spettro di risposta elastico in accelerazione

«.....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%



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

$$\xi \leq 28\%$$

Per rapporti di smorzamento superiori l'approssimazione:

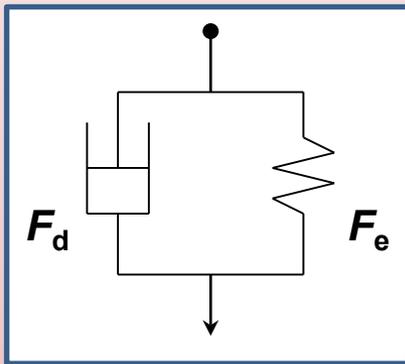
$$\text{Pseudo-accelerazione: } S_A = \max |a_t(t)| \cong \omega^2 S_D$$

porta ad errori valutativi significativi.

Dissipazione supplementare di energia

Parametri di progetto del sistema

Per dispositivi di Tipo A, la componente elastica va dimensionata separatamente da quella dissipativa



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

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

**Contributo
dissipativo**

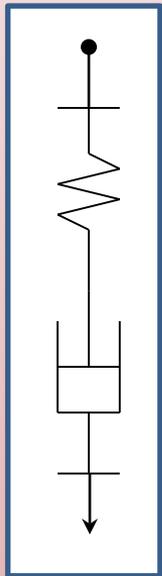
**Contributo
elastico**

Combinazione IN PARALLELO delle componenti elastica e dissipativa

Dissipazione supplementare di energia

Parametri di progetto del sistema

Per dispositivi di Tipo B, la componente elastica va dimensionata sulla base delle richieste di dissipazione di energia



$$F_e = F_d = F$$
$$x_e + x_d = x$$

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

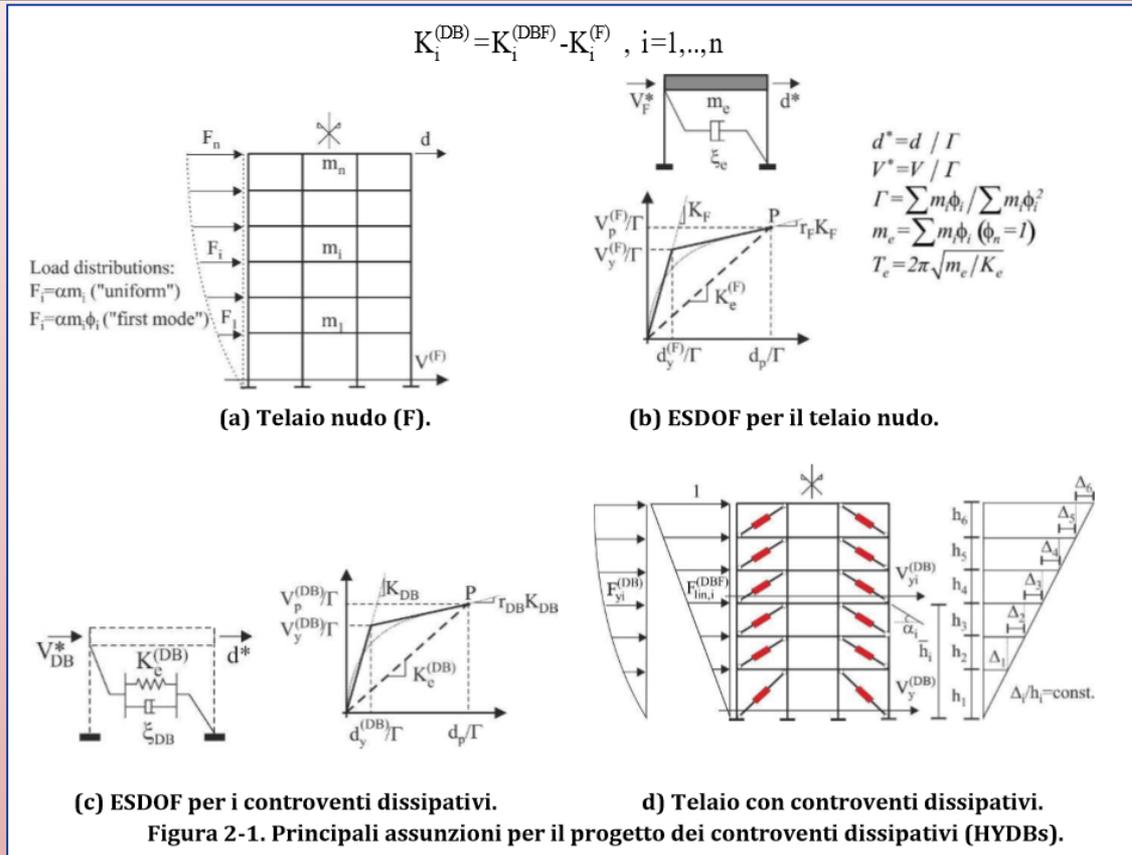
$$m\ddot{v}(t) + c\dot{v}(t) + kv(t) + f_{ed}(t) = -m\ddot{v}_g(t)$$

Contributo elastico-dissipativo

Combinazione IN SERIE delle componenti elastica e dissipativa

Procedura di progetto di *dissipatori isteretici*

Adeguamento sismico di edifici con struttura a telaio in c.a.
 (riferimento al Metodo N2 dell'EC8 che combina l'analisi statica non lineare con l'analisi modale)



Mazza F, Vulcano A (2014). Design of hysteretic damped braces to improve the seismic performance of steel and r.c. framed structures. *Ingegneria Sismica*, 1:5-16.
 Mazza F, Mazza M, Vulcano A. (2015). Displacement-based seismic design of hysteretic damped braces for retrofitting in-elevation irregular r.c.framed structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 69:115124

Procedura di progetto di dissipatori isteretici

Adeguamento sismico di edifici con struttura a telaio in c.a.

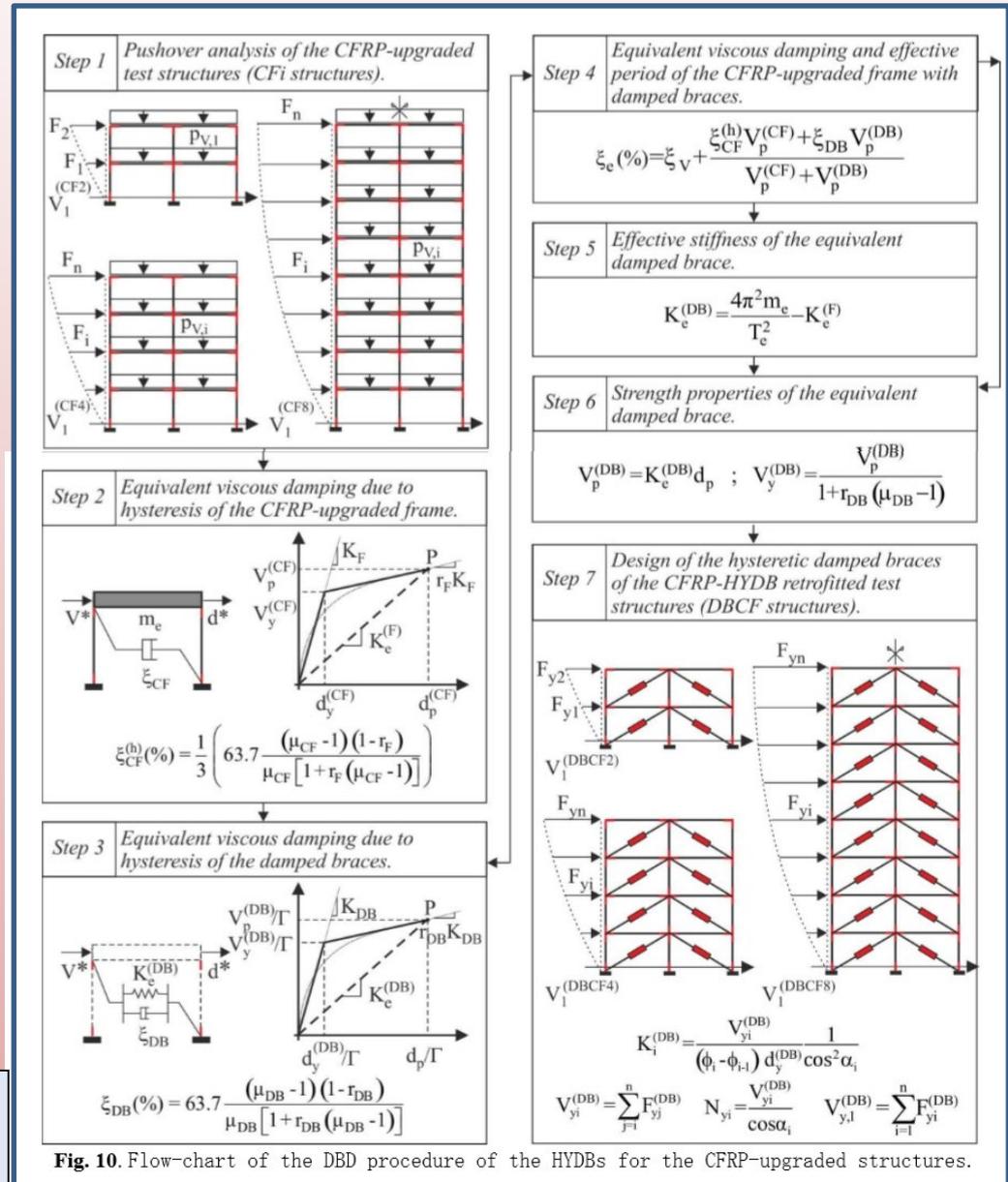


Fig. 10. Flow-chart of the DBD procedure of the HYDBs for the CFRP-upgraded structures.

Procedura di progetto di dissipatori isteretici basata sul controllo degli spostamenti

Progetto del nuovo dall'individuazione di tre comportamenti della struttura priva di controventi assunti come **OBIETTIVI DI PRESTAZIONE:**

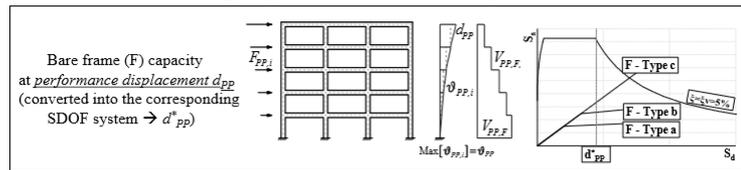
- a) dissipativo, b) parzialmente dissipativo, c) elastico.

Dal grafico ADRS si stabilisce lo spostamento di progetto.

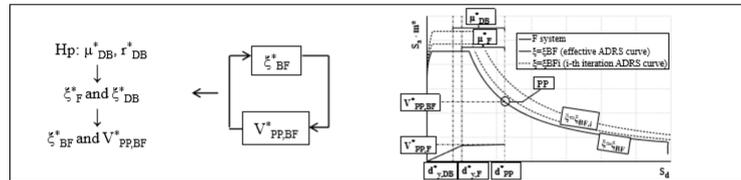
Adeguamento sismico di edifici con struttura a telaio in c.a. (ipotesi da riverificare: duttilità μ_{DB} e rapporto di rigidità elastica e post-elastica r_{DB})

Nuzzo I., Losanno D., Caterino N. (2019). Seismic design and retrofit of frame structures with hysteretic dampers: a simplified displacement-based procedure, Bulletin of Earthquake Engineering, 17(5): 2787-2819.

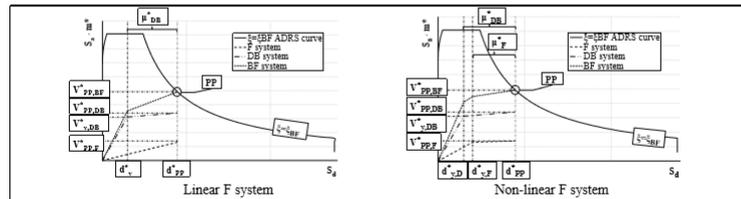
STEP 1 Identification of the target displacement and of the bare frame system



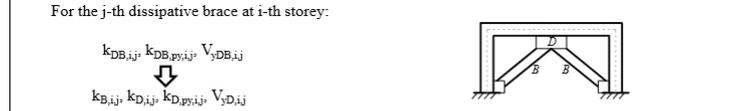
STEP 2 Evaluation of the Performance Point



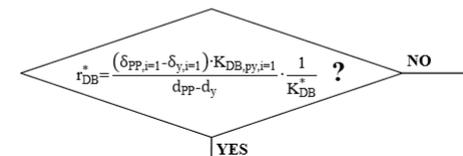
STEP 3 Design capacity curves for BF and DB systems



STEP 4 Preliminary sizing of dissipative braces



STEP 5 Consistency check with the initial assumption about stiffness r_{DB}^*



STEP 6 Consistency check with the initial assumption about ductility μ_{DB}^*

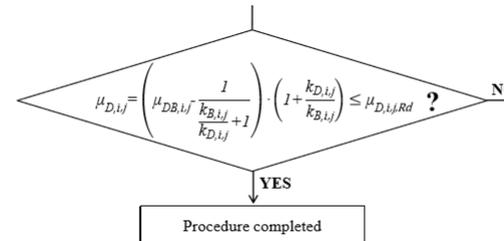


Figura 1-2. Flowchart della procedura di progetto

Dissipazione supplementare di energia



Trattazione del problema ricorrendo all'approccio energetico

C.M. n. 7, 21 gennaio 2019 - §C7.10.1 Scopo

.... 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.....

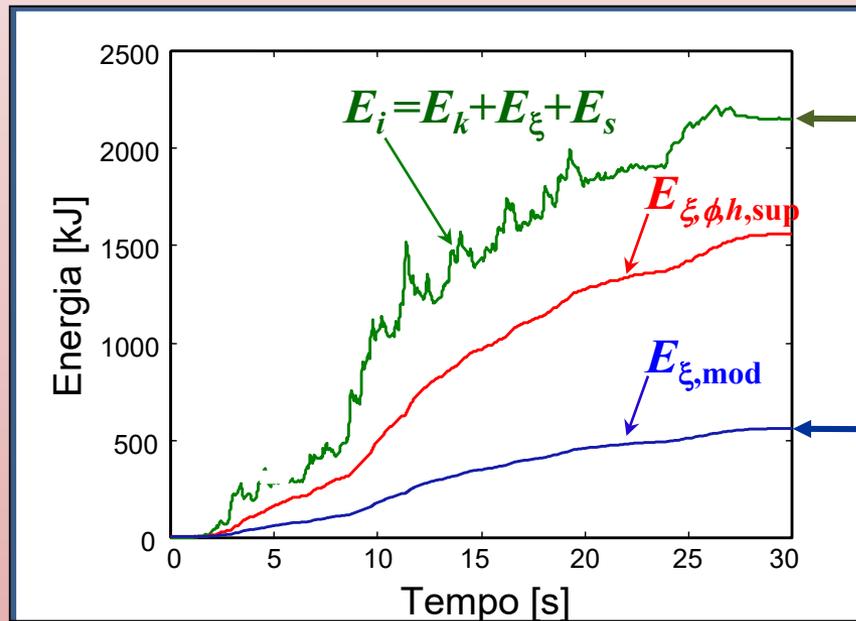
.... In tal modo LA MAGGIOR PARTE DELL'ENERGIA IN ENTRATA VIENE IMMAGAZZINATA E DISSIPATA NEI DISPOSITIVI, mentre la funzione di sostegno dei carichi verticali rimane attribuita alla struttura convenzionale»

Dissipazione supplementare di energia

Approccio energetico

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

LS3/LS4 → **SLO/SLD**



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

Pressoché nullo
danneggiamento
della struttura

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

Approccio energetico alla progettazione

- Obiettivi di prestazione

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

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

La PROGETTAZIONE PER PRESTAZIONE richiede L'ATTIVAZIONE DEI DISPOSITIVI di dissipazione supplementare già per azioni d'intensità LS2

Approccio energetico alla progettazione

- Parametro di progetto

Importanza della definizione del termine

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

in relazione alla modalità di smorzamento

Tale parametro rappresenta l'area dei cicli d'isteresi dei dispositivi

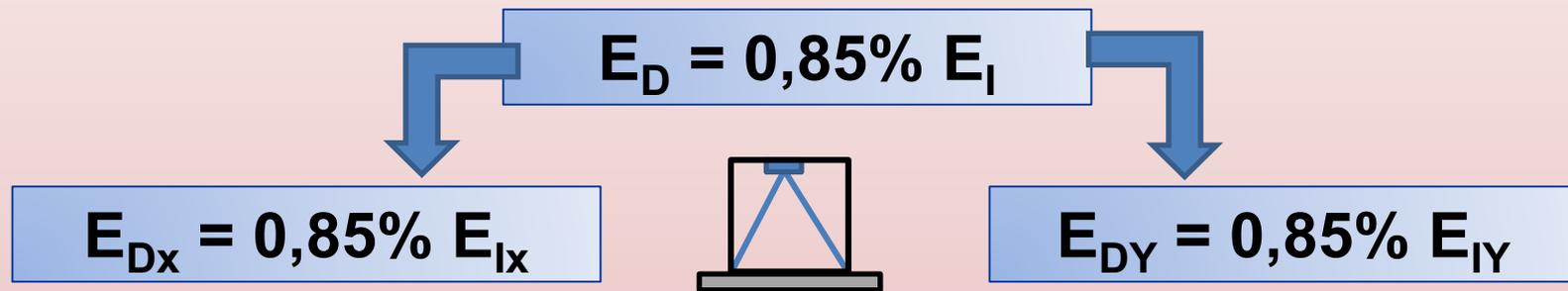
Metodi energetici di progetto

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

Metodi energetici di progetto

Dispositivi fluidoviscosi pressurizzati a matrice siliconica (Tipo A)

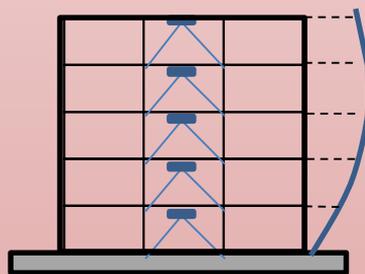
Parametri di progetto: **ENERGIA DISSIPATA**, **coefficiente di dissipazione** e **CORSA MASSIMA DEL DISPOSITIVO**



Struttura pluripiano

$$\sum E_{Dxj} = \alpha_{xj} \cdot E_{Ixj}$$

$$\sum \alpha_{xj} = 0,85$$



$$\sum E_{Dyj} = \alpha_{yj} \cdot E_{Iyj}$$

$$\sum \alpha_{yj} = 0,85$$

I coefficienti α_j vanno definiti sulla base degli spostamenti di piano associati alla deformata obiettivo

Metodi energetici di progetto

Estensione del metodo energetico di progetto a dispositivi metallici (Tipo B)

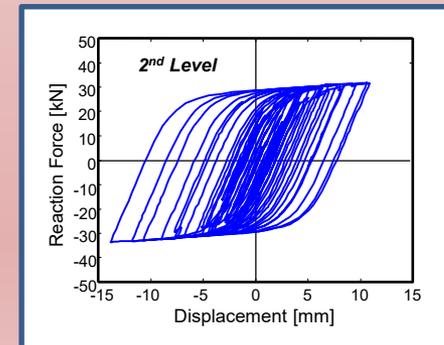
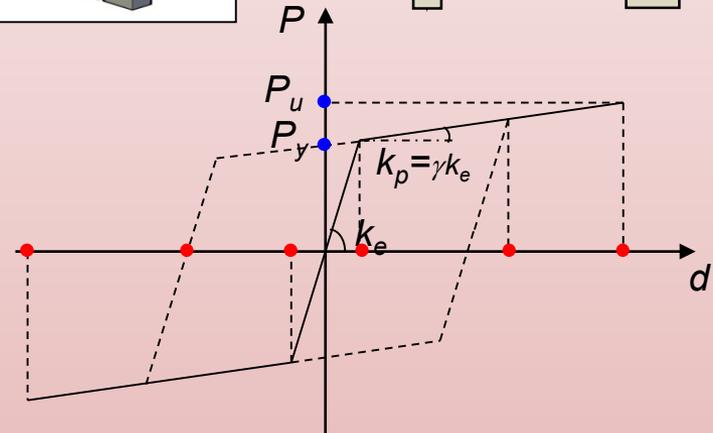
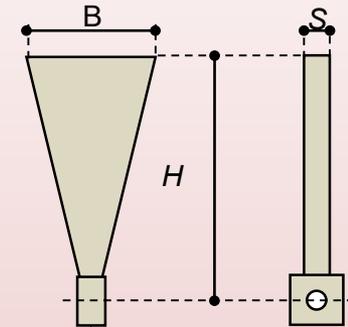
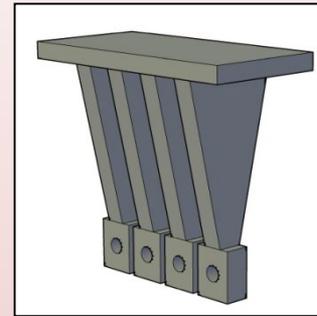
$$P_y = f_y \frac{BS^2}{6H} \quad d_y = \frac{P_y}{k_e} \quad k_e = \frac{E_s BS^3}{6H^3}$$

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

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

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:

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



Metodi energetici di progetto (T < 1,5 s)

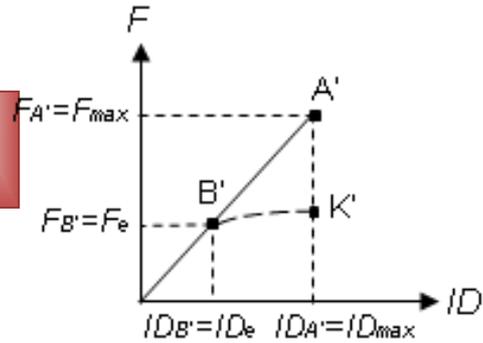
Procedura energetica speditiva per il progetto di dissipatori del Tipo A

Terenzi, G. (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

$$\alpha_s = \alpha_{Vj} = \frac{s_A}{s_B} = \frac{V_{j,c}^a}{V_{j,c}^e}$$

$$\alpha_s = \alpha_{Mj} = \frac{s_A}{s_B} = \frac{M_{j,c}^a}{M_{j,c}^e}$$

$$\alpha_F = \frac{F_{A'}}{F_{B'}}$$



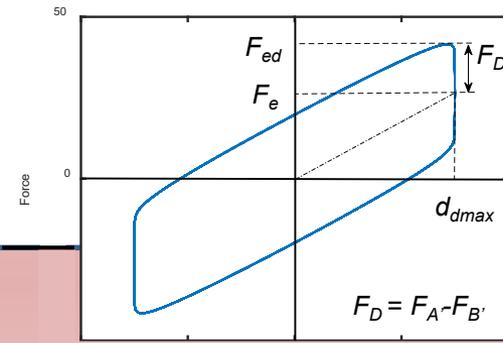
$$\alpha_d = \frac{ID_{A'}}{ID_{B'}} = \frac{ID_{max}}{ID_e}$$

$$\xi_{eq,d} = \frac{4F_D (ID_{A'} - ID_{B'})}{4\pi(F_{ed} ID_e / 2)}$$

$$\xi_{eq,d} = \frac{4F_D (ID_{max} - ID_e)}{4\pi(F_D ID_e / 2)} = \frac{2}{\pi} (\alpha_d - 1)$$

$$\xi_{eq,F} = \frac{4F_D d_{max} (\alpha_F - 1)}{4\pi F_D \alpha_F d_{max} / 2} = \frac{2 (\alpha_F - 1)}{\pi \alpha_F}$$

$$E_D = 4\pi E_e \xi_{eq} = 4\pi (F_{ed} d_{max} / 2) \xi_{eq} = 2\pi \alpha_F F_e \xi_{eq} d_{max}$$



$$E_D = 2\pi \xi_{eq} ID_e F_D$$

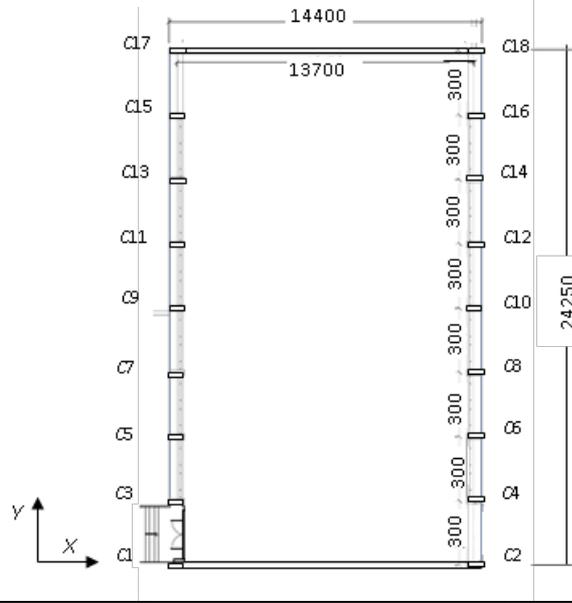
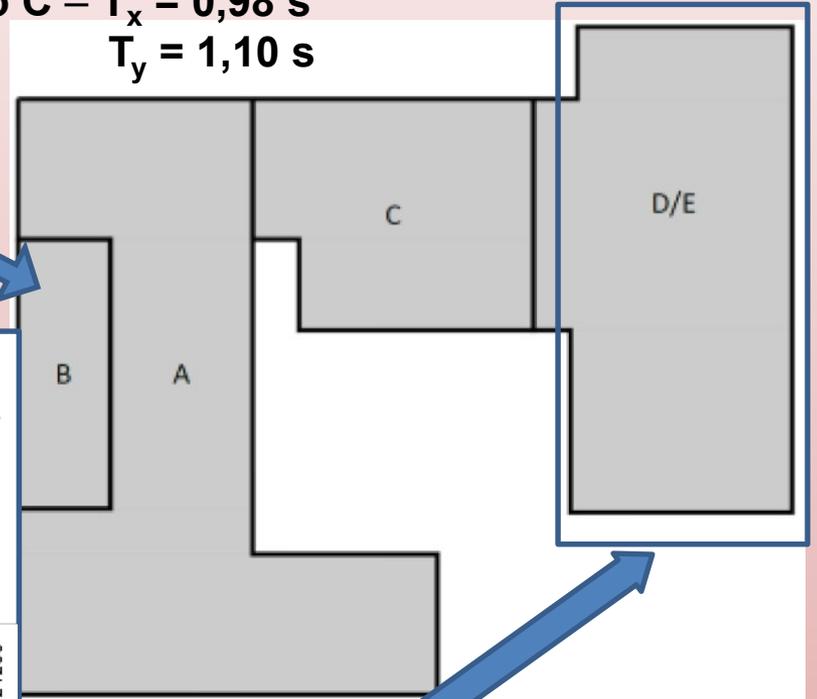
Metodi energetici di progetto ($T < 1,5$ s)

Applicazione della procedura energetica speditiva al caso della palestra

Blocco A – $T_x = 1,37$ s
 $T_y = 2,56$ s

Blocco B – $T_x = 1,79$ s
 $T_y = 0,83$ s

Blocco C – $T_x = 0,98$ s
 $T_y = 1,10$ s



Blocco D/E – $T_x = 0,35$ s
 $T_y = 0,89$ s

Metodi energetici di progetto ($T < 1,5$ s)

Caso studio della palestra – Blocco D/E

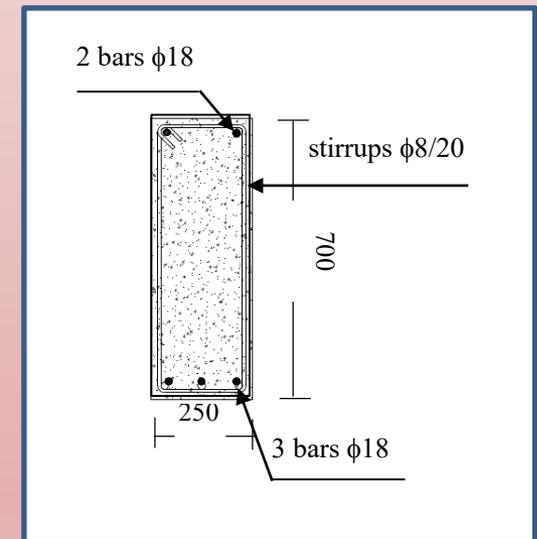
Verifica sismica per applicazione del metodo di analisi dinamica non lineare



Blocco D/E – $T_x = 0,35$ s
 $T_y = 0,89$ s

In direzione X la struttura presenta problemi di RESISTENZA PER PRESSOFLESSIONE

In direzione Y le criticità riguardano sia le SOLLECITAZIONI che gli SPOSTAMENTI



Metodi energetici di progetto ($T < 1,5$ s)

Caso studio della palestra – Blocco D/E

Verifica sismica per applicazione del metodo di analisi dinamica non lineare

Stato attuale: Indice IS-V(PGA - SLV) = 0,43 Indice IS-V(T - SLV) = 0,41

Inserimento di controventi tradizionali:

Indice IS-V(PGA - SLV) = 0,72 Indice IS-V(T - SLV) = 0,70

Inserimento di controventi dissipativi:

Indice IS-V(PGA - SLV) = 1,21 Indice IS-V(T - SLV) = 1,20

$$\text{IS-V(PGA)} = \text{PGA}_C / \text{PGA}_D$$

$$\text{IS-V(T)} = (\text{T}_{RC} / \text{T}_{RD})^{0.41}$$

T_{RC} = Periodo di ritorno in termini di capacità

T_{RD} = Periodo di ritorno in termini di domanda

PGA_C = PGA di capacità

PGA_D = PGA di domanda