

# Aspetti di analisi e progettazione di controventi dissipativi per l'adeguamento sismico di strutture esistenti in calcestruzzo armato

## Analysis and design of dissipative bracing for the retrofit of reinforced concrete existing structures

Luigi Di Sarno<sup>1</sup>, Marco Di Ludovico<sup>2</sup>, Andrea Prota<sup>3</sup> ■

### Sommario

Le recenti Norme Tecniche per le Costruzioni del 2008 e relativa Circolare applicativa del 2009 hanno stimolato l'applicazione di tecniche di protezione sismica passiva di strutture intelaiate basate sulla dissipazione di energia per costruzioni nuove ed esistenti. Tali tecniche sono molto efficaci soprattutto per gli edifici con struttura intelaiata in c.a. progettati per carichi verticali che presentano un'inadeguata rigidità, resistenza e duttilità globale. Controventi dissipativi con diverse configurazioni possono essere inseriti nelle maglie perimetrali di telai esistenti senza interferire significativamente con le attività ospitate nell'edificio su cui si interviene. L'uso di detti controventi incrementa la capacità delle strutture resistenti e riduce contemporaneamente la domanda sismica per lo smorzamento aggiunto che ne deriva alla struttura esistente. Nonostante le tecniche di protezione sismica passiva siano diventate molto diffuse ed utilizzate, le indicazioni normative sono ancora in uno stadio preliminare e risultano per lo più ottenute per estrapolazione di quanto riportato in relazione all'adozione di sistemi di isolamento sismico. Esistono, inoltre, molteplici aspetti di modellazione ed analisi di strutture con controventi dissipativi che richiedono ulteriori approfondimenti teorico-sperimentali.

Nella presente memoria si discutono, pertanto, a valle di una breve disamina delle tipologie di controventi dissipativi più comunemente utilizzati, alcune delle principali problematiche relative al comportamento meccanico degli stessi e soprattutto alla loro modellazione nell'ambito dell'analisi strutturale. Vengono proposte delle indicazioni progettuali semplici e versatili che possono essere utilizzate per il miglioramento ovvero adeguamento sismico degli edifici esistenti con struttura in c.a.

### Abstract

*The passive seismic protection in structural rehabilitation is being accepted as an effective intervention technique for new constructions and the retrofitting of existing structure. This technique is particularly promising to upgrade reinforced concrete (r.c.) structures designed in compliance with obsolete design codes and hence do not possess adequate stiffness, strength and deformation capacity. Dissipative braces may be inserted in the r.c. exterior frames in order to increase the structural seismic capacity as well as to reduce the seismic demand. Although the bracing systems are being employed routinely in several applications, current seismic guidelines provide, scarce preliminary design provisions, which rely chiefly on base isolation systems. Furthermore, numerous modelling issues related to existing structures with dissipative bracing systems are yet not fully investigated. The present paper focuses on the most common types of dissipative devices used for seismic rehabilitation. Unsolved modelling issues of dissipative braces are also discussed in a detailed fashion. Finally, simple design provisions are outlined in order to guide practitioners in the modelling and design of dissipative systems for the seismic rehabilitation of existing r.c. structures.*

### 1. Introduzione

I recenti eventi sismici che si sono verificati in Italia (L'Aquila, 2009) ed in diverse altre parti del mondo (principalmente Perù, 2007, Haiti, 2010, Cile, 2010, Nuova Zelanda, 2010 e 2011, e Van, 2011) hanno evidenziato nuovamente l'elevata vulnerabilità sismica del patrimonio costruito esistente. Per poter minimizzare le perdite dirette ed indirette conseguenti a futuri inevitabili terremoti è necessario inizializzare re-

sponsabilmente un processo di mitigazione del rischio sismico che coinvolga diversi operatori del settore e che risulti fondato necessariamente su un approccio interdisciplinare. L'attuale stato delle conoscenze scientifiche consente di attivare diverse efficaci azioni di prevenzione e gestione del rischio sismico, nei limiti delle risorse economiche disponibili e delle capacità logistiche degli organi istituzionali preposti. Mitigare il rischio sismico significa principalmente, soprat-

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi del Sannio - ✉ disarno@unina.it

<sup>2</sup> Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università degli Studi di Napoli Federico II - ✉ diludovi@unina.it

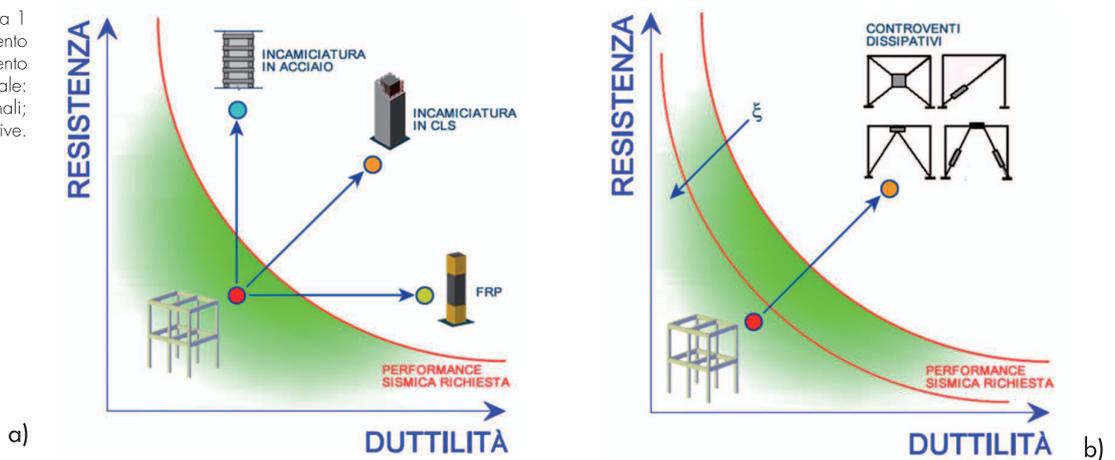
<sup>3</sup> Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università degli Studi di Napoli Federico II - ✉ aprota@unina.it

tutto per i soggetti coinvolti nella filiera edilizia, agire sulla vulnerabilità sismica delle costruzioni esistenti. Molti edifici presenti nelle aree urbane densamente popolate e nelle periferie delle città italiane sono stati costruiti in epoca antecedente alla classificazione sismica ovvero non presentano quelle caratteristiche progettuali e dettagli costruttivi tali da garantire adeguate prestazioni strutturali e non strutturali al verificarsi di terremoti di magnitudo medio-alta. Peraltro, così come dimostrato dal terremoto de L'Aquila del 6 Aprile 2009 molte costruzioni sono state realizzate in prossimità di faglie, note e/o di nuova formazione (Progettazione Sismica n.3-2009). Occorre pertanto procedere al miglioramento

re sulle costruzioni esistenti, in particolare per gli edifici intelaiati in c.a., così come illustrato graficamente nella Figura 1. Si può ricorrere a tecniche tradizionali ed interventi locali ovvero a tecniche innovative basate sull'isolamento sismico e/o dissipazione aggiunta e migliorare la prestazione sismica strutturale e non strutturale complessiva delle costruzioni esistenti (vedi Hanson & Soong, 2001; Christopoulos & Filiatrault, 2006)

Una tecnica molto efficace per l'adeguamento sismico delle costruzioni esistenti, in particolare per gli edifici con struttura intelaiata in c.a., è quella basata sulla dissipazione passiva ottenuta con l'utilizzo di sistemi ausiliari di dissipa-

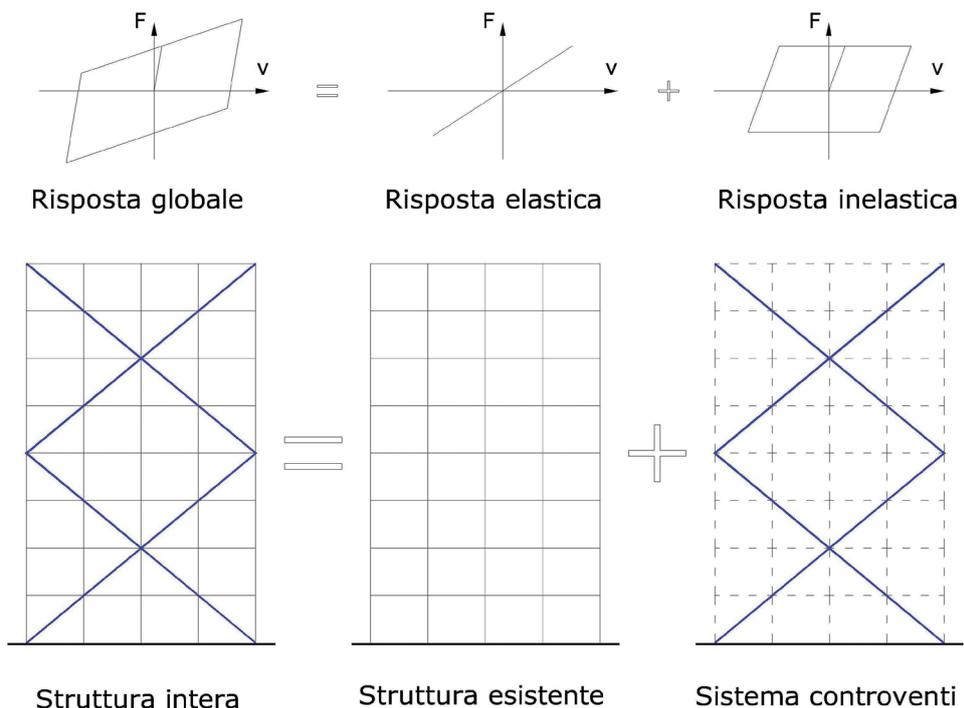
Figura 1  
Tecniche di adeguamento e miglioramento strutturale:  
(a) tradizionali;  
(b) innovative.



ed auspicabilmente, laddove possibile economicamente e tecnicamente, all'adeguamento sismico del patrimonio costruito che risulta essere sub-standard. Esistono oggi diverse tecniche per agi-

zione d'energia, per esempio i controventi dissipativi sia del tipo dipendenti dagli spostamenti (prevalentemente elasto-plastici ed attritivi) che dipendenti dalla velocità (principalmente dispo-

Figura 2  
Tecnica di intervento strutturale basata sul danno controllato.



sitivi viscosi). Tale tecnica è utilizzata per ridurre l'energia in ingresso e quindi contenere le deformazioni della struttura in modo da limitare o addirittura annullare il danno degli elementi strutturali e non strutturali, così come illustrato nei paragrafi successivi. Risulta molto conveniente negli interventi di adeguamento ovvero di miglioramento sismico preservare la struttura esistente da eventuali meccanismi inelastici (danno controllato), in particolare utilizzando un sistema di controventi dissipativi occorrerà garantire che la dissipazione energetica si attivi solo nei dispositivi aggiunti, così come schematicamente rappresentato in Figura 2.

La presente memoria propone preliminarmente una breve rassegna delle tipologie di controventi dissipativi più comunemente utilizzati per l'adeguamento sismico delle strutture esistenti, con particolare riferimento alle costruzioni in c.a. Si illustrano problematiche relative al comportamento meccanico e soprattutto alla modellazione ed analisi strutturale. Particolare enfasi viene data ad una tipologia di controventi che si sta diffondendo molto rapidamente tra le tecniche di intervento strutturale: i controventi metallici ad instabilità impedita. Si discutono le criticità evidenziate dall'esame critico delle indicazioni normative e si illustrano possibili sviluppi futuri.

## 2. Risposta delle strutture con sistemi di controllo passivo

Per l'analisi delle vibrazioni dei sistemi strutturali con controllo passivo, si introduce il semplice sistema ad un grado di libertà (vedi Figura 3). Esso è formato da un traverso rigido di massa  $m$ , supportato da due ritti di massa trascurabile, con comportamento elastico lineare e con rigidezza laterale totale pari a  $k$ , ed uno smorzatore viscoso a comportamento lineare caratterizzato dalla costante di smorzamento  $c$ . Tale smorzatore può essere utilizzato per caratteriz-

zare sia lo smorzamento equivalente proprio del sistema strutturale (tipicamente assunto pari al 5%) e quello aggiunto (attraverso sistemi di dissipazione ausiliare come per esempio isolatori sismici e/o controventi dissipativi).

Esprimendo lo spostamento totale ( $u$ ) del sistema meccanico considerato come somma dello spostamento assoluto della base ( $u_g$ ) e dello spostamento relativo tra la massa  $m$  e la base ( $u$ ):

$$u(t) = u_g(t) + u(t) \quad (1)$$

$$\dot{u}_1(t) = \dot{u}_g(t) + \dot{u}(t) \quad (2)$$

$$\ddot{u}_1(t) = \ddot{u}_g(t) + \ddot{u}(t) \quad (3)$$

applicando l'equazione di equilibrio dinamico al sistema ad un grado di libertà soggetto alla forza di trascinamento indotta dal sisma:

$$m \ddot{u}(t) + c \dot{u}(t) + k u(t) = -m \ddot{u}_g(t) \quad (4)$$

e dividendo entrambi i membri della precedente equazione per la massa,  $m$ , del sistema strutturale si ottiene:

$$\ddot{u}(t) + 2 \xi \omega \dot{u}(t) + \omega^2 u(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad (5)$$

dove:  $\xi = \frac{c}{C_{CR}} = \frac{c}{2\sqrt{k m}} = \frac{c}{2 \cdot m \cdot \omega}$

rappresenta il fattore di smorzamento equivalente

e  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$  la pulsazione naturale del sistema.

Le Equazioni 4 e 5 sussistono nell'ipotesi di comportamento elastico lineare del sistema ad un grado di libertà considerato. Occorre però osservare che il comportamento di una struttura, specialmente per quelle esistenti con sistemi intelaiati in c.a., è solo in prima approssimazione assumibile di tipo elastico quando soggette a terremoti di magnitudo medio-alta. Pertanto, indicando con  $F_s(u)$  la forza di richiamo agente

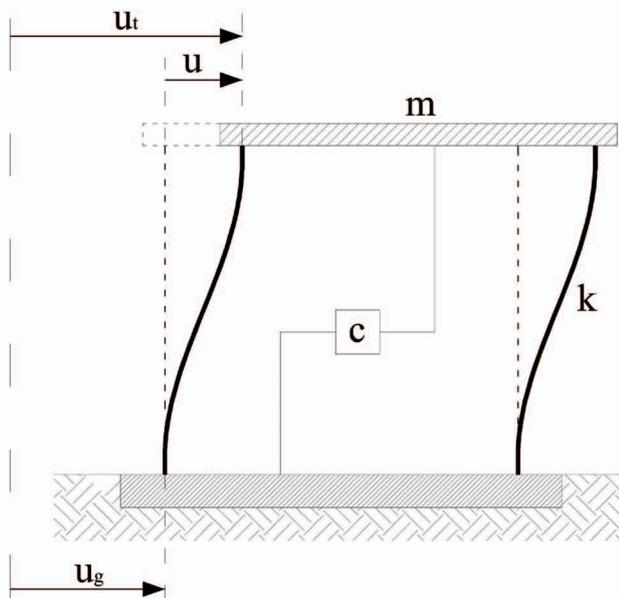


Figura 3  
Sistema ad un solo grado di libertà eccitato alla base.

sulla massa  $m$ , non proporzionale linearmente ad  $u$ , in quanto non necessariamente elastica lineare, l'Equazione 5 diventa:

$$m \cdot \ddot{u}_i + c \cdot \dot{u} + F_s(u) = 0 \quad (6)$$

ed integrando rispetto allo spostamento  $du$  si ottiene il bilancio energetico del sistema oscillante - forza sismica:

$$\int m \ddot{u}_i du + \int c \dot{u} du + \int F_s(u) du = 0 \quad (7)$$

$$\int m \ddot{u}_i (\dot{u}_i - \dot{u}_g) dt + \int c \dot{u} du + \int F_s(u) \dot{u}(t) dt = 0 \quad (8)$$

Ponendo poi:

$$E_K(t) = \int m \ddot{u}_i \dot{u}_i dt = \int m \dot{u}(t) d\dot{u} = \frac{1}{2} m \dot{u}(t)^2 \quad (9)$$

(energia cinetica dell'oscillatore semplice)

$$E_\zeta(t) = \int c \dot{u}(t) du = \int c \dot{u}^2(t) dt \quad (10)$$

(energia dissipata dalla smorzatore viscoso)

$$E_A(t) = \int F_s(u) du = \int F_s(u) \dot{u}(t) dt \quad (11)$$

(energia assorbita dalla forza di richiamo)

$$E_I(t) = \int m \ddot{u}_i(t) du_g \quad (12)$$

(energia in ingresso)

Si ottiene l'equazione del bilancio di energia del sistema strutturale evidenziato in Figura 2:

$$E_K(t) + E_\zeta(t) + E_A(t) = E_I(t) \quad (13)$$

Dalla Equazione 13 si deduce che l'energia in ingresso,  $E_I(t)$ , ovvero il lavoro compiuto dalla forza agente alla base della struttura, è somma, istante per istante, dell'energia cinetica dell'oscillatore semplice, dell'energia dissipata dallo smorzatore viscoso e dell'energia assorbita dalla forza di richiamo.

L'energia assorbita dal sistema si può dividere nelle due aliquote energia elastica di deformazione  $E_{ES}(t)$  ed energia di isteresi  $E_H(t)$ . Quest'ultima è una forma d'energia non recuperabile ed è dovuta al comportamento non elastico del materiale ovvero di tutte le forme di non linearità presenti nella struttura, sia a livello locale (materiale, sezione, elemento, collegamento) che a livello globale (sistema strutturale). Ne consegue che:

$$E_A(t) = E_{ES}(t) + E_H(t) \quad (14)$$

Tenuto conto di quanto posto nell'Equazione 14, si ha che l'Equazione 13 si può porre nella forma:

$$E_K(t) + E_\zeta(t) + E_{ES}(t) + E_H(t) = E_I(t) \quad (15)$$

Le componenti viscosa ed isteretica dell'energia sono funzioni crescenti del tempo in quanto rappresentano forme d'energia non recuperabili, al contrario l'energia cinetica ed elastica di deformazione possono anche essere restituite. Al cessare dell'azione sismica (forza di trascinamento, indotta dalla presenza del moto alla base del

sistema ad un grado di libertà in Figura 3), nella struttura avvengono oscillazioni d'ampiezza decrescente nel tempo, che si annullano quando tutta l'energia cinetica ed elastica di deformazione è dissipata.

Nell'istante  $t_q$ , in cui è ripristinata la condizione di quiete, l'Equazione 13 si riduce:

$$E_\zeta(t_q) + E_H(t_q) = E_I(t_q) \quad (16)$$

che esprime come l'energia globale in ingresso  $E_I(t_q)$  venga trasformata in energia viscosa  $E_\zeta(t_q)$  ed energia isteretica  $E_H(t_q)$ . In particolare, se il sistema rimane elastico, risulta  $E_H(t_q)=0$  e quindi tutta l'energia è dissipata mediante smorzamento viscoso:  $E_\zeta(t_q) = E_I(t_q)$ . Al contrario, se numerose sono le escursioni in campo plastico, ed il rapporto fra il coefficiente di smorzamento viscoso e quello critico è di poche unità per cento (cosa che si verifica usualmente nelle strutture ordinarie) si avrà  $E_\zeta(t_q) \ll E_I(t_q)$  e pertanto  $E_H(t_q) \cong E_I(t_q)$ .

Le precedenti considerazioni relative al comportamento dinamico di un sistema ad un grado di libertà, consentono di derivare le diverse strategie di intervento per il controllo strutturale passivo delle strutture ed in particolare per le metodologie di adeguamento sismico degli edifici in c.a. esistenti (vedi anche Figura 1):

- incremento dello smorzamento viscoso equivalente;
- incremento della capacità di dissipazione plastica della struttura;
- diminuzione dell'energia in ingresso.

Tali tecniche possono essere considerate separatamente ovvero anche in modo combinato allorché si ammette, per esempio, la formazione di alcune cerniere plastiche nella struttura intelaiata esistente oltre alla dissipazione dovuta allo smorzamento viscoso equivalente nei dispositivi di protezione sismica opportunamente installati nella stessa.

Le tecniche di incremento dello smorzamento strutturale consentono di attenuare la risposta risonante dei sistemi strutturali. Dato che in condizione di risonanza la forzante  $F(t)$  e la velocità sono in fase, l'amplificazione dinamica dello spostamento può essere controllata solo con forze in contro-fase alla velocità, ovvero aumentando lo smorzamento viscoso equivalente. L'attenuazione dell'energia in ingresso, che si basa anch'essa sull'incremento dello smorzamento viscoso della struttura, si effettua attraverso l'applicazione di dispositivi dissipatori nella struttura, come per esempio gli isolatori sismici ovvero i controventi dissipativi.

Nella presente memoria saranno illustrate e discusse le metodologie di intervento che si basano sull'incremento dello smorzamento viscoso equivalente e contestuale diminuzione dell'energia di ingresso nella struttura. L'obiettivo è quello di evitare che l'inelasticità interessi anche la struttura esistente in c.a. e si massimizzi

l'incremento di smorzamento viscoso aggiunto attraverso l'utilizzo di controventi dissipativi metallici, in particolare quelli del tipo ad instabilità impedita.

### 3. Comportamento e modellazione dei controventi dissipativi tipici

#### 3.1. Sistemi dissipativi elasto-plastici

Nei sistemi a comportamento elasto-plastico, la dissipazione d'energia avviene a seguito dello snervamento di elementi metallici, aventi forme opportunamente definite a seconda che siano utilizzati prevalentemente a flessione, torsione e/o sforzo assiale, oppure a taglio. Una comune tipologia di dispositivi isteretici elasto-plastici è quella ADAS (Added Damping and Added Stiffness: smorzamento e rigidità aggiunta), così come illustrati anche in Figura 4 (Bruneau et al, 1998). Tali dispositivi sono in grado di sostenere elevate deformazioni inelastiche derivanti anche da numerosi terremoti distruttivi; essi possono essere facilmente sostituiti in seguito all'evento sismico. Inoltre tali dispositivi presentano dei cicli d'isteresi particolarmente stabili. La plasticizzazione interessa elementi metallici all'interno di tali dispositivi, riducendo notevolmente il danneggiamento degli elementi strutturali e prevenendo danni anche ai componenti non strutturali. Un elemento ADAS consiste in una connessione con elevate capacità dissipative, che collega due elementi strutturali che hanno un moto relativo a seguito delle vibrazioni indotte nella struttura a causa del terremoto. Essi sono posizionati tra l'incrocio dei controventi e la parte centrale della trave e sono attivati dalle deformazioni conseguenti agli spostamenti di interpiano. Le parti in contatto diretto con gli elementi strutturali devono essere molto rigide e fra loro è inserito un dispositivo opportunamente progettato al fine di dissipare energia durante il moto. Tipici elementi ADAS utilizzano piatti in acciaio a forma ad X o triangolare; attraverso queste particolari forme dei dispositivi si ottiene una completa plasticizzazione dell'elemento e quindi una più elevata capacità dissipativa. I dispositivi ADAS devono essere progettati

in modo da distribuire il danno in maniera uniforme ai diversi i dell'edificio ed in modo che, quando essi snervano, lo sforzo assiale nei controventi non provochi instabilità. Affinché ciò sia possibile occorre selezionare accuratamente il carico di snervamento e la rigidità di ciascun dispositivo, scegliendo opportunamente il numero di piatti d'acciaio, la loro altezza ed il loro spessore. La prestazione di questi dispositivi è subordinata alla rigidità elastica e forza di snervamento dei dissipatori ed alla rigidità elastica della struttura a cui sono applicati. Tali dispositivi non incrementano semplicemente lo smorzamento, ma modificano significativamente tutte le caratteristiche dinamiche della struttura. Tipicamente essi riducono il periodo fondamentale e di conseguenza aumenta il taglio alla base. La soluzione con gli elementi ADAS è particolarmente vantaggiosa sia per nuove costruzioni sia nel caso d'adeguamento sismico, in particolare di strutture in c.a. In quest'ultimo caso l'inserimento dei dispositivi fornisce al tempo stesso un incremento di rigidità, garantito dagli elementi di controvento, ed un aumento delle capacità dissipative. Si possono così diminuire sensibilmente gli spostamenti di interpiano senza migliorare necessariamente le caratteristiche di duttilità dei nodi, poiché gran parte della dissipazione d'energia avviene all'interno dei nuovi dispositivi. La forza trasmessa ai nodi ed in generale a tutte le membrature che si collegano ai dispositivi ADAS corrisponde alla risultante delle forze di snervamento degli elementi dissipativi. Se si assume che la risposta di uno smorzatore isteretico sia elastica-perfettamente plastica e che la struttura abbia un comportamento elastico, il coefficiente di smorzamento viscoso equivalente ( $\xi$ ) dipende dal rapporto tra la forza di snervamento del dissipatore isteretico  $F_Y$  e la forza corrispondente al limite elastico della struttura  $F_E$  e dal rapporto tra la rigidità elastica del controvento  $K_D$  e la rigidità elastica della struttura  $K_S$ , come evidenziato in Figura 5.

$$\xi = \frac{2 \cdot \frac{F_Y}{F_E} \left( 1 - \frac{F_Y K_D}{F_E K_S} \right)}{\pi \cdot \left( 1 - \frac{F_Y}{F_E} \right)} \quad (17)$$

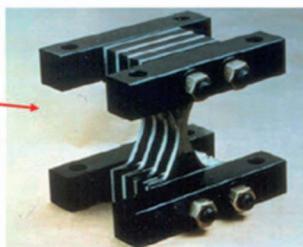
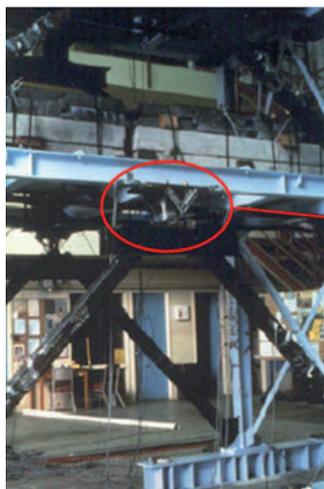
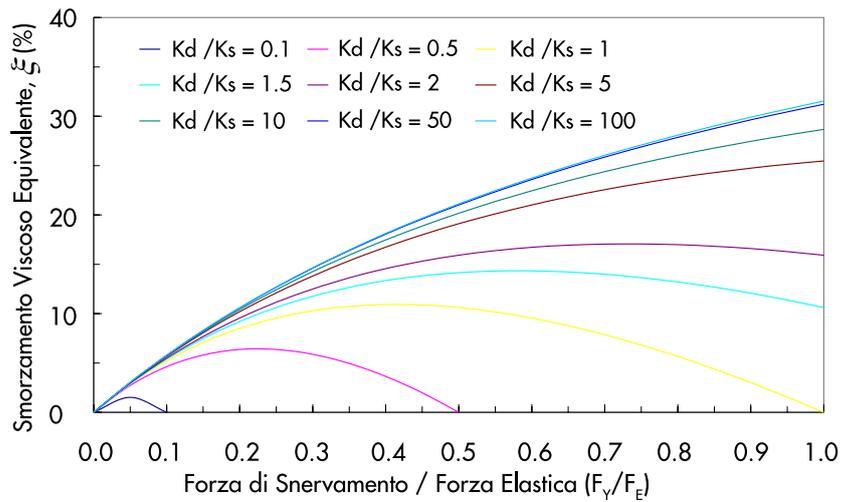


Figura 4  
Posizione di un dispositivo ADAS in un telaio (a) e particolare del dispositivo ADAS; (b), (Bruneau et al, 1998).

Figura 5  
Smorzamento viscoso equivalente in funzione delle proprietà meccaniche del controvento.



I controventi ad instabilità impedita dissipano energia per snervamento del materiale (acciaio), sia quando la diagonale risulta tesa che compressa. Questo sistema è composto da un nucleo costituito da un profilo metallico racchiuso in un tubo di acciaio riempito di calcestruzzo (Figura 6). In questo modo la diagonale interna può snervare per compressione e quindi rendere stabili i cicli di dissipazione dell'energia. La parte esterna è composta da un profilo cavo in acciaio riempito con calcestruzzo. Tale sistema impedisce l'instabilità globale del controvento e l'instabilità locale. Al fine di ridurre l'attrito tra il calcestruzzo ed il nucleo interno è applicato uno speciale rivestimento.

Questi sistemi sono particolarmente adatti per l'adeguamento sismico di edifici in c.a. ed acciaio. Essi saranno trattati in dettaglio anche nella sezione dedicata alla modellazione strutturale.

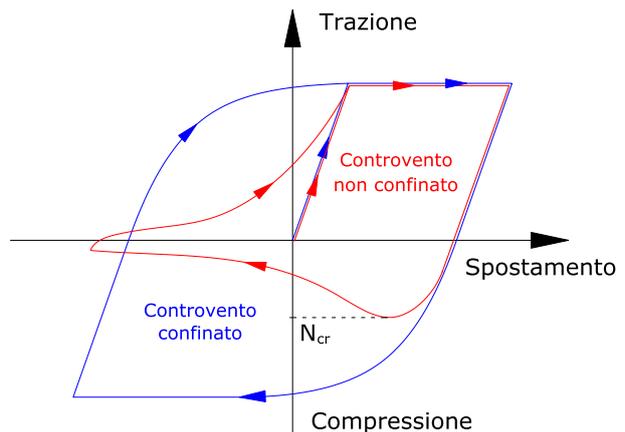
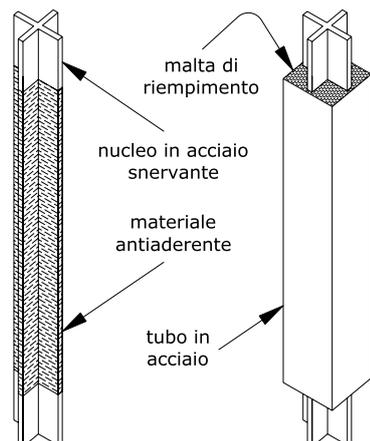
### 3.2 Sistemi dissipativi viscosi

I dispositivi che generano uno smorzamento di tipo viscoso in una struttura sono formati da un pistone che scorre all'interno di una camera riempita con olio di silicone pressurizzato (Figura 7). Lo stelo del dispositivo, di acciaio inossidabile, è connesso al pistone di testa che presenta

un gran numero di fori.

Quando il pistone si muove all'interno del cilindro, l'olio è forzato a passare attraverso i fori del pistone di testa e così si genera l'attrito. Se il fluido è puramente viscoso, la forza di smorzamento che nasce è direttamente proporzionale alla velocità del pistone. La risposta è lineare per un ampio campo di frequenze del carico. Questo dispositivo è dotato di valvole di controllo che consentono di limitare la forza trasmessa alla struttura. Superato un determinato valore della pressione, le valvole si aprono facendo aumentare la velocità di deformazione e, contemporaneamente, diminuire la forza. In aggiunta, il dispositivo è fornito di un accumulatore per compensare il volume di scambio. Inoltre questi smorzatori viscosi esibiscono caratteristici irrigidimenti ad elevate frequenze di deformazione. Gli smorzatori con fluido pressurizzato sono dotati, di solito, di capacità ricentrante. Gli smorzatori viscosi hanno una bassa resistenza alla deformazione, quando il carico è applicato lentamente, ma la resistenza aumenta all'aumentare della velocità di deformazione. Quando essi sono installati negli edifici, solitamente nei controventi, l'energia in ingresso derivante dal terremoto è trasformata tramite l'attrito in calore.

Figura 6  
Controvento ad instabilità impedita: nucleo interno con materiale di rivestimento (sinistra), dispositivo assemblato (centro), ciclo di isteresi schematico (destra).



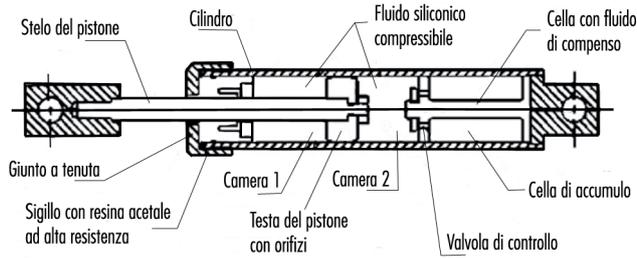


Figura 7  
Geometria di uno smorzatore di tipo viscoso con limitazione della forza.

Gli smorzatori viscosi sono utilizzati per il controllo delle vibrazioni sia di edifici nuovi che nel caso di adeguamento sismico, specialmente in strutture intelaiate in c.a. ed acciaio. Lo smorzamento fornito dai dispositivi a fluido viscoso è funzione della velocità. La relazione tra la forza di smorzamento  $F_D$  e la velocità applicata ( $\dot{\Delta}$ ) è la seguente:

$$F_D = C \cdot |\dot{\Delta}|^\alpha \text{sgn}(\dot{\Delta}) \quad (18)$$

in cui  $\alpha$  è un coefficiente che dipende dallo smorzatore e ( $\dot{\Delta}$ ) è il segno della funzione definito in base al segno della velocità relativa. La risposta meccanica degli smorzatori viscosi è governata da due parametri: il coefficiente  $C$  e l'esponente  $\alpha$ . Nelle pratiche applicazioni il coefficiente  $\alpha$  varia tra 0.3 ed 1.0; esso dovrebbe assumere il valore più elevato possibile. Il valore di  $\alpha = 1.0$  genera una relazione lineare tra la velocità e lo spostamento. Il limite inferiore dell'esponente, all'incirca 0.3, dovrebbe essere evitato in quanto le forze di smorzamento non sarebbero in fase con gli spostamenti e pertanto si avrebbe un incremento degli spostamenti della struttura. Il coefficiente di smorzamento  $C$  può assumere pressoché qualsiasi valore:  $C$  può essere aumentato o diminuito semplicemente definendo il numero di smorzatori installati nella struttura. Alcuni tipi di smorzatori viscosi hanno una valvola di sussidio che consente di limitare la velocità. Questo è utile nella limitazione della forza, ma riduce la differenza di fase tra la velocità e lo spostamento, che fa diminuire l'efficacia dello smorzatore sulle prestazioni globali della struttura. La determinazione della posizione ottimale per massimizzare le prestazioni, così come il numero di smorzatori e la loro capacità è di fondamentale importanza. Lo smorzatore è montato in serie con il controvento ed il parallelo con la struttura. Di conseguenza, il controvento

riduce la deformazione dello smorzatore dovuta allo spostamento di piano. Infatti, il primo ha un comportamento simile ad una molla, mentre la diagonale forma, nel complesso, un sistema in serie composto da molla e smorzatore. Per questo la deformabilità della molla riduce gli spostamenti relativi dello smorzatore.

Esiste poi un'altra categoria di dispositivi: i sistemi visco-elastici. Questi dispositivi sono basati su materiali viscoelastici (vedi Figura 8) ed hanno un'elevata capacità dissipativa dovuta alla deformazione a taglio. I materiali viscoelastici sono caratterizzati da una risposta lineare per un largo campo di deformazione, purché la temperatura sia costante. Per valori elevati della deformazione, ad esempio 300-500%, la dissipazione d'energia genera l'auto-riscaldamento del materiale e di conseguenza si ha alterazione delle proprietà meccaniche, in particolare il materiale diventa altamente non lineare.

La forza che nasce in tali dispositivi è in parte funzione della velocità e in parte funzione dello spostamento. I controventi devono essere notevolmente rigidi in modo che, quando avviene un terremoto, lo spostamento di piano e la relativa velocità di spostamento sono trasferiti integralmente ai piatti dei dispositivi. Così il materiale viscoelastico subisce una deformazione a taglio e di qui si ha la dissipazione d'energia con conseguente attenuazione delle vibrazioni.

La forza di smorzamento  $F_D$  è funzione della velocità  $\dot{\Delta}$  e dello spostamento  $\Delta$  e può essere valutata così:

$$F_D = k_{\text{eff}} \cdot \Delta + C \cdot \dot{\Delta} \quad (19)$$

dove  $C$  è il coefficiente di smorzamento e  $k_{\text{eff}}$  è la rigidità effettiva dello smorzatore data da:

$$k_{\text{eff}} = \frac{G' \cdot A_b}{t} \quad (20)$$

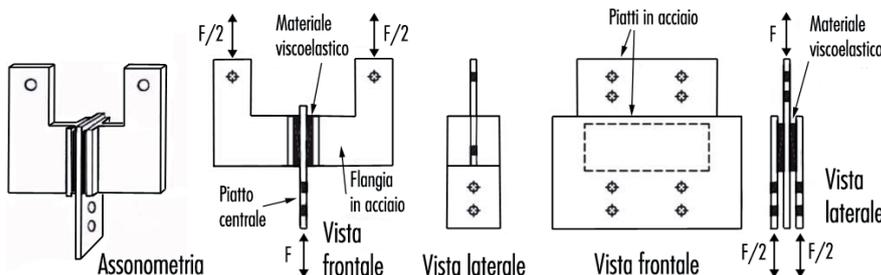


Figura 8  
Tipico dispositivo dissipativo viscoelastico con piatti ortogonali

in cui  $G'$  è il modulo di taglio dipendente dalla storia di carico del materiale,  $A_b$  l'area in comune tra materiale visco-elastico e piatti di acciaio e  $t$  è lo spessore totale del materiale visco-elastico nel dispositivo. Il coefficiente di smorzamento dipende da: (i) proprietà geometriche del dispositivo, (ii) proprietà meccaniche del materiale e (iii) dal contenuto in frequenza del carico applicato. Esso è dato dalla seguente relazione:

$$C = \frac{G'' \cdot A_b}{\omega \cdot t} \quad (21)$$

dove  $G''$  è la perdita di modulo di taglio e  $\omega$  è la frequenza del carico.

### 3.3 Sistemi dissipativi ad attrito

Questi sistemi si basano sul fenomeno dell'attrito che nasce tra due corpi solidi a contatto, quando subiscono degli spostamenti relativi. L'attrito è un'eccellente tecnica per la dissipazione d'energia. I cicli d'isteresi dei singoli elementi, cui è demandata la dissipazione ad attrito, sono praticamente stabili, come mostrato in Figura 9. Il comportamento è rigido fino al raggiungimento della forza resistente ( $F_s$ ) ed il dispositivo è in grado di mantenere costante la forza resistente ( $F_s$ ) fino allo spostamento richiesto ( $v_s$ ). Per evitare danni strutturali, la progettazione del complesso dispositivo più struttura è tale da richiedere, solitamente, che la struttura resti in campo elastico e nel forzare tutta la dissipazione energetica richiesta dall'evento sismico all'interno dei dispositivi. Sotto tale ipotesi il comportamento della sola struttura sarà di tipo elastico con dissipazione isteretica nulla. Le possibilità d'inserimento, del dispositivo ad attrito all'interno della struttura, sono di diverso tipo. In particolare, l'accoppiamento dispositivo struttura può essere in serie o in parallelo, e nel caso ipotizzato di struttura che rimane in campo

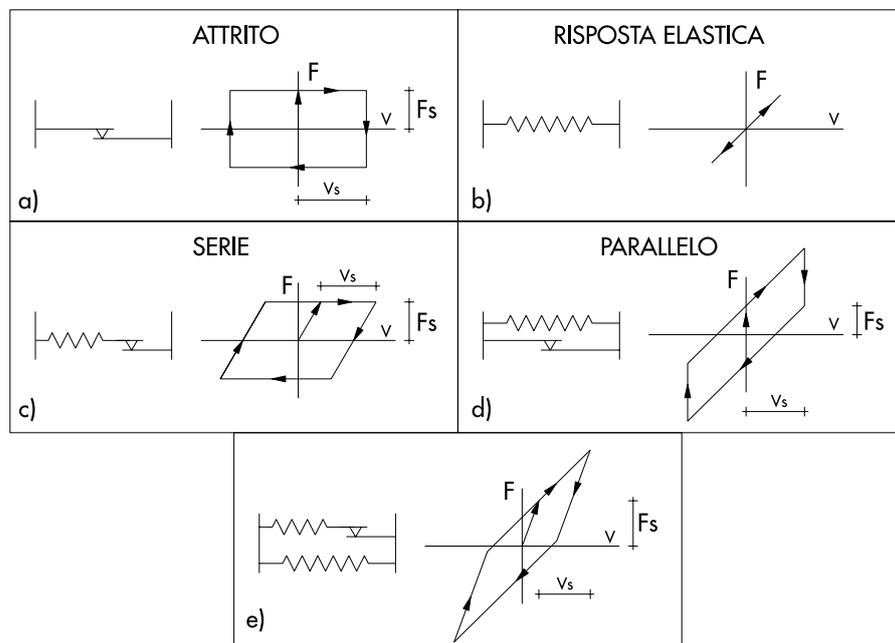
elastico, i cicli d'isteresi previsti sono quelli di Figura 9. Quando l'accoppiamento è in serie, il ciclo del complesso elemento più struttura si ottiene, fissato il valore della forza, sommando i corrispondenti valori dello spostamento ricavati dai cicli del singolo elemento. Se, invece, l'accoppiamento è in parallelo, si fissa lo spostamento e si sommano le forze corrispondenti in ciascun componente. C'è anche la possibilità di installare i dispositivi simultaneamente in serie e in parallelo, in questo caso il ciclo di isteresi è mostrato in Figura 9.e.

Generalmente, i dispositivi ad attrito offrono delle buone prestazioni sotto sisma e la loro risposta è indipendente dal carico, dalla frequenza e dal numero di cicli. Ad essi è associata un'elevata capacità di dissipare energia, un costo relativamente basso, facilità di installazione e di manutenzione. I dissipatori ad attrito producono dei cicli d'isteresi rettangolari particolarmente stabili. Alcuni, essendo progettati per produrre una forza di ricentraggio, forniscono dei cicli d'isteresi con forma non rettangolare e con carico proporzionale allo spostamento. Lo smorzamento viscoso equivalente di uno smorzatore ad attrito può essere computato come di seguito:

$$\beta = 2 \cdot \frac{F_Y}{F_E} \left/ \left[ \pi \cdot \left( 1 + \frac{F_Y}{F_E} \right) \right] \right. \quad (22)$$

Questa formula deriva dall'Equazione 1 assumendo che la rigidità della struttura sia infinitamente superiore alla rigidità dello smorzatore. Quando la forza del dispositivo ad attrito è molto grande rispetto alla forza corrispondente al limite elastico della struttura, cioè  $F_Y \gg F_E$ , il limite superiore dello smorzamento viscoso equivalente è  $2/\pi$  ovvero 63,99 %.

Figura 9  
Tipico ciclo d'isteresi di un dispositivo ad attrito (a); risposta elastica della struttura (b); ciclo d'isteresi del dispositivo montato in serie sulla struttura (c); ciclo d'isteresi del dispositivo montato in parallelo sulla struttura (d); ciclo d'isteresi del dispositivo montato simultaneamente in serie e in parallelo (e).



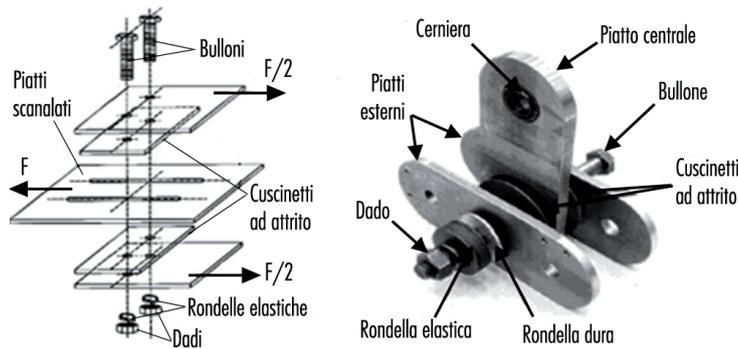


Figura 10  
Dissipatori ad attrito per  
connessioni di controventi:  
connessione scanalata  
bullonata (sinistra) e  
connessione per controventi  
a V rovescia (destra).

Gli smorzatori ad attrito possiedono, inizialmente, una rigidità finita perché sono montati sui controventi, per questo il loro comportamento è simile agli smorzatori isteretici. I dispositivi possono, però, essere installati anche all'incrocio di due controventi. In tal caso quando il controvento entra in forza si ha lo scorrimento della connessione. Questi dispositivi sono fissi, quando la struttura è sollecitata da terremoti d'intensità media-bassa o vento, entrano in funzione per proteggere la struttura primaria dal danneggiamento. Un dispositivo con dissipazione ad attrito da utilizzarsi in strutture sismo-resistenti consiste in una semplice giunzione bullonata, in cui il carico di preserraggio è determinato in modo da fornire un fissato valore della forza di slittamento fra le due superfici a contatto. L'elemento dissipatore deve essere progettato in modo che si abbia lo slittamento sotto l'azione di un terremoto, prima che gli elementi strutturali plasticizzino. A seguito dello slittamento avviene la dissipazione d'energia per attrito. Esempi di tipici dispositivi dissipativi per connessioni di controventi sono riportati in Figura 10. Essi sono rispettivamente una connessione scanalata bullonata e un dispositivo per le connessioni dei controventi a V rovescia. Le connessioni scanalate bullonate stanno diventando sempre più diffuse per le connessioni dei controventi perché la loro particolarità è una lieve modifica rispetto ad una connessione standard e sono molto facili da costruire e da montare. Queste connessioni sono progettate per dissipare energia tramite l'attrito che nasce tra i piatti d'acciaio sia per il controvento in trazione che per quello in compressione, caricati ciclicamente. I connettori disposti intorno alla giunzione formano un meccanismo articolato capace di incrementare la capacità dissipativa, attivando lo slittamento fra le due parti del controvento compresso. In tal modo si contrasta anche la fuoriuscita dal piano del telaio per instabilità dell'elemento compresso, che risulta così pronto ad entrare di nuovo in gioco non appena cambia il verso dell'azione sismica. Inoltre, la dissipazione ottenuta mediante l'utilizzo di questi dispositivi è diffusa a tutti i livelli dell'edificio, grazie alla

possibilità di assegnare un diverso grado di preserraggio. Tali dispositivi sono modellabili analiticamente in maniera molto semplice, quando si usa acciaio su acciaio, e le loro prestazioni sono soddisfacenti. In alternativa sono usate delle connessioni con piatti di acciaio su ottone che presentano un comportamento molto uniforme.

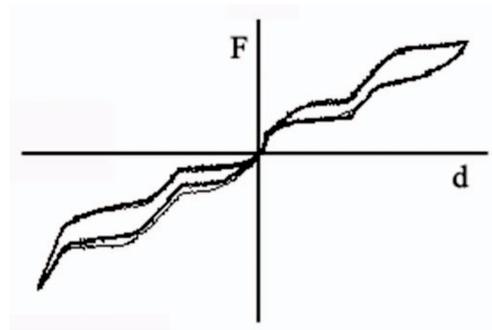
### 3.4 Leghe a memoria di forma

Le leghe a memoria di forma (LMF) sono leghe metalliche, solitamente formate da Nichel-Titanio. Le straordinarie capacità di queste leghe si manifestano attraverso una variazione di forma che avviene con continuità in maniera del tutto reversibile al variare della temperatura. Durante questo processo la struttura atomica del materiale passa da una forma stabile ad alte temperature ad una forma stabile a basse temperature attraverso una trasformazione martensitica. Tale materiale presenta altre peculiari proprietà come l'effetto "pseudo-elastico", che è impropriamente detto effetto superelastico, ed un'elevata capacità di smorzamento. L'effetto pseudo-elastico è dovuto ad una deformazione residua nulla allo scarico, anche se l'elemento è stato sottoposto a deformazioni elevate (8-10%). Tipicamente le LMF vengono utilizzate per dispositivi di tipo assiale, soprattutto come tiranti in edifici storici e monumentali. Tali dispositivi sono particolarmente adatti per il collegamento tra gli orizzontamenti e le pareti di un edificio in muratura, in sostituzione dei tradizionali tiranti in acciaio o in serie con essi, al fine di evitare il collasso per ribaltamento delle pareti fuori dal loro piano a causa delle azioni orizzontali indotte dal sisma. Tali materiali sono caratterizzati da una curva forza-spostamento con uno o più "plateaux", ovvero tratti in cui la forza rimane pressoché costante all'aumentare dello spostamento. Ciò consente, ai dispositivi, di limitare sensibilmente il carico massimo trasmesso alla struttura, a cui sono connessi. Le LMF presentano eccezionali proprietà quali, un'altissima resistenza alla corrosione, addirittura superiore all'acciaio inossidabile, una straordinaria resistenza a fatica, grande durabilità e regolarità di comportamento. Questi dispositivi sono ca-

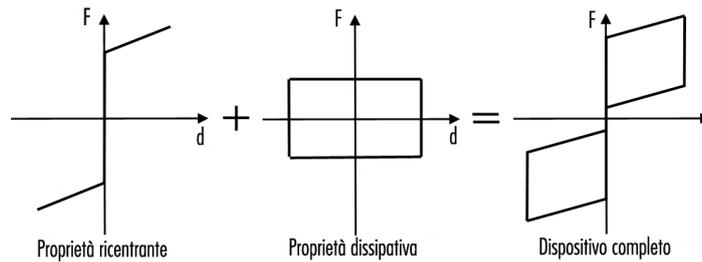
Figura 11  
Dispositivo SMA per  
vincolo assiale  
(a), ciclo di isteresi di  
un dispositivo SMA (b),  
scomposizione del ciclo di  
isteresi schematico di un  
dispositivo SMA (c).



a)



b)



c)

ratterizzati da una grande versatilità in quanto, variando il numero e/o le caratteristiche di fili, si può ottenere il ciclo isteretico desiderato. Il particolare legame costitutivo delle LMF è ottenuto sfruttando le proprietà della lega a memoria di forma che, è utilizzata sotto forma di fili di piccolo diametro. In Figura 11 è mostrata una tipica modellazione del comportamento meccanico di un dispositivo di vincoli assiale con LMF, separando il comportamento elastico da quello isteretico (Dolce et al, 2000).

#### 4 Controventi dissipativi metallici negli attuali codici di calcolo

##### 4.1 Tipiche modellazioni

I più diffusi controventi dissipativi metallici sono attualmente i cosiddetti controventi ad instabilità impedita il cui comportamento meccanico sotto azioni sismiche è stato illustrato nei paragrafi precedenti. I controventi ad instabilità impedita sono generalmente modellati in analisi nonlineari (statiche o dinamiche) come elementi tipo pendolo elasto-plastico (perfettamente plastico o con incrudimento lineare del 2-3%). I dispositivi isteretici possono infatti essere simulati con elementi strutturali attivi solo per azioni assiali di trazione/compressione. Le condizioni al contorno corrispondono a sconnessioni (vincolo cerniera flessionale) poste alle due estremità dell'elemento strutturale. In tal modo sono impediti, quindi, solo le traslazioni relative tra i punti di estremità dei controventi e gli elementi strutturali cui essi sono collegati.

In genere i controventi dissipativi ad instabilità impedita utilizzati per l'adeguamento sismico delle strutture in c.a. sono formati da due elementi disposti in serie: un profilo tubolare che deve rimanere in fase elastica ed un dissipatore assiale ad instabilità impedita a comportamento

elasto-plastico incrudente. La disposizione in serie dei due elementi avviene attraverso un collegamento flangiato; la connessione alla struttura in calcestruzzo dei due elementi così assemblati avviene attraverso collegamenti a perno ovvero del tipo flangiato posti alle due estremità della diagonale metallica. La condizione di vincolo alle due estremità del controvento è, quindi, una cerniera, mentre la condizione di vincolo tra il tubolare ed il dissipatore può essere considerato un incastro. Ovviamente il vincolo di continuità (incastro) tra le due parti collegate in serie deve essere garantito utilizzando un opportuno collegamento, frequentemente un sistema flangiato di tipo rigido ed a completo ripristino di resistenza. Tale collegamento deve essere progettato nel rispetto delle regole di gerarchia di resistenza, in funzione quindi della massima capacità resistente delle parti (tubolare metallico ed elemento dissipativo) ad esso collegate.

Tenuto conto che il tubolare metallico ed il dissipatore sono disposti in serie e che le condizioni di vincolo al contorno degli elementi pendoli-inelastici sono delle cerniere flessionali, si può convenientemente anche procedere a modellare i controventi nel loro complesso con un unico elemento appartenente sempre alla classe pendolo-inelastico ma con caratteristiche meccaniche equivalenti.

Occorrerà poi fare delle verifiche locali di resistenza ed instabilità per garantire il comportamento del sistema in parallelo. Una tale circostanza si applica per tutti i tipi di dispositivi dissipativi metallici.

In un generico dissipatore isteretico, la resistenza del sistema formato da elementi disposti in serie è pari alla resistenza dell'elemento più debole, mentre la deformabilità dell'intero sistema è uguale alla somma delle deformabilità

dei singoli elementi. Sulla base delle proprietà fondamentali dei sistemi in serie è quindi possibile definire le caratteristiche del sistema equivalente, che può assumersi con comportamento bilineare.

La modellazione che può adottarsi nella simulazione con elementi finiti per le strutture in c.a. e quindi anche per il sistema di controventamento è del tipo a plasticità concentrate ovvero a plasticità diffuse. Nel primo caso, specificatamente per gli elementi diagonali, è sufficiente definire le proprietà delle cerniere assiali di estremità del controvento con caratteristiche equivalenti: occorrerà pertanto inserire un elemento cerniera plastica assiale caratterizzato da un legame forza-spostamento associato alla forza di snervamento della diagonale ed alla corrispondente deformazione. E' anche possibile definire due cerniere plastiche, una per ciascuna delle estremità del controvento, ma in tal caso per la deformazione occorrerà riferirsi alla semilunghezza del controvento. Sarà altresì necessario depurare il legame costitutivo forza-spostamento della cerniera plastica dell'aliquota elastica se l'elemento finito pendolo viene modellato con sue specifiche proprietà elastiche.

Nel caso dell'approccio basato sulla plasticità diffusa (noto anche come modellazione a fibre) occorre definire proprietà equivalenti dell'elemento inelastico a fibra utilizzato. Nel seguito ci si sofferma sulla modalità operativa relativa ai modelli a plasticità diffusa.

I dati di cui in genere si dispone sono: la resistenza allo snervamento del dissipatore ( $F_{y,BRAD}$ ), la massima forza resistente del dissipatore ( $F_{max,BRAD}$ ), lo spostamento a cui corrisponde la massima forza resistente del dissipatore ( $\Delta_{max,BRAD}$ ), la rigidezza elastica del dissipatore ( $K_{el,BRAD}$ ), la lunghezza del dissipatore ( $L_{BRAD}$ ), il modulo elastico del materiale costituente il tubolare ( $E_{BRACE}$ ), l'area della sezione trasversale del tubolare ( $A_{BRACE}$ ), la lunghezza del tubolare ( $L_{BRACE}$ ) e la resistenza del tubolare.

Le caratteristiche meccaniche da valutare sono quelle che consentono di descrivere il comportamento del materiale costituente il sistema equivalente, che in questo caso è di tipo bilineare, eventualmente con incrudimento lineare. Tali caratteristiche sono: il modulo elastico equivalente ( $E_{el,EQ}$ ), la tensione di snervamento equivalente ( $f_{y,EQ}$ ), il parametro di incrudimento ( $\mu_{EQ}$ ) e la deformazione ultima del sistema equivalente ( $\epsilon_{max,EQ}$ ). La rigidezza elastica del sistema equivalente può essere calcolata, trattandosi di un collegamento in serie, attraverso la seguente relazione:

$$K_{el,EQ} = \frac{1}{\frac{1}{K_{el,BRAD}} + \frac{1}{K_{el,BRACE}}} \quad (23)$$

in cui la rigidezza elastica del dissipatore è un dato noto, mentre la rigidezza elastica del con-

trovento è esprimibile come:

$$K_{el,BRACE} = \frac{E_{BRACE} \cdot A_{BRACE}}{L_{BRACE}} \quad (24)$$

La rigidezza elastica equivalente può pertanto esprimersi come di seguito:

$$K_{el,EQ} = \frac{E_{el,EQ} \cdot A_{BRACE}}{L_{BRAD} + L_{BRACE}} \quad (25)$$

dalla quale si può ricavare il modulo di elasticità del sistema equivalente, ovvero:

$$E_{el,EQ} = \frac{K_{el,EQ} \cdot (L_{BRAD} + L_{BRACE})}{A_{BRACE}} \quad (26)$$

Le tensione di snervamento del sistema equivalente è data dal rapporto tra la forza di snervamento del dissipatore e l'area della sezione trasversale del controvento, ovvero:

$$f_{y,EQ} = \frac{F_{y,BRAD}}{A_{BRACE}} \quad (27)$$

Il parametro d'incrudimento del sistema equivalente è dato dal rapporto tra la rigidezza post-snervamento del sistema equivalente e la rigidezza elastica del sistema equivalente, ovvero:

$$\mu_{EQ} = \frac{K_{pl,EQ}}{K_{el,EQ}} \quad (28)$$

La rigidezza post-snervamento del sistema equivalente può essere definita in funzione della rigidezza elastica del controvento e della rigidezza post-elastica del dissipatore:

$$K_{el,EQ} = \frac{1}{\frac{1}{K_{pl,BRAD}} + \frac{1}{K_{el,BRACE}}} \quad (29)$$

in cui  $K_{pl,BRAD}$  è la rigidezza post-snervamento del dissipatore data da:

$$K_{pl,BRAD} = \frac{F_{max,BRAD} - F_{y,BRAD}}{\Delta_{max,BRAD} - \Delta_{y,BRAD}} \quad (30)$$

con  $\Delta_{y,BRAD} = \frac{F_{y,BRAD}}{K_{el,BRAD}}$

La deformazione ultima del sistema equivalente è esprimibile come rapporto tra l'allungamento massimo del sistema equivalente e la lunghezza totale del controvento e del dissipatore, ovvero:

$$\epsilon_{max,EQ} = \frac{\Delta_{max,EQ}}{L_{BRACE} + L_{BRAD}} \quad (31)$$

dove l'allungamento massimo del sistema equivalente è dato dalla somma dell'allungamento massimo del dissipatore e dell'allungamento elastico del controvento per effetto della forza massima sopportata dal dissipatore:

$$\Delta_{max,EQ} = \Delta_{max,BRAD} + \Delta_{el,BRACE} (F_{max,BRAD}) \quad (32)$$

L'allungamento massimo del controvento è determinato come rapporto tra la forza massima assorbita dal dissipatore e la rigidità elastica del controvento:

$$\Delta_{el,BRACE} (F_{max,BRAD}) = \frac{F_{max,BRAD}}{K_{el,BRACE}} \quad (33)$$

I valori delle diverse grandezze che caratterizzano il sistema equivalente, variano da sistema a sistema in funzione delle caratteristiche del dissipatore isteretico e di quelle del controvento metallico (elastico) utilizzato. Nelle pratiche applicazioni si scelgono in genere dissipatori isteretici e controventi con caratteristiche che variano in funzione del piano in cui vengono collocati nella struttura. Tuttavia i controventi di uno stesso livello hanno lunghezza diversa, per cui le caratteristiche del sistema equivalente variano da sistema a sistema. Si riporta in Tabella 1 un esempio di calcolo delle proprietà equivalenti di un sistema costituito da un controvento metallico collegato in serie ad un dispositivo ad instabilità impedita. Si possono quindi determinare le proprietà equivalenti del pendolo inelastico da utilizzare nel modello numerico della struttura da adeguare. Le calcolazioni riportate nella Tabella

1 sono facilmente implementabili in un foglio di calcolo ovvero in un semplice algoritmo per il calcolo numerico automatico.

#### 4.2 Criticità irrisolte e possibili soluzioni

La modellazione con elementi tipo pendolo elasto-plastico con proprietà equivalenti risulta essere sufficientemente adeguata per analisi non lineari statiche (pushover) e dinamiche (analisi non lineari al passo). Modellazioni più accurate, che tengano conto anche della fatica oligo-ciclica e di modelli di frattura, oltre ad imperfezioni di tipo geometrico e meccaniche, possono essere richieste per specifiche applicazioni ovvero per analizzare le prestazioni sismiche in condizioni non ordinarie. Per esempio, per l'esame della risposta sismica delle strutture con controventi dissipativi metallici ad instabilità impedita soggette a terremoti di lunga durata ovvero a sequenze sismiche di magnitudo medio-alta è necessario implementare modelli dei dispositivi che tengano conto della deformazione accumulata e siano caratterizzati da criteri di rottura basati sulla fatica e frattura. Modellazioni avanzate possono anche portare in conto i fenomeni di instabilità accoppiata flessionale e flesso-torsionale. Tali ultimi modelli, basati generalmente su una discre-

Tabella 1 - Proprietà equivalenti di un sistema costituito da un controvento metallico collegato in serie ad un dispositivo ad instabilità impedita.

Diametro esterno del controvento	$D_{est}$	[mm]	140
Diametro interno del controvento	$D_{int}$	[mm]	120
Spessore del controvento tubolare	$t$	[mm]	10
Lunghezza dissipatore + controvento (BRACE + BRAD)	$L_{tot}$	[mm]	4280
Lunghezza del dissipatore	$L_{BRAD}$	[mm]	1005
Rigidità elastica del dissipatore	$K_{el,BRAD}$	[N/mm]	305000
Forza di snervamento del dissipatore	$F_{y,BRAD}$	[N]	350000
Spostamento di snervamento del dissipatore	$\Delta_{y,BRAD}$	[mm]	1.15
Modulo di elasticità acciaio controventi	$E_{BRACE}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	200000
Area della sezione trasversale del controvento	$A_{BRACE}$	[mm <sup>2</sup> ]	4.084
Lunghezza del controvento	$L_{BRACE}$	[mm]	3.275
Rigidità assiale controvento fase elastica	$K_{el,BRACE}$	[N/mm]	249409
Rigidità equivalente in fase elastica	$K_{el,EQ}$	[N/mm]	137209
Allungamento del controvento alla forza di snervamento	$\Delta_{el,BRACE}(F_{y,BRAD})$	[mm]	1.40
Allungamento allo snervamento del sistema equivalente	$\Delta_{y,EQ}$	[mm]	2.55
Forza assorbita dal dissipatore allo spostamento massimo	$F_{max,BRAD}$	[N]	420000
Spostamento massimo del dissipatore	$\Delta_{max,BRAD}$	[mm]	20
Rigidità tangente post-snervamento del dissipatore	$K_{pl,BRAD}$	[N/mm]	3713
Rigidità post-snervamento del sistema equivalente	$K_{pl,EQ}$	[N/mm]	3659
Allungamento del controvento alla forza massima	$\Delta_{el,BRACE}(F_{max,BRAD})$	[mm]	1.68
Allungamento massimo del sistema equivalente	$\Delta_{max,EQ}$	[mm]	21.68
Modulo elastico equivalente in fase elastica	$E_{el,EQ}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	143791
Tensione di snervamento del sistema equivalente	$f_{y,EQ}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	86
Parametro di incrudimento	$\mu_{EQ}$		0.0267
Deformazione ultima del controvento	$\epsilon_{max,EQ}$		0.0051

tizzazione ad elementi finiti tridimensionali, sono di interesse specifico della ricerca e dei produttori dei dispositivi di dissipazione. I controventi dissipativi basati sulla dissipazione isteretica, in particolare i dispositivi ad instabilità impedita, sono progettati in modo da prevenire i suddetti fenomeni di instabilità. Modellazioni semplificate basate sulla risposta elastica equivalente del sistema in serie controvento dissipativo ed elemento metallico si rendono necessarie quando si intende utilizzare metodi di analisi di tipo lineare, per esempio analisi modale con spettro di risposta. È utile evidenziare che in tal caso occorrerà procedere ad un'analisi iterativa per la calibrazione del modello elastico equivalente del dispositivo dissipativo. La rigidezza secante dell'elemento di controvento è infatti funzione dello spostamento obiettivo, specifico per ciascun stato limite di riferimento. Per stati limite di esercizio, ovvero in condizioni per le quali si vuole che i controventi non siano attivi, la rigidezza del sistema elastico equivalente è univocamente determinata: possono in tal caso sfruttarsi le Equazioni da 29 a 33. Quando viene superata la soglia elastica, occorrerà per un prefissato spostamento ricalcolare le proprietà equivalenti del dispositivo, eseguire le analisi e poi verificare, a valle, se le proprietà iniziali equivalenti, specificatamente la rigidezza elastica secante, è consistente con la domanda di spostamenti calcolata per ciascun dispositivo. Si evidenzia esplicitamente che nel caso di analisi dinamica modale con spettro di risposta occorrerà tener conto nell'analisi di uno smorzamento viscoso equivalente anch'esso funzione dello spostamento di progetto.

#### 4. Controventi dissipativi nelle norme tecniche per le costruzioni 2008

Le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2008) prevedono al Capitolo 7.10 indicazioni in merito a "costruzioni e ponti con isolamento e/o dissipazione". In realtà l'analisi critica delle disposizioni normative evidenzia che sia nelle NTC 08 che nella relativa Circolare n.617/09, vi è una quasi completa assenza di indicazioni relative ai requisiti generali, criteri generali e loro soddisfacimento, indicazioni progettuali, modellazione ed analisi strutturale, verifiche strutturali per sistemi di dissipazione aggiunta ed in particolare controventi dissipativi. I predetti documenti normativi riportano semplicemente le caratteristiche e criteri di accettazione dei dispositivi antisismici. Tali indicazioni sono inclusi nel paragrafo §11.9. In detta sezione, si riporta anche la definizione di "dispositivi antisismici", ovvero "elementi che contribuiscono a modificare la risposta sismica di una struttura, ad esempio incrementando il periodo fondamentale della struttura, modificando la forma dei modi di vibrare fondamentali, incrementando la dissipazione di energia, limitando la forza trasmessa alla struttura e/o introducendo vincoli perma-

menti o temporanei che migliorano la risposta sismica". Si comprende quindi che la sezione §11.9 si riferisce anche alle varie tipologie di controventi dissipativi illustrate in precedenza; pur tuttavia, speciale enfasi viene data solo ai dispositivi di isolamento sismico alla base. Tralasciando, per la presente trattazione, il caso dei dispositivi di isolamento (isolatori elastomerici e a scorrimento) e di vincolo temporaneo (del tipo a fusibile e di tipo provvisorio), le NTC 08 riportano indicazioni per i dispositivi dipendenti dallo spostamento e quelli dipendenti dalla velocità. I dispositivi dipendenti dallo spostamento sono a loro volta suddivisi in: dispositivi a comportamento lineare (o lineari) e dispositivi a comportamento non lineare (o non lineari). I dispositivi lineari hanno un legame forza-spostamento lineare fino ad una data soglia di spostamento, con comportamento ciclico stabile ed indipendente dalla velocità. I dispositivi non lineari hanno un legame forza-spostamento non lineare ed hanno una risposta isteretica indipendente dal numero di cicli e dalla velocità. I dispositivi dipendenti dalla velocità (dispositivi a comportamento viscoso) hanno una risposta meccanica in termini di forza dipendente solo dalla velocità ovvero dalla velocità e dallo spostamento contemporaneamente. Indicazioni specifiche relative ai dispositivi a comportamento lineare, non lineare e a comportamento viscoso, ed in particolare prove di accettazione sui materiali, prove di qualificazione ed accettazione sui dispositivi vengono fornite nelle Sezioni §11.9.4, §11.9.5 ed §11.9.6, rispettivamente.

Per i controventi metallici ad instabilità impedita, che rientrano nella classe dei dispositivi a comportamento non lineare, si fa riferimento a curve caratteristiche, esprimenti la forza trasmessa dal dispositivo al corrispondente spostamento, schematizzabili con delle relazioni bilineari definite mediante il passaggio per il punto corrispondente al limite teorico del comportamento elastico lineare del dispositivo e per il punto corrispondente alla condizione di progetto allo stato limite di collasso.

Volendo schematizzare il controvento con un comportamento lineare potrà farsi riferimento alla rigidezza equivalente ed allo smorzamento equivalente. Ne consegue che possono utilizzarsi tutte le indicazioni relative ai dispositivi a comportamento lineare. Va rilevato che in tal caso la rigidezza equivalente  $K_0$  ed il coefficiente viscoso equivalente  $\xi_e$  devono rispettare le limitazioni riportate nelle Equazioni 11.9.1 ed 11.9.2 della norma; in particolare, lo smorzamento viscoso  $\xi_e$  deve essere minore del 15%, mentre la rigidezza  $K_0$  non deve differire da quella iniziale  $K_{in}$ , valutata come rigidezza secante tra i valori corrispondenti al 10% e 20% della forza di progetto. Le condizioni di linearizzazione di cui sopra risultano essere più restrittive delle prescrizioni della modellazione lineare equivalen-

te richiesta al punto 7.10.5.2 delle NTC 2008, per i sistemi di isolamento sismico, ovvero che la rigidezza equivalente del sistema di isolamento sismico sia almeno pari al 50% della rigidezza secante per cicli con spostamento pari al 20% dello spostamento di riferimento e che lo smorzamento equivalente del sistema di isolamento sia inferiore al 30%.

Da quanto discusso emerge che nelle NTC 2008, non vi sono indicazioni specifiche per i sistemi con controventi dissipativi ad instabilità metallica; esse possono però essere derivate da quelle espresse per dispositivi con comportamento simile.

In altri paesi, lo scenario normativo risulta molto simile. Solo negli Stati Uniti, esistono indicazioni di analisi e progettazione per i cosiddetti sistemi con BRB (Buckling Restrained Braces) nelle AISC 341 (2010). In particolare il Capitolo F4 delle predette norme fornisce indicazioni in merito all'analisi e progettazione di sistemi intelaiati con BRB. Vengono altresì fornite specifiche indicazioni nell'Appendice J3 in merito al protocollo di carico per le prove di qualifica e requisiti di accettazione. Le storie di carico previste dall'AISC risultano molto più severe degli analoghi protocolli di carico presenti per dispositivi non lineari contemplati dalle NTC 2008, così come aggiornate dalle più recenti EN15129 (2009).

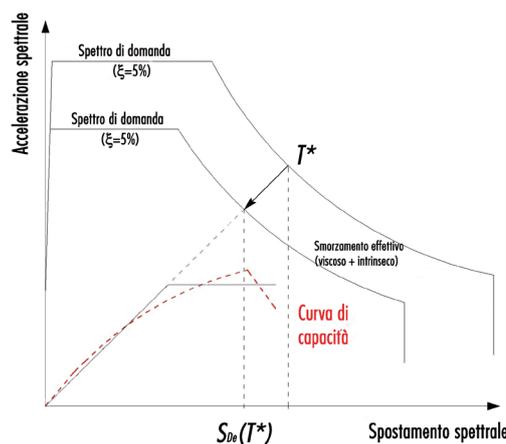
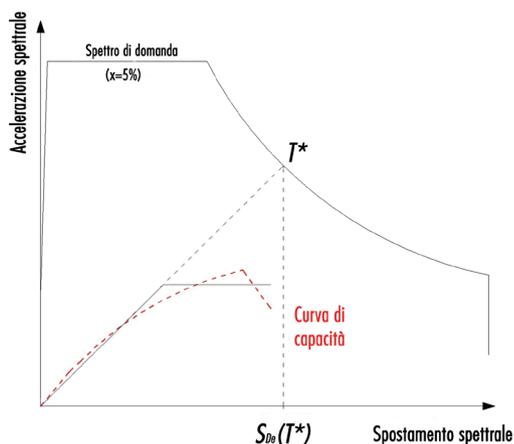
### 5. Metodi di analisi delle strutture esistenti adeguate con controventi ad instabilità impedita

La normativa sismica italiana attualmente fornisce solo alcune e limitate indicazioni per l'analisi delle prestazioni sismiche delle strutture esistenti con dispositivi dissipatori. Nelle NTC 08 e nella Circolare 617/09 vengono riportate informazioni utili per la modellazione, analisi e progettazione di sistemi di isolamento sismico, ma per i dissipatori le prescrizioni sono, infatti, quasi del tutto assenti. Per quanto riguarda i metodi di analisi, possono chiaramente utilizzarsi sia metodi elastici ovvero metodi inelastici, stati-

ci e dinamici. Nel caso dell'adozione dei metodi elastici si potrà far ricorso sia all'analisi statica equivalente che all'analisi modale con spettro di risposta. In entrambe le analisi i controventi dissipativi potranno essere simulati solo attraverso modelli elastici equivalenti, per i quali andranno caratterizzate la rigidezza e lo smorzamento viscoso equivalente, così come illustrato anche nel paragrafo precedente. Nel caso si ricorra all'analisi dinamica al passo ovvero all'analisi statica non lineare, occorrerà procedere alla modellazione dei dispositivi isteretici ad instabilità impedita utilizzando uno dei modelli meccanici discussi nella Sezione 4.1, ovvero con sistemi a fibre o plasticità concentrata. Per la caratterizzazione della domanda, nel caso dell'analisi dinamica non lineare si sceglieranno dei set di accelerogrammi spettro compatibili in numero di tre ovvero di sette, a seconda che si utilizzino i valori medi ovvero quelli estremi (minimi e massimi). Se si utilizza l'analisi statica non lineare, la domanda può essere espressa in termini di spettro di risposta. Questa circostanza è generalmente utilizzata per le strutture esistenti attraverso l'utilizzo del cosiddetto metodo N2 (Fajfar, 2000). Quest'ultimo approccio va opportunamente modificato per l'analisi delle prestazioni sismiche delle strutture con controventi metallici isteretici (vedi per esempio Ramirez et al, 2002-a e Ramirez et al, 2002-b). In realtà, anche per i sistemi che utilizzano controventi viscosi e visco-elastici occorre fare delle modifiche al metodo N2, così come implementato nelle NTC 08 affinché possa essere utilizzato per la determinazione del cosiddetto "performance point" della struttura esistente esaminata. La domanda sismica, espressa nel piano spettrale accelerazione-spostamento, viene determinata considerando un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente. Tale coefficiente tiene conto di tre termini:

- smorzamento strutturale intrinseco  $\xi_{int}$ : corrisponde al tipico smorzamento che un sistema strutturale possiede quando è in fase elastica; tipicamente viene assunto pari al 5%;

Figura 12  
Utilizzo dello smorzamento viscoso equivalente per calcolare la domanda sismica (sinistra).



- *smorzamento isteretico*  $\xi_{ist}$ : corrisponde allo smorzamento corrispondente alla fase plastica del sistema che è deputato a dissipare l'energia sismica; è posto pari a 0% nel caso di comportamento elastico;
- *smorzamento viscoso aggiunto*  $\xi_{vis}$ : corrisponde allo smorzamento relativo ai sistemi dissipazione viscosa installati nella struttura; viene posto pari a 0% nel caso di utilizzo di sistemi dissipativi isteretici ovvero con attrito.

Gli effetti dello smorzamento viscoso equivalente sulla riduzione della domanda sismica sono riportati in forma schematica in Figura 12, che illustra anche il confronto tra la curva di capacità della struttura sia in corrispondenza del periodo elastico iniziale che quello secante (vedi anche FEMA 750, 2009).

Si rileva esplicitamente che sia lo smorzamento isteretico che quello viscoso sono dipendenti dall'ampiezza degli spostamenti, pertanto il contributo allo smorzamento equivalente totale è funzione dell'entità dell'escursione in campo inelastico. Lo spostamento massimo di progetto del dispositivo è quello relativo allo stato limite di collasso, in armonia con le prescrizioni per gli isolatori sismici. Inoltre, nel caso delle strutture con dispositivi di dissipazione isteretica, a differenza delle strutture simicamente isolate, il sistema strutturale può anche snervare durante l'azione sismica. Pertanto l'effetto dei modi superiori nella risposta sismica complessiva è fondamentale.

E' auspicabile, comunque, per l'adeguamento sismico di strutture in c.a., evitare che queste ultime superino la soglia elastica.

La determinazione degli effetti globali dello smorzamento viscoso equivalente  $\xi$  nelle indicazioni fornite dai documenti FEMA (in particolare, FEMA 356, 2000; FEMA 440, 2005; FEMA 750, 2009) può essere effettuata attraverso la relazione:

$$\eta_{FEMA440} = \frac{4}{5.6 - \ln(100 \cdot \xi)} \quad (34)$$

I valori dello smorzamento ricavabili dall'Equazione 18 sono simili a quelli che si ottengono utilizzando l'espressione per il calcolo di  $\xi$ , così come riportata nelle NTC 2008 ed Eurocodice 8 (2006):

$$\eta_{NTC} = \sqrt{\frac{0.05 + \xi}{0.10}} \quad (35)$$

Si osserva esplicitamente che nelle NTC 2008, è fissato un valore massimo per il fattore di efficienza  $\eta$  pari a 0.55, che corrisponde ad uno smorzamento viscoso equivalente  $\xi_s=28\%$ . Si ritiene comunque che valori dello smorzamento equivalente superiori al 28% debbano essere trattati con grande cautela. La trasformazione che consente di passare dalle accelerazioni  $S_g(T)$  ai corrispondenti spostamenti  $S_{De}(T)$  spettrali, ovvero:

$$S_{De}(T) = S_g(T) \cdot \left( \frac{T}{2 \cdot \pi} \right)^2 \quad (36)$$

perde, infatti, di validità per valori di periodi e smorzamenti viscosi elevati.

Lo smorzamento viscoso equivalente complessivo è dato da:

$$\xi_{tot} = \xi_{inf} + \xi_{ist} + \xi_{vis} \sqrt{\mu} \quad (37)$$

in cui  $\mu$  rappresenta la duttilità del sistema nella direzione considerata (vedi anche Figura 12), mentre lo smorzamento  $\xi_{inf}$  della struttura di base (sistema non adeguamento nel caso di intervento di miglioramento/adeguamento sismico) è posto convenzionalmente pari al 5%.

Nel caso specifico, non avendo alcun contributo per la parte relativa ai dispositivi viscosi e/o visco-elastici, si ha che lo smorzamento equivalente complessivo è pari a:

$$\xi_{tot} = \xi_{inf} + \xi_{ist} \quad (38)$$

Il contributo dello smorzamento isteretico  $\xi_{ist}$  è esprimibile nella forma:

$$\xi_{ist} = q_H \left( 0.64 - \xi_{ist} \right) \cdot \left( 1 - \frac{1}{\mu} \right) \quad (39)$$

essendo  $q_H$  un fattore di modifica per tener conto della forma del ciclo isteretico del sistema che dissipa l'energia trasmessa dal sisma; tale fattore varia tra 0.5 ed 1.0.

Nel caso dell'utilizzo di controventi dissipativi ad instabilità impedita si propone di utilizzare per la determinazione dello smorzamento viscoso  $\xi_{ist}$  l'Equazione 40 che tiene della duttilità traslazione di progetto della struttura  $\mu$  e del rapporto di rigidezze laterali  $K_y / K_0$  del sistema strutturale (vedi per esempio Kim & Choi, 2004 e Choi & Kim, 2006), essendo  $K_0$  e  $K_y$  le rigidezze iniziale e post-snervamento, rispettivamente:

$$\xi_{ist} = \frac{2}{\pi} \eta \frac{\left( 1 - \frac{K_y}{K_0} \right) \cdot \left( 1 - \frac{1}{\mu} \right)}{\left( 1 - \frac{K_y}{K_0} + \mu \frac{K_y}{K_0} \right)} \quad (40)$$

nella quale il fattore di efficienza  $\eta$  può essere assunto pari a 0.2 nel caso degli edifici con struttura in c.a. e 0.6 per quelli in carpenteria metallica. I parametri di risposta strutturale  $\mu$  e  $K_y / K_0$  possono, infatti, essere calcolati e controllati utilizzando le curva di capacità della struttura ottenute con l'analisi statica non lineare, che sono attualmente implementate anche nei più diffusi codici di calcolo di tipo commerciale.

Una prima valutazione delle caratteristiche geometriche e meccaniche da utilizzare per i controventi ad instabilità impedita può ottenersi attraverso le seguenti relazioni (vedi per esempio

Klingner & Bertero, 1978; Panagiotakos & Fardis, 1996):

$$A_d = \frac{K_r \cdot K_s \cdot L_d}{E_d \cdot \cos^2 \vartheta} \quad (41)$$

in cui  $K_r$  esprime la rigidità relativa tra i controventi ( $K_d$ ) e la struttura ( $K_s$ ):

$$K_r = \frac{K_d}{K_s} \quad (42)$$

in cui la rigidità (assiale) del singolo controvento è data da:

$$K_d = \frac{A_d \cdot E_d}{L_d} \cos^2 \vartheta \quad (43)$$

mentre la forza di snervamento dello stesso è:

$$F_{yd} = \frac{K_r \cdot K_s \cdot L_d}{E_d \cdot \cos \vartheta} \sigma_{dy} \quad (44)$$

dove  $A_d$ ,  $L_d$  e  $\vartheta$  sono l'area, la lunghezza e l'inclinazione sull'orizzontale del controvento;  $E_d$  e  $\sigma_{dy}$  sono il modulo elastico e la tensione di snervamento del materiale utilizzato per il dispositivo dissipativo. Si tenga conto che in genere per i controventi ad instabilità impedita si utilizza acciai strutturali con basso limite di snervamento al fine di ottimizzare la capacità dissipativa del sistema di controventamento.

Le dimensioni e caratteristiche meccaniche dei dispositivi stabiliti utilizzando le Equazioni da 41 a 44 devono essere eventualmente modificate allorché la risposta strutturale globale non soddisfi i requisiti prestazionali richiesti.

### 6. Considerazioni relative alla presenza degli elementi non strutturali

L'utilizzo dei controventi dissipativi metallici, in particolare di quelli ad instabilità impedita richiede che il loro meccanismo di dissipazione, basato sul superamento della soglia di snervamento, si attivi effettivamente quando la struttura è sollecitata da terremoti di magnitudine medio-alta. L'analisi della risposta di sistemi intelaiati in c.a. adeguati/migliorati con l'uso dei controventi dissipativi non può pertanto prescindere dalla valutazione della rigidità e resistenza degli elementi di tamponatura che sono generalmente presenti nelle maglie dei telai in c.a. Ne consegue che è necessario che il progettista implementi un modello numerico della struttura in c.a. che includa anche l'effetto degli elementi di tamponatura. In tal modo si valutano le forze effettive che sono trasmesse ai controventi ed alla struttura intelaiata esistente; parimenti l'introduzione di elementi che simulino la presenza delle tamponature fornisce una più affidabile previsione della rigidità laterale del sistema e conseguentemente anche del periodo fondamentale di vibrazione della struttura.

A tal uopo, per la simulazione numerica della risposta sismica della tamponatura si utilizzano generalmente modelli fenomenologici, detti an-

che macro-modelli o modelli globali. Occorre tuttavia evidenziare la necessità di utilizzare studi sulla calibrazione e sulla convalida dei modelli globali. L'approccio fenomenologico risulta essere economico e flessibile, ma non sempre si può attribuire ai parametri numerici utilizzati un significato fisico chiaro ed univoco, quindi l'identificazione dei parametri nelle diverse situazioni diventa il lavoro maggiormente impegnativo.

Due ulteriori fattori complicano la calibrazione dei macromodelli quando si trattano le tamponature: la dispersione naturale delle caratteristiche meccaniche di materiali tradizionalmente non strutturali, quindi poco controllati, e la scarsa affidabilità dei metodi disponibili per la previsione delle caratteristiche stesse. Questi aspetti si riferiscono sia alla caratterizzazione del materiale (in specie per la resistenza a compressione), quanto al livello delle proprietà statiche degli elementi, la rigidità e la resistenza del meccanismo di rottura. Ulteriori difficoltà sorgono per la caratterizzazione del comportamento sismico, quando le proprietà meccaniche vanno definite con riferimento al comportamento ciclico degradante. Esistono numerosi modelli numerici in letteratura che sono stati formulati per la simulazione della risposta statica e sismica dei tompagni (Klingner & Bertero, 1978; Panagiotakos & Fardis, 1996; Dolsek & Fajfar, 2005). Si riportano di seguito il modello trilineare di Panagiotakos e Fardis (1996) che risulta molto affidabile e versatile per le applicazioni che utilizzano le analisi non lineari (statiche e dinamiche). Si tratta di un modello che può essere utilizzato sia per le analisi statiche non lineari con sistemi a plasticità concentrata che diffusa. Si utilizza un modello costituito da bielle equivalenti per le quali si concentra la non linearità della risposta in un'unica sezione. Si inseriscono cerniere plastiche assiali, per le quali viene definita la curva tensione-deformazione plastica. La lunghezza della cerniera è stata posta uguale a quella della biella.

Il singolo tampagno è modellato mediante una sola biella utilizzando il legame costitutivo proposto da Panagiotakos e Fardis (1996), per il quale la curva forza ( $V$ ) – spostamento ( $\Delta$ ) è rappresentata da una quadrilatera (Figura 13). Il primo ramo corrisponde al comportamento elastico-lineare fino alla prima rottura ed il punto A è dato dalle coordinate ( $\Delta_{cr}$ ,  $V_{cr}$ ). La rigidità elastica iniziale è pari a:

$$K_1 = K_{el} = \frac{G_w \cdot A_w}{h_w} \quad (45)$$

dove  $A_w$  è l'area della sezione del pannello di tamponamento,  $G_w$  è il modulo di taglio elastico del materiale ed  $h_w$  è l'altezza libera del tompagno.

La resistenza a taglio di cracking è data da:

$$V_{cr} = \tau_{cr} \cdot A_w \quad (46)$$

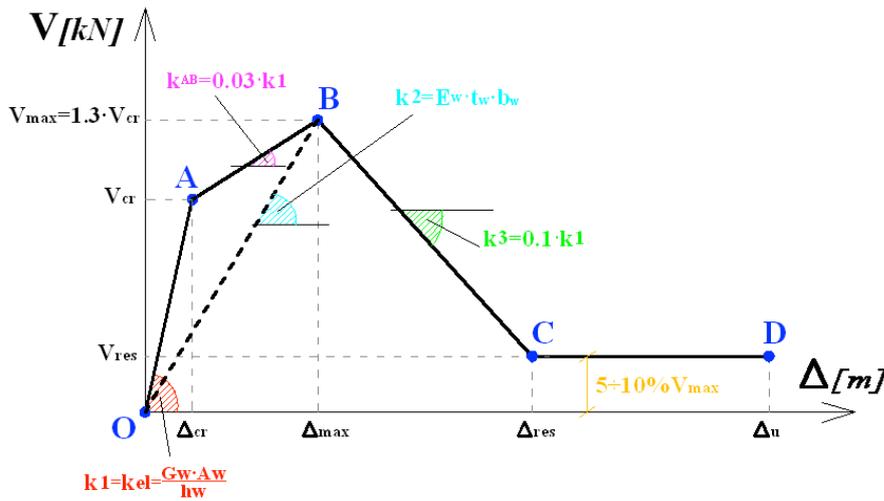


Figura 13  
Legame forza-spostamento  
di Panagiotakos e Fardis  
(1996).

dove  $\tau_{cr}$  è la resistenza a taglio di cracking.  
Lo spostamento relativo a  $V_{cr}$  è pari a:

$$\Delta_{cr} = \frac{V_{cr}}{K_1} \quad (47)$$

Il secondo ramo segue il primo fino alla forza massima pari a:

$$V_{max} = 1.3 \cdot V_{cr} \quad (48)$$

e lo spostamento corrispondente viene valutato assumendo che la rigidezza fino a questo punto (B) è data dalla relazione proposta da Mainstone (1971), cioè assumendo la larghezza del punto-ne equivalente data da:

$$b_w = 0.175 \cdot (\lambda \cdot h_w)^{0.4} \cdot \sqrt{h_w^2 + l_w^2} \quad (49)$$

dove il coefficiente  $\lambda$  è pari a:

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{E_w \cdot t_w \cdot \sin(2 \cdot \theta)}{4 \cdot E_c \cdot I_p \cdot h_w}} \quad (50)$$

e quindi la rigidezza si calcola:

$$k_2 = E_w \cdot \frac{t_w \cdot b_w}{L_{p,w}} \quad (51)$$

dove  $t_w$  è lo spessore della tamponatura ed  $E_w$  è il modulo di elasticità normale;  
mentre lo spostamento relativo a  $\Delta_{max}$  è:

$$\Delta_{max} = \frac{V_{max}}{k_2} \quad (52)$$

dove  $t_w$  è lo spessore della tamponatura ed  $E_w$  è il modulo di elasticità normale.

Gli autori definiscono un valore della rigidezza post-cracking ( $k_{AB}$ ) tangente pari a:

$$K_{AB} = 0.03 \cdot K_1 \quad (53)$$

Il terzo ramo è quello post-picco degradante fino alla resistenza residua e la rigidezza dipende da quella elastica attraverso un parametro  $\alpha$  che può variare da 0.005 e 0.1:

$$k_3 = \alpha \cdot k_1 = 0.1 \cdot k_1 \quad (54)$$

Il quarto ramo è il ramo orizzontale corrispondente alla resistenza residua è tale forza è:

$$V_{res} = \beta \cdot V_{cr} \quad (55)$$

dove  $\beta$  è compreso tra 0.05 e 0.1 e nel caso in esame è stato scelto pari a 0.1.

Lo spostamento relativo è calcolabili come:

$$\Delta_{res} = \frac{(V_{max} - V_{res})}{k_3} + \Delta_{res} \quad (56)$$

## 7. Conclusioni e sviluppi futuri normativi

La discussione relativa alla modellazione dei sistemi dissipativi, in particolare anche di quelli di tipo viscoso e visco-elastico, nonché l'illustrazione della metodologia di analisi delle strutture esistenti adeguate con controventi ad instabilità impedita, evidenziano la necessità di formulare ed implementare nei documenti normativi una serie di affidabili requisiti e criteri per l'accettazione dei sistemi di dissipazione aggiunti. In Europa ed anche in Italia, l'attuale quadro normativo delle NTC 2008 e relativa Circolare 617/09, appare molto carente per quanto attiene alla complessa problematica dei controventi dissipativi, siano essi isteretici, viscosi ovvero sistemi con fluidi magneto-reologici o a comportamento piezoelettrico. Le attuali indicazioni si riferiscono principalmente a sistemi di isolamento sismico e vengono poi estrapolate per potersi applicare ai controventi dissipativi. Si ritiene necessario ed urgente dover procedere alla redazione di regole specifiche per i sistemi di controventamento di tipo dissipativo. A tal uopo risulta utile per le pratiche applicazioni:

- Definire dei criteri di qualificazione ed accettazione sui dispositivi utilizzati come controventi dissipativi, formulando ad-hoc protocolli di carico per l'uso di detti sistemi in costruzioni nuove ed esistenti;

- Fornire indicazioni specifiche per la modellazione e l'analisi strutturale, in particolare specificando un percorso chiaro per l'analisi statica non lineare delle costruzioni esistenti;
- Fornire indicazioni specifiche in merito alle verifiche strutturali sia agli stati limite di esercizio che agli stati limite ultimi;
- Fornire indicazioni progettuali riguardanti sia i dispositivi che le altre parti componenti dei sistemi strutturali (nuovi o esistenti) in cui sono inseriti;
- Fornire indicazioni specifiche in merito ad aspetti costruttivi, manutenzione e sostituibilità;

- Fornire indicazioni per accorgimenti specifici in fase di collaudo.

Per soddisfare le precedenti esigenze potrà essere preso a riferimento lo stato dell'arte nazionale ed internazionale, con particolare riguardo a normative di comprovata validità già in uso in altri paesi e soprattutto utilizzare anche i numerosi risultati ottenuti negli ultimi anni nell'ambito della ricerca teorico-sperimentale effettuata dal Consorzio della Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica, ReLUIs, finanziata dalla Protezione Civile Nazionale.

## Bibliografia

- American Institute of Steel Construction - AISC (2010), *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. Document n.-341-10, Chicago, Illinois, USA.
- Bruneau M., Uang C.M., Whittaker A. (1998), *Ductile Design of Steel Structures*, McGraw Hill, New York.
- Choi H. & Kim J. (2006), Energy-based seismic design of buckling-restrained braced frames using hysteretic energy spectrum, *Engineering Structures*, 28(2), 304-311.
- Christopoulos C. & Filiatrault A. (2006), *Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation*, IUSS Press, Pavia, Italy.
- Dolce M., Cardone D., Marnetto R. (2000), Implementation and testing of passive control devices based on shape memory alloys, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 29 (7), 945-968.
- Dolsek M., Fajfar P. (2005), Simplified non-linear analysis of infilled reinforced concrete frames, *Earthquake engineering and structural dynamics*, 34, 49-66.
- Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI (2009). UNI EN 15129:2009, *Dispositivi Antisismici*. ICS: [91.120.25], Italy.
- Eur. Comm. for Standardisation (2006), *Eurocode 8, Design provisions for earthquake resistance of structures. Part 1.3: General rules. Specific rules for various materials and elements.*, Brussels, Belgium.
- Fajfar P. (2000), A Nonlinear Analysis Method for Performance-Based Seismic Design. *Earthquake Spectra*, 16(3), 573-591.
- Federal Emergency Management Agency - FEMA (2009), *NERHP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures*, Document no. FEMA P-750, Washington, D.C.
- Federal Emergency Management Agency - FEMA (2005), *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*, Document no. FEMA 440, Washington, D.C.
- Federal Emergency Management Agency - FEMA (2000), *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Document no. FEMA 356, Washington, D.C.
- Hanson R. D. & Soong T.T. (2001), *Seismic Design with Supplemental Energy Dissipation Devices*. MNO-8. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California.
- Kim J. & Choi H. (2004), Behavior and design of structures with buckling-restrained braces, *Engineering Structures*, 26(6), 693-706.
- Klingner R.E., Bertero V.V. (1978), Earthquake resistance of infilled frames, *Journal of structural division*, 104( ST6), 973-989.
- Ministero delle Infrastrutture (2009), *Circolare n.617/09, Istruzioni per l'applicazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni*, Roma.
- Ministero delle Infrastrutture (2008), *D.M. 14 gennaio 2008, Norme tecniche per le costruzioni*, Roma.
- Panagiotakos T.B., Fardis M.N. (1996), Seismic response of infilled RC frames structures. Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, 23-28 June, Mexico, Paper n. 225.
- Progettazione Sismica n.3-2009, IUSS Press, Pavia, ISSN 1973-7432.
- Ramirez O.M., Constantinou M.C., Gomez J.D., Whittaker A.S., Chrysostomou C.Z. (2002-a), Evaluation of Simplified Methods of Analysis of Yielding Structures With Damping Systems. *Earthquake Spectra*, 18(3), 501-530.
- Ramirez O.M., Constantinou M.C., Whittaker A.S., Kircher C.A., Chrysostomou C.Z. (2002-b), Elastic and Inelastic Seismic Response of Buildings With Damping Systems, *Earthquake Spectra*, 18(3), 531-547.