

LINEE GUIDA PER LA PROGETTAZIONE DI EDIFICI CON CONTROVENTI DISSIPATIVI

Luigino Dezi, Roberto Giacchetti, Graziano Leoni

Sistemi per la dissipazione di energia

Il quadro normativo attualmente più avanzato in Italia, contenuto nell'Ordinanza 3274/03, non offre criteri di dimensionamento, analisi e verifica dei sistemi per la dissipazione di energia di tipo esogeno seppure tali tecniche siano comprese nel numero di quelle che possono essere applicate nel caso di adeguamento sismico di edifici esistenti in c.a. (punto 11.3.1.2), acciaio (punto 11.4.1.2) e muratura (punto 11.5.6.2).

Questo significa che il progetto di questi sistemi e la verifica degli edifici dotati di dissipatori devono essere preventivamente autorizzati con voto del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Uno degli inconvenienti della progettazione tradizionale basata su meccanismi dissipativi *endogeni* (formazione di cerniere plastiche all'interno della struttura resistente) consiste nel danneggiamento degli elementi strutturali che si traduce in costosissime operazioni di riabilitazione.

I sistemi per la dissipazione di energia di tipo *esogeno* sfruttano lo spostamento di interpiano, conseguente al moto delle masse, per attivare, all'interno di particolari dispositivi, meccanismi di tipo isteretico, con il risultato di dissipare una grande quantità di energia sotto forma di calore in zone esterne agli elementi della struttura principale.

Lo spostamento d'interpiano può essere trasferito ai dispositivi in diversi modi, ma più frequentemente utilizzando sistemi di controvento, solitamente concentrici, ma anche, talvolta, conformati a croce di Sant'Andrea. Nel caso del controvento concentrico, ad esempio, il dispositivo viene montato tra il vertice del controvento, i cui bracci inclinati sono ancorati inferiormente alla struttura principale, e la trave del piano sovrastante, come è schematicamente illustrato nella Figura 1-a.

Caratteristiche dei controventi

Il controvento ed il (-i) dispositivo(-i) costituiscono un sistema in serie che, a sua volta è in parallelo con la struttura principale secondo lo schema presentato nella Figura 1-b. Si può osservare che, nella maggior parte dei casi, il controvento dissipativo fornisce anche una rigidezza supplementare alla struttura e, quindi, appaiono particolarmente indicati per correggere un'eventuale eccessiva deformabilità laterale del sistema.

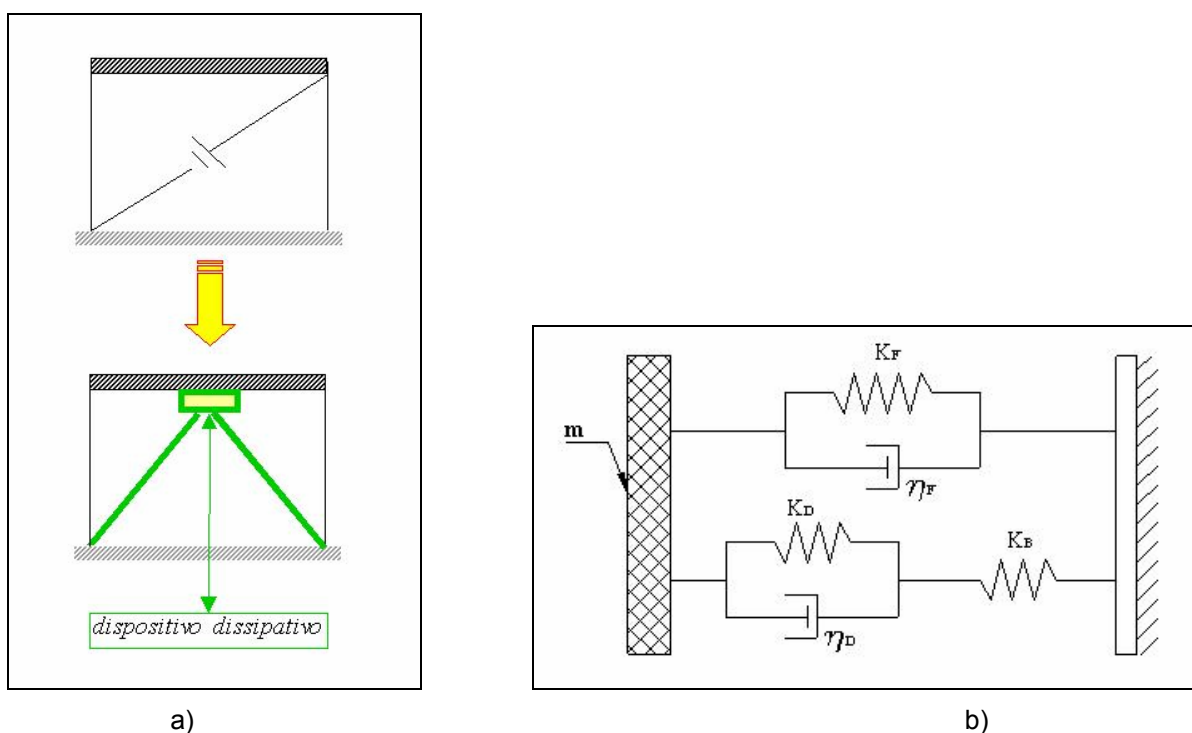


Figura n. 1 – SDOF dotato di controvento dissipativo di tipo passivo

- a) Schema di disposizione
- b) Schema meccanico

Gli svantaggi maggiori di questo tipo d'intervento sono dovuti al fatto che, durante il sisma, si ha una forte concentrazione di forza, sia sui nodi sia in fondazione, che deve essere ben valutata al momento della verifica; inoltre, dopo l'evento, almeno per i

controventi che montano i tipi di dispositivo non rientrante, potrebbe rendersi necessario un intervento sulla struttura a causa del permanere degli spostamenti residui.

Affinché i dispositivi di cui è dotato il controvento dissipativo esibiscano un comportamento isteretico ottimale, la dissipazione di energia deve avvenire solo all'interno di tali elementi, secondo un comportamento isteretico del materiale. Questo richiede che siano soddisfatte due condizioni:

1. i bracci di controvento devono essere progettati per rimanere sempre in campo elastico;
2. i bracci di controvento devono avere una snellezza tale che sia impedita l'instabilità per carico di punta.

La plasticizzazione e l'instabilità nei bracci di controvento conducono entrambe ad una perdita d'efficienza come è mostrato nelle Figure n. 2-a e 2-b.

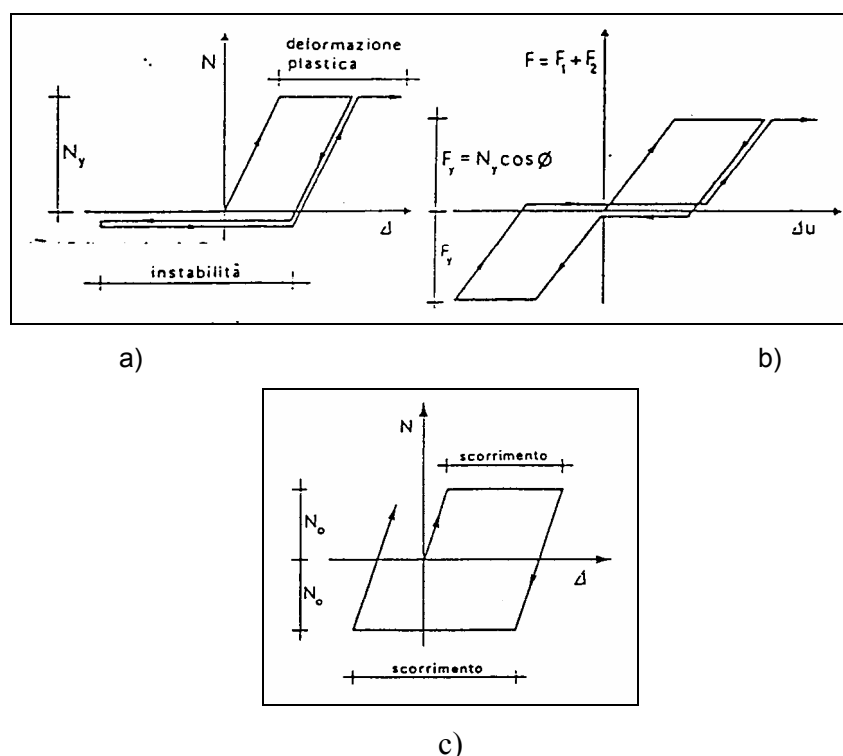


Figura n. 2 – Risposta di un controvento con aste instabili in compressione, in regime elasto-plastico

- a) risposta di una diagonale compressa instabilizzata
- b) risposta complessiva delle due diagonali

c) diagonale progettata in trazione e compressione ($N_0 < N_{cr}$)

Per questo motivo, anziché adottare una conformazione a Croce di Sant'Andrea (Figura 3), si preferisce adottare controventi a V rovescia (tipo Chevron) siano essi in configurazione eccentrica (Figura 4-a) sia concentrica (Figure 4-b e 4-c); in questo modo si ha un migliore controllo dello sbandamento laterale in quanto si riduce la lunghezza delle aste.

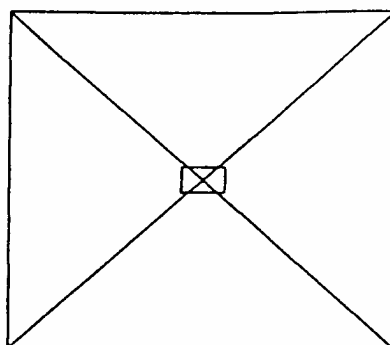


Figura n. 3 – Controvento a Croce di Sant'Andrea con dispositivo posto all'incrocio delle diagonali

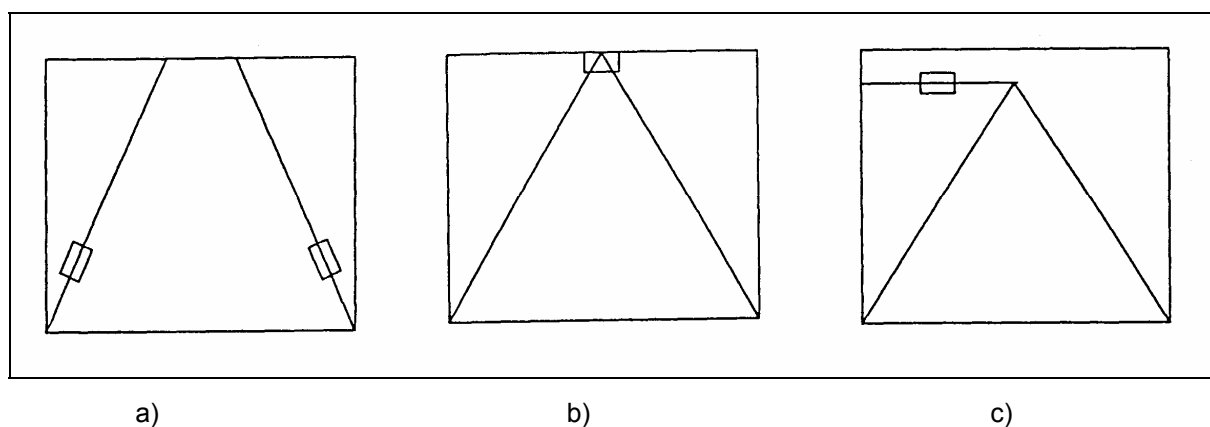


Figura 4 – Controventi a V rovescia con varie posizioni dei dispositivi

Caratteristiche degli apparecchi per la dissipazione d'energia

I dispositivi possono dissipare energia in maniera differente a seconda del comportamento isteretico del materiale che viene impiegato per la loro realizzazione, ma sostanzialmente sono riconducibili a quattro tipi: attritivi, elasto-plastici, visco-elastici e viscosi.

I dispositivi ad attrito (di tipo coulombiano) sono realizzati con materiale di frizione, non molto diverso da quello che viene impiegato per la costruzione dei freni degli autoveicoli, posto a contatto con una superficie di scorrimento d'acciaio.

Il comportamento del dispositivo è rigido fino al raggiungimento della forza di slittamento la quale è, poi, mantenuta costante fino allo spostamento richiesto. Il rendimento termodinamico di questo tipo di dispositivo è ottimale, in quanto, come si può osservare dalla Figura 5 la forma è pressoché rettangolare.

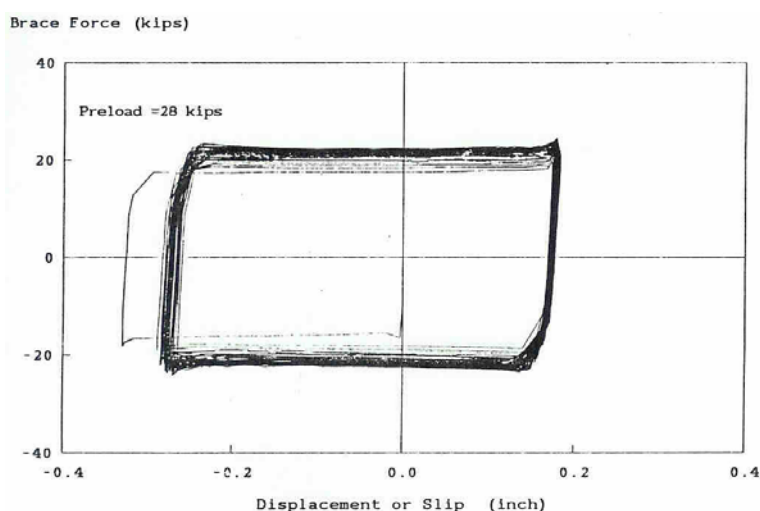


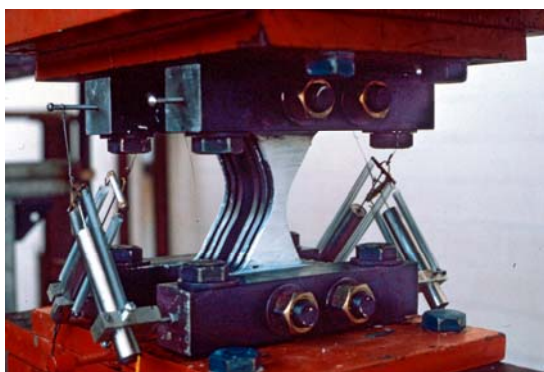
Figura n. 5 – Ciclo di isteresi di un dispositivo ad attrito

Esperienze condotte su prototipi di edifici multipiano in scala ridotta utilizzando la tavola vibrante hanno mostrato che l'energia dissipata per attrito può raggiungere circa l'80% dell'energia d'ingresso. L'utilizzo di questi dispositivi è però complicato dal fatto che lo sviluppo del ciclo isteretico dipende dal precarico che viene applicato al materiale attritivo affinché aderisca alla superficie di scorrimento. Dubbi sono stati sollevati circa la

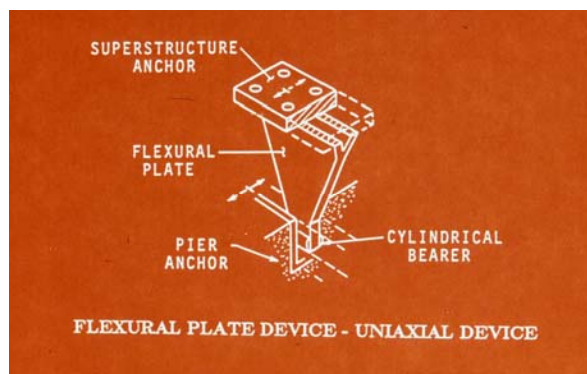
costanza nel tempo di tale precarico e sulla possibilità che alterazioni della superficie di scorrimento possano inficiare il comportamento dell'apparecchio.

Sicuramente più affidabili, da questo punto di vista, sono i dispositivi a comportamento elasto-plastico, in quanto realizzati con materiali che esibiscono cicli isteretici sono molto stabili (ripetibili e non degradanti).

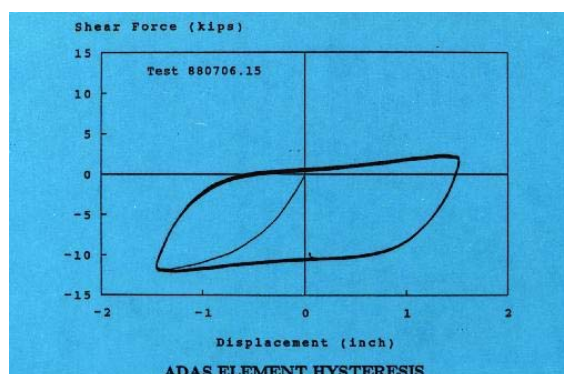
Tra questi occupano un posto rilevante quegli apparecchi che sono indicati come ADAS (**A**dded **D**amping **A**nd **S**tiffness) e che, nel loro aspetto originale, si presentano come un pacchetto di lamine metalliche con la forma di "farfalla" com'è mostrato nelle Figura 6-a e 6-b. La particolare forma consente di avere la plasticizzazione dell'intero volume del materiale che costituisce la lamina per effetto dello spostamento relativo tra le basi. Ne consegue il ciclo d'isteresi mostrato nella Figura 6-c.



a)



b)



c)

Figura n. 6 – Forme e ciclo d'isteresi degli ADAS

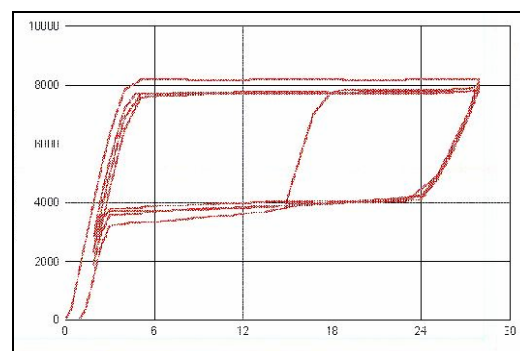
I dispositivi costruiti per plasticizzarsi sotto carichi assiali devono potere conservare la loro capacità dissipativa anche in regime di compressione senza instabilizzarsi. Questa esigenza è ottemperata da particolari dispositivi elasto-plastici ad instabilità impedita (BRD - Buckling Restrained Devices) nei quali l'elemento duttile viene vincolato lateralmente in modo che possa subire deformazioni assiali molto rilevanti (dell'ordine di qualche percento) senza "imbarcarsi". A questi dispositivi, che sono stati scelti come sistema dissipativo nell'adeguamento sismico della sede del CAPI (Centro Assistenza Protezione Civile) della Regione Marche, è stato dedicato l'ultimo paragrafo.

Agli elasto-plastici appartiene anche una categoria di dispositivi realizzati con leghe metalliche a memoria di forma (SMAD) nei quali viene sfruttata la capacità del materiale di esibire un ciclo d'isteresi per effetto della variazione di fase da austenitica a martensitica e viceversa che si ha per la variazione dello stato di deformazione a partire da un certo livello iniziale di deformazione ottimale.

Nella Figura 7-a è presentato uno SMAD realizzato con gruppi di fili di lega a base di Nickel-Titanio il cui ciclo di isteresi è rappresentato nella Figura 7-b.



a)



b)

Figura n. 7 – Forma e ciclo d'isteresi degli SMAD a fili

La Figura 8 mostra la modalità d'implementazione di una coppia di SMAD in un prototipo da laboratorio.

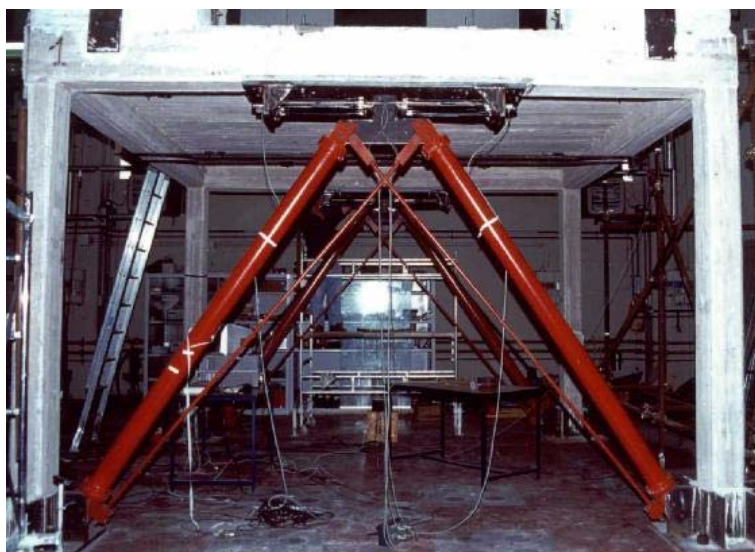


Figura n. 8 – Implementazione degli SMAD in un prototipo da laboratorio in c.a.

La capacità di questo tipo di dispositivi di fornire smorzamento supplementare alla struttura è dimostrata dai risultati delle prove di snap-back (spostamento impresso seguito ad un brusco rilascio) che sono state condotte sul prototipo. Il confronto tra il comportamento in vibrazione libera del prototipo senza dispositivi (nudo) e quello equipaggiato con i controventi dissipativi è illustrato nella Figura 9 nella quale si può osservare che questo particolare tipo di dispositivi ha scarsa capacità ricentrante in quanto non consente il ritorno della struttura nella sua posizione iniziale, ma, al contrario, le impongono uno spostamento residuo.

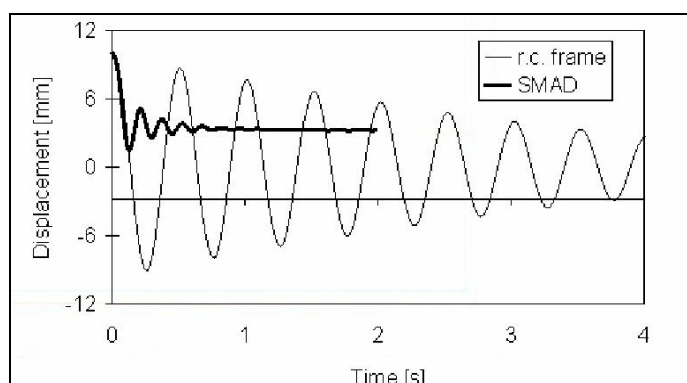


Figura n. 9 – Capacità smorzante dei dispositivi a memoria di forma

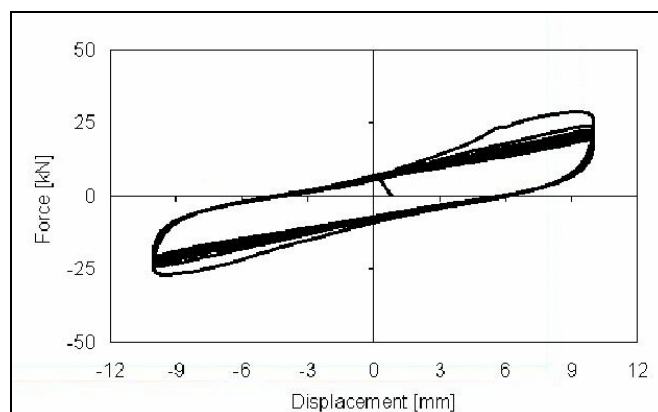
L'uso di gomma ad alto smorzamento, simile a quella utilizzata per la costruzione degli isolatori sismici è stata in anni recenti oggetto di estese sperimentazioni in laboratorio e di analisi numeriche ed ha visto un'interessante applicazione nell'ambito di un intervento di miglioramento sismico in un edificio danneggiato dal sisma del 1997 a Fabriano (AN).

Questi dispositivi si collocano alla frontiera tra quelli a comportamento elasto-plastico incrudente e quelli a comportamento viscoelastico, avendo dei primi la tendenza ad esibire un comportamento ciclico dipendente dallo spostamento ed indipendente dalla velocità di deformazione e dalla temperatura, conservando dei secondi l'attitudine ad essere caratterizzati dinamicamente dal modulo elastico secante.

I dispositivi sono realizzati mediante strati d'elastomero armato incollato su piastre di ancoraggio che possono scorrere relativamente per effetto dello spostamento di interpiano. La curva τ - γ , che descrive il legame funzionale tra la tensione tangenziale e lo scorrimento, manifesta cicli d'isteresi ripetibili e stabili quando il materiale sia stato sottoposto ad un "allenamento" iniziale. La Figura 10-a mostra un dispositivo del quale è riportato, nella Figura 10-b, il tipico legame costitutivo determinato per uno scorrimento pari al 100% dello spessore degli strati d'elastomero.



a)



b)

Figura n. 10 – Dispositivi in gomma ad alto smorzamento

La quantità di smorzamento viscoso equivalente che questo tipo di dissipatori sono in grado di fornire alla struttura nuda dipende dal rapporto tra la rigidità laterale di questa e

la rigidità a taglio dei dispositivi. Prove sperimentali hanno rivelato che per aumentare il fattore di smorzamento dal 2-2,5% al 10-12% i dispositivi nel loro complesso devono possedere una rigidità paragonabile a quella della struttura non controventata.

Le Figure 11-a e 11-b mostrano la modalità di implementazione dei dispositivi in gomma in un prototipo in c.a. utilizzato in laboratorio per testare il comportamento del sistema soggetto a prove cicliche quasi statiche e dinamiche.

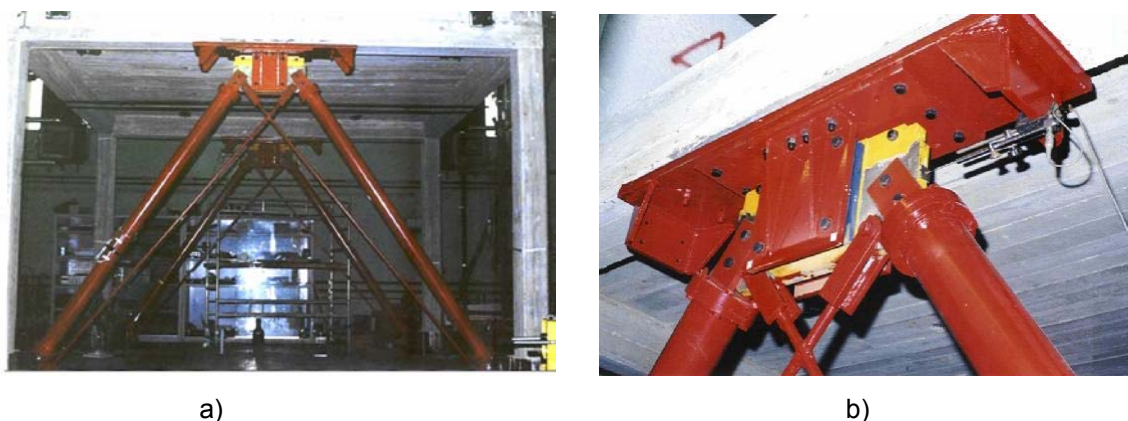


Figura n. 11 – Implementazione dei dispositivi in un prototipo di laboratorio

Una misura della capacità smorzante dei dissipatori di gomma è fornita dal confronto tra la risposta in vibrazione libera del prototipo con e senza i dispositivi che è presentato nella Figura n. 12.

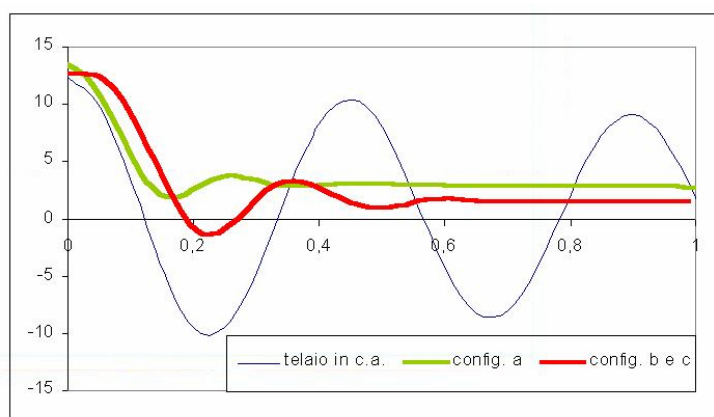
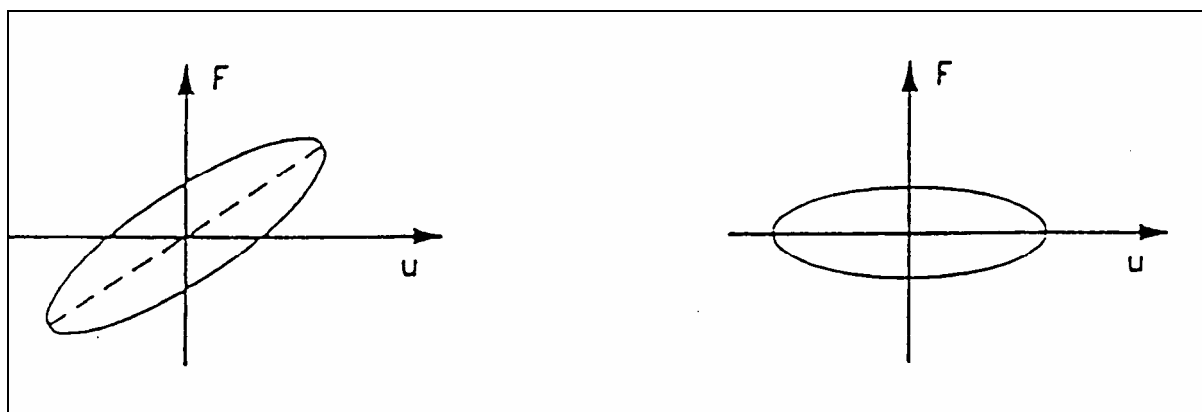


Figura n. 12 – Confronto delle risposte in vibrazione libera

L'utilizzo di materiali viscoelastici o viscosi in campo sismico ha origini molto recenti, mentre in altri settori essi sono utilizzati già da decenni; per esempio, sempre nell'ambito dell'ingegneria civile, per l'attenuazione degli effetti dinamici dovuti al vento, o, nelle apparecchiature meccaniche, per attenuare vibrazioni e/o problemi di fatica. In genere, nelle applicazioni strutturali dell'Ingegneria Civile si utilizzano polimeri e sostanze vetrose che dissipano energia quando soggette a deformazione tagliante (Figura 13).

Solitamente un dissipatore viscoelastico è costituito da uno strato di materiale incollato a due piatti d'acciaio montati nelle specchiature del telaio o su un braccio diagonale o al vertice di un controvento a V rovescio.

Il dispositivo viscoso, invece, ha l'aspetto di un attuatore all'interno del quale è presente uno stantuffo munito di orifizi, immerso in un fluido, tipicamente siliconico. Per alcune applicazioni particolari, ad esempio nel settore dei ponti, questi tipi di dispositivi assumono le funzioni di "shock transmitters" in quanto esibiscono un comportamento non reattivo quando lo spostamento relativo tra le due estremità dell'apparecchio ha una velocità di variazione molto lenta (ad esempio per effetto di variazioni termiche), mentre, al contrario, presentano una notevolissima rigidità assiale per spostamenti relativi rapidi, come avviene, ad esempio, per effetto della frenatura o in situazione sismica.



a)

b)

Figura n. 13– Cicli dissipativi dei dispositivi viscoelastici (a) e viscosi (b)

Un vantaggio di questi dispositivi è che essi sono sempre attivi in quanto per entrare in azione non hanno bisogno di superare delle soglie di forza ed inoltre sono ricentranti cioè in grado di riassorbire le deformazioni residue.

Tra gli svantaggi occorre ricordare la dipendenza delle prestazioni dalla temperatura d'esercizio, dalla frequenza della forzante e dalla velocità.

Effetti della dissipazione d'energia

L'area racchiusa dai cicli d'isteresi costituisce un elemento fondamentale per la valutazione dell'efficienza del dispositivo, poiché, di fatto, rappresenta il valore dell'energia dissipata.

Va però notato che essi si riferiscono al comportamento del dissipatore isolato, mentre quello che è veramente indicativo è il comportamento globale della struttura su cui esso è implementato. In generale, qualsiasi sia il sistema utilizzato, esso si avvale del medesimo criterio: diverse parti di una struttura, che si muovono fra di loro con spostamenti (anche di modesta entità), sono collegate attraverso questi dispositivi in grado di consumare larga parte dell'energia, introdotta dalle forze d'inerzia. Si riducono, così, gli spostamenti relativi e di conseguenza gli sforzi sugli elementi strutturali. L'efficienza del sistema dissipativo è, dunque, legata alla possibilità che i dispositivi sfruttino al massimo gli spostamenti relativi, che, nel caso degli edifici multipiano, sono rappresentati dagli spostamenti d'interpiano (*"interstory drifts"*).

Diversamente dal caso delle strutture isolate sismicamente, l'energia iniziale introdotta dal sisma sul sistema strutturale, rimane praticamente invariata, anzi, semmai, per effetto dell'aumento di rigidità iniziale della struttura dopo l'applicazione dei controventi, si potrebbe perfino avere un aumento; tuttavia, l'energia d'ingresso viene dissipata sotto forma di calore in apparecchi costruiti ad hoc, facilmente controllabili ed, eventualmente, facilmente sostituibili, minimizzando i danni sia nella struttura sia nelle componenti non strutturali.

La Figura 14 mostra il diagramma che descrive il bilancio energetico istantaneo, ottenuto in una simulazione sismica, eseguita presso l'EERC (Earthquake Engineering

Research Center) dell'Università della California a Richmond, con l'impiego della tavola vibrante, su una struttura intelaiata spaziale di sei piani in scala ridotta munita di controventi dissipativi con dispositivi attritivi (Figure 15-a e 15-b). Questa sperimentazione ha consentito di valutare che l'energia dissipata dai dispositivi può arrivare anche oltre l'80% dell'energia d'ingresso. Nella Figura 14 la parte tratteggiata rappresenta l'energia che "entra" nella struttura (ed è responsabile della sua deformazione e del suo moto) mentre la parte del diagramma al di sotto di quella tratteggiata rappresenta la quantità di energia dissipata.

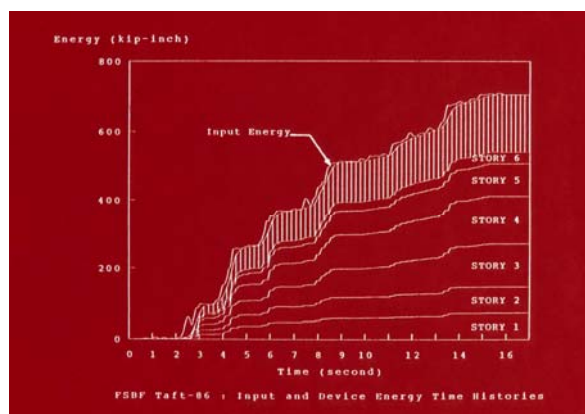
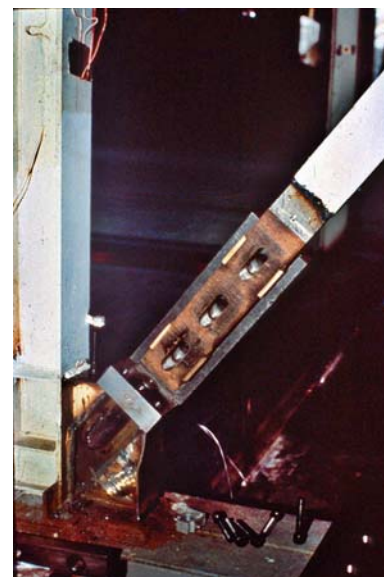


Figura n. 14 – Bilancio energetico istantaneo



a)



b)

Figura n. 15 – Dispositivi lineari di tipo attritivo

Applicazione di dispositivi elasto-plastici ad instabilità impedita

Il quadro normativo attualmente più avanzato in Italia, contenuto nell'OPCM 3431/05 (evoluzione della precedente OPCM 3274/03), permette l'applicazione di sistemi per la dissipazione d'energia sia per la protezione sismica delle costruzioni nuove sia per l'adeguamento delle costruzioni esistenti.

L'obiettivo che ci si propone di raggiungere con queste tecnologie innovative è quello di trasformare il meccanismo dissipativo endogeno, conseguente alla formazione di cerniere plastiche nelle membrature principali, in un meccanismo dissipativo esogeno attraverso il trasferimento della capacità dissipativa ad elementi progettati ad hoc.

Tuttavia, la norma non offre ancora criteri di dimensionamento, analisi e verifica dei sistemi per la dissipazione di energia di tipo esogeno, seppure tali tecniche siano per l'appunto enumerate tra quelle che possono essere applicate per l'adeguamento sismico di edifici esistenti in c.a. (punto 11.2.7.2), acciaio (punto 11.2.7.2) e muratura (punto 11.5.6.2).

L'applicazione di dispositivi elasto-plastici si rivela estremamente vantaggiosa in termini di capacità di dissipare energia, in quanto, se l'instabilità viene impedita, il materiale può essere pienamente sfruttato anche in compressione ben oltre il limite di snervamento come si evince dal grafico riportato in Figura 16.

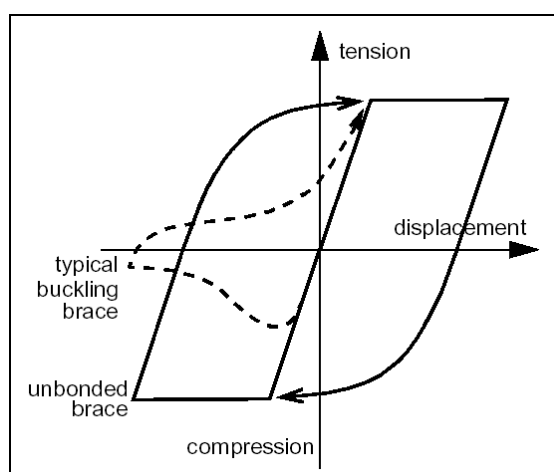


Figura n. 16 – Ciclo d'isteresi di un dispositivo elasto-plastico ad instabilità impedita

L'obiettivo di impedire l'instabilità per carico di punta può essere perseguito in vari modi, ma, in sostanza, il concetto è che il materiale che deve plasticizzarsi, costituito generalmente da una lega metallica non necessariamente ferrosa, deve essere "confinato" all'interno di un involucro che ne impedisce lo sbandamento laterale, com'è illustrato nella Figura 17.

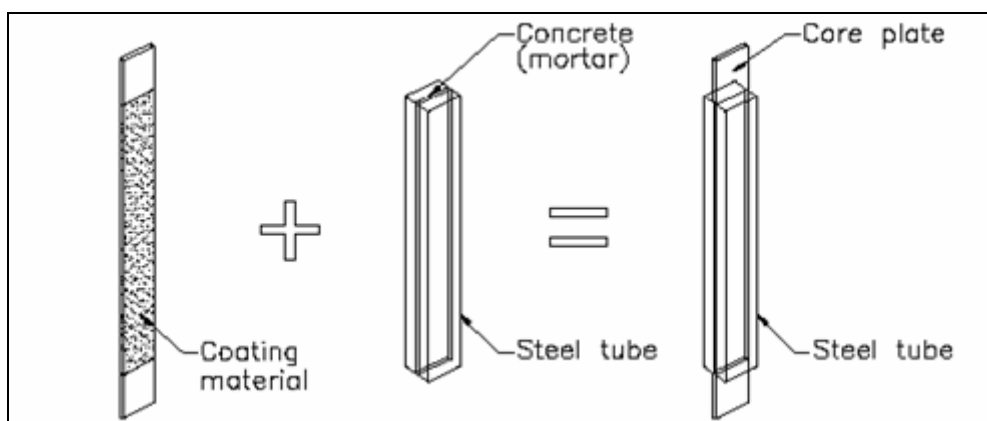


Figura n. 17 – Schema costruttivo di un dispositivo elasto-plastico ad instabilità impedita

Il dispositivo viene collocato solitamente in una delle parti terminali dei bracci del controvento, preferibilmente in quella inferiore, in modo tale che il dispositivo sia ispezionabile e facilmente sostituibile (Figura 18).



Figura n. 18 – Posizione dei BRD nell'edificio illustrato nella Figura 20

Il sistema di confinamento laterale può essere realizzato in molti modi, in funzione del tipo e della forma dell'elemento dissipativo. Nella Figura 19, ad esempio, è illustrato lo schema costruttivo dei dispositivi che sono mostrati nella Figura 18. Come si può osservare i vincoli laterali sono semplicemente costituiti da una serie di viti che, da una parte, sono a contatto con il nucleo elasto-plastico interno (consistente in un profilo d'acciaio tipo HE) che costituisce l'elemento dissipativo e, dall'altra, sono fissati mediante la filettatura all'involucro esterno nel quale sono stati ricavati i prigionieri.

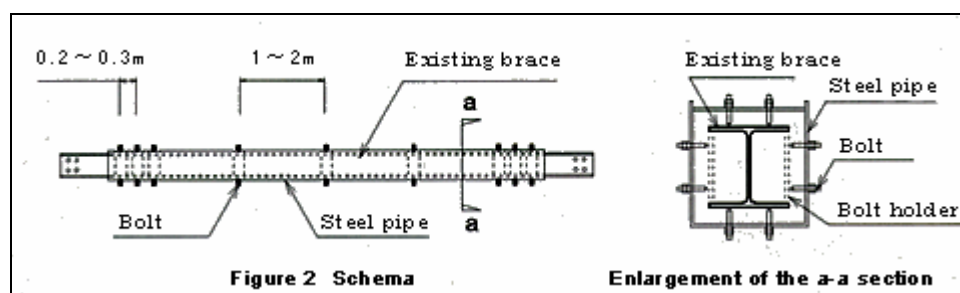


Figura n. 19 – Schema de sistema di sconfinamento laterale del nucleo elasto-plastico

Il sistema sopra descritto è stato utilizzato per l'adeguamento sismico del Bennett Building, nello Stato dello Utah, (Figura 20).



Figura n. 20 – Struttura del Bennett Building munito di controventi dissipativi

L'esempio riportato è particolarmente significativo perché, se si osserva attentamente la Figura 21, si può apprezzarne il concetto formatore: la presenza dei controventi a “croce” ai piani superiori, che, in realtà sono controventi a V diritte e rovesce sovrapposte, consente di ottenere un notevole irrigidimento delle ultime sei elevazioni che esalta lo spostamento d'interpiano (interstory drift) in corrispondenza del piano terra, a doppia altezza, nel quale sono inserite le diagonali dotate di dispositivi. La presenza di bracci di controvento nel piano interrato concorrono a minimizzare lo spostamento laterale del solaio del piano terra aumentando così l'efficienza del sistema dissipativo.

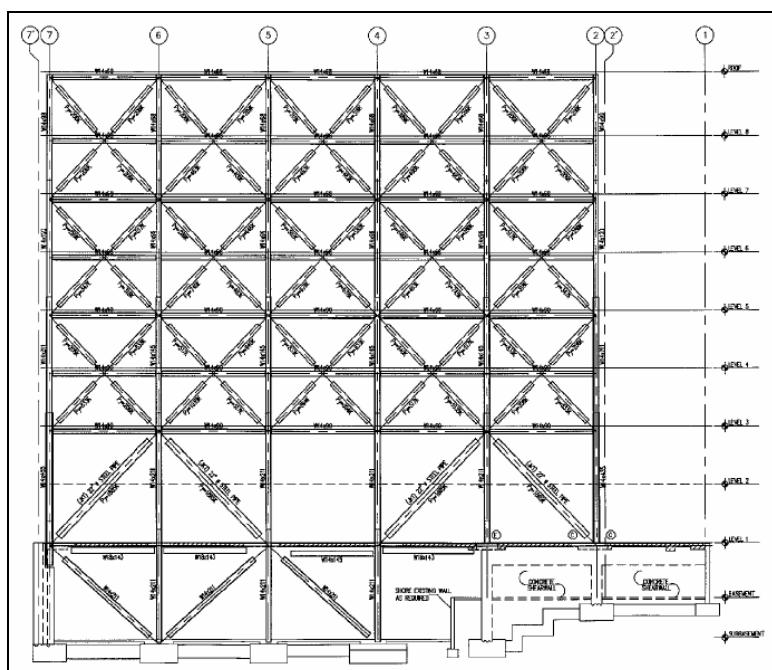


Figura n. 21 – Schema di disposizione delle controventatura normali e passive

In altri casi, come ad esempio nel sistema adottato per l'adeguamento sismico del Centro Assistenza della Protezione Civile di Ancona, i dispositivi utilizzati (BRAD) sono costituiti da involucri cilindrici al cui interno è posto il tondo d'acciaio a comportamento elasto-plastico leggermente incrudente, le cui caratteristiche isteretiche, ricavate durante le prove di qualificazione di dispositivi analoghi, sono illustrate nella Figura 22.

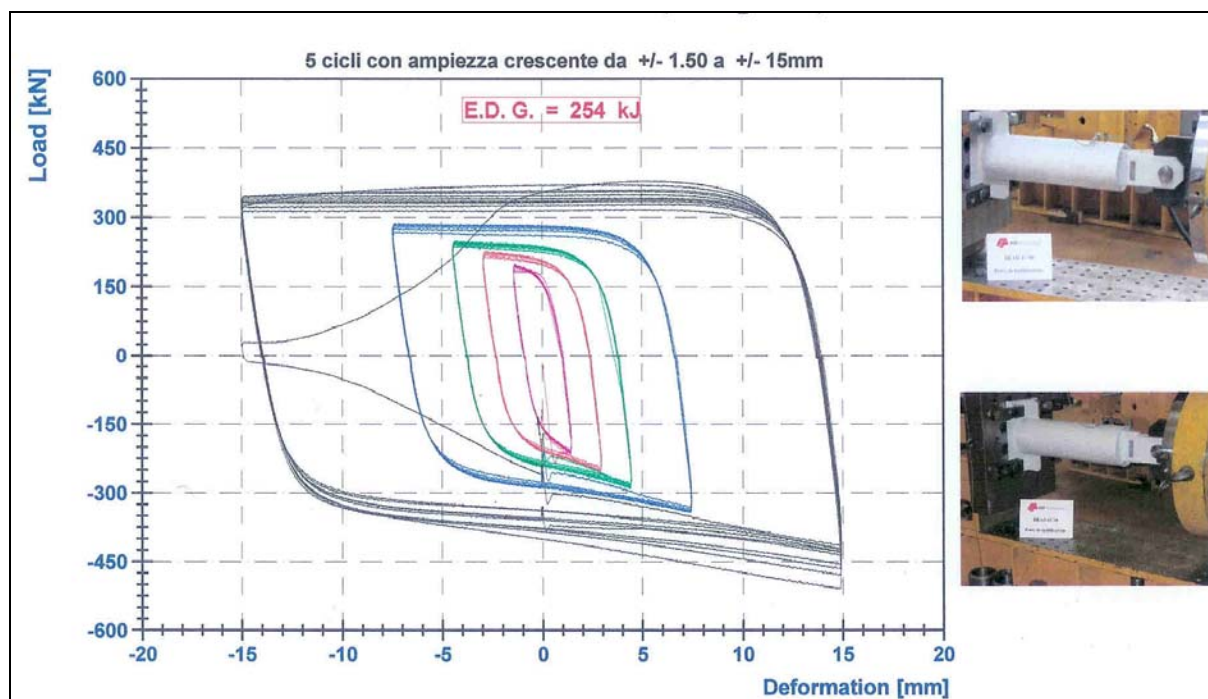


Figura n. 22 – Cicli d'isteresi di dispositivi BRAD

Riferimenti bibliografici

- [1] C. W. Roeder, E.G. Popov, Eccentrically braced steel frames for earthquake, ASCE Journal of Structural Division, vol.104, 1978
- [2] Ashok, Subhash, Design of multistory braced steel frames for earthquake, 7° WCEE, vol.4, Istanbul, Turkey, 1980
- [3] Kawamata, Ohnuma, Strengthening effect of eccentric steel braces to existing reinforced concrete frames, 7° WCEE, vol.4, Istanbul, Turkey, 1980
- [4] E.G. Popov, Eccentric seismic bracing of steel frames, 7° WCEE, vol.7, Istanbul, Turkey, 1980
- [5] E.G. Popov, Recent research on eccentrically braced frames, Engineering Structures vol. 5-1, 1983
- [6] K. Kasai, E.P. Popov, General behavior of WF steel shear links beams, ASCE Journal of Structural Engineering, vol.112-2, 1986
- [7] K. Kasai, E.P. Popov, Cyclic web buckling control for shear links beams, ASCE Journal of Structural Engineering, vol.112-3, 1986
- [8] T. Balendra, K.Y. Lam, C.Y. Liaw, S.L. Lee, Behavior of eccentrically braced frame by pseudo-dynamic test, ASCE Journal of Structural Engineering, vol.113-4, 1987
- [9] A.S. Wittaker, C.M. Uang, V.V. Bertero, Seismic testing of eccentrically braced dual steel systems, Earthquake Spectra vol. 5-2, 1989
- [10] E.P. Popov, M.D. Engelhardt, J.M. Ricles, Eccentrically braced frames: U.S. practice, AISC Engineering Journal, second quarter, 1989
- [11] N. Scibilia, Seismic analysis and design of eccentrically braced frames steel frames, EAEE, vol.2, Moscow, Russia, 1990
- [12] N. Scibilia, P. Colajanni, Plastic design of steel EBSs connected to RC walls, 10° WCEE, vol.8, Madrid, Spain, 1992
- [13] E. Fehling, W. Pauli, J.G. Bouwkamp, Use of vertically shear-links in eccentrically braced frames 10° WCEE, vol.8, Madrid, Spain, 1992
- [14] M. D. Canales, R. Briseño de la Vega, Retrofitting techniques used in telephone buildings in Mexico, 10° WCEE, vol.9, Madrid, Spain, 1992
- [15] A. Ghobarah, T. Ramadan, Bolted link-column joints in eccentrically braced frames, Engineering Structures vol. 16-1, 1994
- [16] T. Ramadan, A. Ghobarah, Analytical model for shear-link behavior, ASCE Journal of Structural Engineering, vol.121-11, 1995
- [17] A. Bouadi, M. D. Engelhardt, On design of EBSs for seismic retrofit of reinforced concrete frames, 11° WCEE, Mexico, 1996
- [18] Martinez-Romero, Ductile large-span framing system for tall and slender steel buildings in seismic regions, 11° WCEE, Mexico, 1996
- [19] A. Ghoarah, H.A. Elfath, Rehabilitation of a reinforced concrete frame using eccentric steel bracing, 2001
- [20] F. Qin, T.C. Fung, C.K. Soh, Hysteretic behavior of completely overlap tubular joints, 2001
- [21] M. Bruneau, M. Sarraf, S.M. Zahari, F. Alfawakhiri, Displacement based energy dissipation systems for steel bridges diaphragms, 2001
- [22] L. Mastrandrea, R. Montuori, V. Piluso, Shear moment interaction in plastic design: eccentrically braced frames, proc. STESSA 2003, 175-180
- [23] T. Okazaky, MD Engelhardt, M. Nakashima, K. Suita, KC Tsai, Behavior of link-to-column connections in steel eccentrically braced frames, proc. STESSA 2003, 351-356
- [24] J.D. Aristizabal-Ochoa, Disposable knee bracing: improvement in seismic design of steel frames, ASCE Journal of Structural Engineering, vol.112-7, 1986
- [25] T. Balendra, M.T. Sam, C.Y. Liaw, Diagonal brace with ductile knee anchor for aseismic steel frame, Earthquake Engineering and Structural Dynamics vol. 19-4, 1990
- [26] T. Balendra, M.T. Sam, C.Y. Liaw, Design of earthquake-resistant steel frames with knee bracings, Journal of constructional steel research, vol. 18-3, 1991
- [27] T. Balendra, E.L. Lim, S.L. Lee, Ductile knee braced frames with shear yielding knee for seismic resistant structures, Engineering Structures vol. 16-3, 1994
- [28] A. Aschari, R. Mirghaderi, Study of a moment resistant knee braced frame as an alternative for moment resisting frames with rigid connections, 1996
- [29] M. Mofid, P. Khosravi, Non-linear analysis of disposable knee bracing, 2000
- [30] R. Giacchetti, AS Whittaker, VV Bertero, HM Aktan, Seismic response of a DMRSF retrofitted with friction-slip devices, proc. International meeting on base isolation and passive energy dissipation, 1989
- [31] AS Whittaker, VV Bertero, HM Aktan, R. Giacchetti, Seismic response of a DMSRF retrofitted with friction-slip devices, proc. Earthquake Engineering Research Institute, feb. 9-12, San Francisco 1989
- [32] R. Antonucci, R. Giacchetti, G. Di Matteo, Design parameters optimization for reinforced concrete structures incorporating energy dissipation bracings, UCB/EERC-97/05, The EERC-CURE Symposium in Honor of Vitelmo V. Bertero, January 31-February 1, 1997, Berkeley, California,
- [33] T. Balendra, C.H. Yu, F.L. Lee, An economical structural system for wind and earthquake loads, 2001
- [34] DM Bergman, SC Goel, Evaluation of cyclic testing of steel plate devices for added damping and stiffness, report UMCE 87-10, Unvers. Michigan, MI, 1987
- [35] MA Bhatti, KS Pister, E Polek, Optimal design of an earthquake isolation system, report UCB/EERC-78/22, University of California, Berkeley,CA, 1978



- [36] TT Soong, GF Dargush, Behavior of metallic plate dampers in seismic passive energy dissipation systems, Earth. Spectra 11(4), 545-568, 1995
- [37] EJ Graesser, FA Cozzarelli, A multidimensional hysteretic model for plastically deforming metals in energy adsorbing devices, tech report NCEER-91-0006, NCEER, Buffalo, NY, 1991
- [38] E Martinez-Romero, Experiences on the use of supplemental energy dissipators on building structures, Earth Spectra 9(3), 581-625, 1993
- [39] MD Monti, WH Robinson, A lead shear damper suitable for reducing the motion induced by wind and earthquake, proc 11 WCEE, Acapulco, Mexico, 1996
- [40] RI Skinner, JM Kelly, AJ Heine, hysteretic dampers for earthquake-resistant structures, EE&SD 3, 287-296, 1975
- [41] KC Tsai, HW Wong, CP Hong, YF Su, Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction, Earth Spectra 9(3), 505-528
- [42] AS Whittaker, VV Bertero, CL Thompson, LJ Alonso, Seismic testing of steel plate energy dissipation devices, Earth Spectra 7(4), 563-604, 1991
- [43] C Xia, RD Hanson, Influence of ADAS element on building seismic response, J Struct Eng 118(7), 1903-1918, 1992
- [44] HT Chen, YF Su, DS Juang, Strength-reduction factors for structures with added damping and stiffness device, proc. 11 WCEE, Acapulco, Mexico, 1996
- [45] ID Aiken, DK Nims, AS Wittaker, JM Kelly, Testing of passive energy dissipation systems, Earth Spectra 9(3), 335-370, 1993
- [46] TT Soong, GF Dargush, Passive energy dissipation systems in structural engineering, Wiley, 1997
- [47] DM Bergman, RD Hanson, Viscoelastic mechanical damping devices tested at real earthquake displacements, Earth Spectra 9(3), 389-417, 1993
- [48] KC Chang, TT Soong, ML Lai, EJ Nielsen, Viscoelastic dampers as energy dissipation devices for seismic applications, Earth Spectra 9(3), 371-387, 1993
- [49] KC Chang, TT Soong, ST Oh, ML Lai, Seismic behavior of steel frame with added viscoelastic dampers, J Struct Eng 121(10), 1418-1426, 1995
- [50] RD Hanson, Supplemental damping for improved seismic performance, Earth Spectra 9(3), 319-334, 1993
- [51] JR Hayes jr; DA Foutch, SL Wood, Influence of viscoelastic dampers on the seismic response of a lightly reinforced flat slab structure, Earth Spectra 15(4), 681-710, 1999
- [52] DIJ Jones, Viscoelastic material for damping applications. Damping Applications for Vibration Control, AMD-vol. 38, ASME, New York, 27-51, 1980
- [53] WQ Li, CS Tsai, Sismic mitigation of structures by using viscoelastic dampers, Nucl Engng Des 147(3), 263-274, 1994
- [54] P Mahmoodi, Structural dampers, J Struct Div 95(8), 1661-1672, 1969
- [55] P.Mahmoodi, LE Robertson, M Yontar, C Moy, L Feld, Performance of viscoelastic dampers in World Trade Centers towers, in: Dynamic of structures, JM Roesset, proc. Structures Congress '87, Orlando, Florida, 632-644, 1987
- [56] KP Cho, JE Cermak, ML Lai, EJ Nielsen, Viscoelastic damping for wind-excited motion of a five-story building frame, J Wind Engng & Indstr Aerodyn 77&78, 269-281, 1998
- [57] C Higgins, K Kasai, Experimental and analytical simulation of wind response for a full-scale VE-damped steel frame, J Wind Engng & Indstr Aerodyn 77&78, 297-313, 1998
- [58] RA Samali, KCS Kwok, Use of viscoelastic dampers in reducing wind and earthquake-induced motion of building structures, Eng Struct 17(9), 6339-654, 1995
- [59] CS Tsai, HH Lee, Applications of viscoelastic dampers to high-rise buildings, J Struct Engng 119(4), 1222-1233, 1993a
- [60] CS Tsai, HH Lee, Seismic mitigation of bridges by using viscoelastic dampers, Compt Struct 48(4), 719-727, 1993b
- [61] RH Zhang, TT Soong, Seismic design of viscoelastic dampers for structural applications, J Struct Engng 118(5), 1375-1392, 1992
- [62] RH Zhang, TT Soong, P Mahmoodi, Seismic response of steel frame structures with added viscoelastic dampers, EE&SD 18, 389-396, 1989
- [63] ML Lai, P Lu, DA Lunsford, K Kasai, KC Chang, Viscoelastic damper: a damper with linear or nonlinear material?, 11 WCEE, Acapulco, Mexico, 1996
- [64] WH Lin, AK Chopra, Asymmetric one-story elastic systems with non-linear viscous and viscoelastic dampers: Earthquake response, EE&SD 32(4), 555-577, 2003
- [65] H Choi, WB Kim, SJ lee, A method of calculating the non-linear seismic response of a building braces with viscoelastic dampers, EE&SD 32(11), 1715-1728, 2003
- [66] Y Ooki, K Kasai, S Motoyui, Steel dome structure with viscoelastic dampers for seismic damage mitigation, proc. STESSA 2003, 641-64
- [67] S Fujita, T Fujita, O Furuya, S Morikawa, Y Suizu, T Teramoto, H Kitamura, Development of high-damping rubber damper for vibration attenuation of high-rise buildings", 10 WCEE, Madrid, Spain, 1992
- [68] T Teramoto, H Kitamura, H Ozaki, O Furuya, S Morikawa, S Suzuki, Practical application of high-damping rubber dampers to slender building, 11 WCEE, Acapulco, Mexico, 1996
- [69] KNG Fuller, HR Ahmadi, IR Goodchild, G Magonette, F Taucer, C Dumoulin, Rubber based energy dissipators for earthquake protection of structures, 12 WCEE, Auckland, New Zealand, 2000
- [70] FG Cesari, P Battistella, Concepts and experimental data on energy dissipating devices applied to power steam line design, proc. 7th International seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active control of structures, 2001



- [71] JS Hwang, JD Wu, TC Pan, G Yang, A mathematical model for elastomeric isolation bearings, *EE&SD* 31(4), 771-789, 2002
- [72] CS Tsai, TC Chiang, BJ Chen, SB Lin, An advanced analytical model for high damping rubber bearings, *EE&SD* 32(9), 1373-11387, 2003
- [73] KS Lee, R Sause, JM Ricles, LW Lu, K Ab-Malek, Seismic behavior of steel MRFs with UHDNR structural dampers, *proc. STESSA 2003*, 615-620
- [74] M Dolce, R Marnetto, Passive seismic devices based on shape memory alloy, *proc 12 WCEE, Auckland, New Zealand, 2000*
- [75] M Dolce, R Marnetto, Experimental tests on seismic devices based on shape memory alloy, *proc 12 WCEE, Auckland, New Zealand, 2000*
- [76] M Dolce, D Cardone, FC Ponzo, Retrofitting of R/C framed structures through SMA-based dissipating and re-centring braces, *proc. 7th International seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active control of structures, 2001*
- [77] R DesRoches, M Delmont, Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloys, *Eng Struc* 24, 325-332, 2002
- [78] YL Han, QS Li, AQ Li, AYT Leung, PH Lin, Structural vibration control by shape memory alloy damper, *EE&SD* 32(3), 483-494, 2003
- [79] T. Nagao, S. Takahashi, Development of reinforced concrete encased steel brace with high ductility, 10° WCEE, vol.8, Madrid, Spain, 1992
- [80] Watanabe, Nakamura, Study on the behavior of buildings using steel with low yield point, 10° WCEE, vol.8, Madrid, Spain, 1992
- [81] V. Kalyanaraman, K. Mahadevan, Core loaded earthquake resistant bracing system, *Journal of constructional steel research* v. 46, 1998
- [82] K. Kasai, Y. Fu, A. Watanabe, Passive control systems for seismic damage mitigation, *ASCE Journal of Structural Engineering*, vol.124-5, 1998
- [83] P. Clark, I. Aiken, K. Kasai, E. Ko, I. Kimura, Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices, ???
- [84] R. Sabelli, S. Mahin, C. Chang, Seismic demands on steel braced frame buildings with buckling restrained braces, *Eng Struct* 25, 655-666, 2003
- [85] C Black, N Makris, I Aiken, Component testing and modeling of buckling restrained "unbonded" braces, *proc. STESSA 2003*, 141-145
- [86] T Usami, A Kasai, M Kato, Behavior of buckling-restrained brace members, *proc. STESSA 2003*, 211-216
- [87] M Iwata, T Kato, A Wada, Performance evaluation of buckling-restrained braces in damage-controlled structures, *proc. STESSA 2003*, 37-43
- [88] T Takeuchi, K Suzuki, Performance-based design for truss-frame structures using energy dissipation devices, *proc. STESSA 2003*, 55-61
- [89] R Sabelli, I Aiken, Development of building code provisions for buckling restrained braced frames, *proc. STESSA 2003*, 813-818
- [90] MC Constantinou, P Tsopelas, W Hammel, AN Sihager, Toggle-brace-damper seismic energy dissipation system, *J Struct Engng* 127(2), 105-112, 2001
- [91] J Gluck, Y Ribakov, Active viscous damping system with amplifying braces for control of MDOF structures, *EE&SD* 31(9), 1735-1751, 2002
- [92] T Matsuoka, K Omata, Z Miyagi, A study of a viscoelastic damper using a lever-type displacement magnifying mechanism, *proc. 7th International seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active control of structures, 2001*
- [93] MC Phocas, A Pocanschi, Steel frames with bracing mechanism and hysteretic dampers, *EE&SD* 32(5), 811-825, 2003
- [94] S Yamada, T Taguchi, Dynamic performance of steel buildings with the vibration control system using non-structural members, *proc. STESSA 2003*, 663-668
- [95] K Kasai, Y Fu, A Watanabe, Passive control systems for seismic damage mitigation, *J Struct Eng*, 5-1998, 501-512
- [96] F Paolacci, M De Angelis, Passive control of structure using viscoelastic devices, *proc. 7th International seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active control of structures, 2001*
- [97] MP Singh, LM Moreschi, "Optimal placement of dampers for passive response control", *EE&SD* 31(4), 955-976, 2002
- [98] WP Kwan, SL Billington, "Influence of hysteretic behavior on equivalent period and damping of structural systems", *J Struct Engng* 129(5), 576-585, 2003
- [99] WH Lin, AK Chopra, Asymmetric one-story elastic systems with non-linear viscous and viscoelastic dampers: Simplified analysis and supplemental damping system design, *EE&SD* 32(4), 579-596, 2003
- [100] H Yamagouchi, A El-Abd, Effect of earthquake energy input characteristics on hysteretic damper efficiency, *EE&SD* 32(6), 827-843, 2003
- [101] DJ Dowdell, CE Ventura, Determining optimal damper size in a steel frame structure using structural control concepts, *proc. STESSA 2003*, 609-614
- [102] JM Kelly, The seismic protection of large public buildings: main requirements and benefits of using innovative antiseismic techniques, *proc. 7th International seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active control of structures, 2001*
- [103] JE Martinez-Rueda, Application of passive devices for the retrofitting of reinforced concrete structures, 11 WCEE, Acapulco, Mexico, 1996
- [104] SE Ruiz, L Esteva, Research and practice in the seismic design of buildings with passive energy dissipating devices in Mexico, *proc. 7th International seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active control of structures, 2001*

- [105] HM Koh, W Park, S Ok, Progress of application and R&D for seismic isolation and passive energy dissipation for civil and industrial structures in Korea, proc. 7th International seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active control of structures, 2001
- [106] M Ikenaga, Asuzuki, M Miyazaki, Examples which applied anti-seismic devices to existing buildings and the new approval system for seismic isolator in Japan, proc. 7th International seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active control of structures, 2001
- [107] Antonucci R., Giacchetti R., Bartera F., "Studio di controventi dissipativi muniti di dispositivi in gomma a comportamento viscoelastico per la protezione sismica di strutture in c.a. intelaiate," Atti del X Convegno Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia" Potenza Matera, 9-13 Settembre 2001.
- [108] Giacchetti R., Bartera F. and Antonucci R., "Earthquake Upgrading of R.C. Frames by Steel Dissipating Braces," Proceedings Fourth European Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas STESSA 2003, Naples, June 9-12, 2003.
- [109] Bartera F. Dezi L. and Giacchetti R., "Cyclic Behaviour of a Reinforced Concrete Braced Frame with High Damping Rubber Devices," Fourth International Conference on Earthquake Resistant Engineering Structures ERES 2003, Ancona, Sept. 22-24, 2003.
- [110] Giacchetti R., Bartera F. and Costantini D., "Seismic Upgrade of an Existing Building by a Rubber-based Dissipating Bracing System," Atti del XI Convegno dell'Associazione Nazionale Italiana di Ingegneria Sismica "L'Ingegneria Sismica in Italia", Genova. 25-29 Gennaio 2004.
- [111] Bartera F., Giacchetti R., "Steel Dissipating Braces for Upgrading Existing Building Frames," Journal of Constructional Steel Research 60 (2004) 751-769.
- [112] Antonucci R., Balducci F., Bartera F., Castellano M.G., Fuller K., Giacchetti R., "Shaking Table Testing of an RC Frame with Dissipative Bracings," Proceedings 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004.
- [113] Dall'Asta A., Dezi L., Giacchetti R., Leoni G., Ragni L., "Cyclic Behaviour of HRD Dissipating Devices: Experimental Tests and Analytical Model," 9th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Kobe, Japan, June 13-16, 2005.
- [114] Dall'Asta A., Dezi L., Giacchetti R., Leoni G., Ragni L., "Dynamic Response of Composite Frames with Rubber-Based Dissipating Devices: Experimental Tests," Proceedings ICASS 2005, Shanghai, China, June 2005.
- [115] Dall'Asta A., Dezi L., Giacchetti R., Leoni G., Ragni L., Zito L., "Application of HDR Devices for the Seismic Protection of Steel Concrete Composite Frames: Experimental Results," Proceedings 6th International Conference on Steel and Structural Engineering (ICSAS) 2007, Oxford, UK, July 24th -27th 2007.
- [116] Giacchetti R., "Adeguamento sismico di telai in c.a. mediante controventi dissipativi muniti di dispositivi elasto-plastici ad instabilità impedita (BRD)," Nota Tecnica del Dipartimento di Architettura, Costruzioni e Strutture, numero 14, Marzo 2007