

Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica
(Reluis)



Progetto esecutivo 2005 – 2008
(Attuazione Accordo di Programma Quadro DPC-Reluis del 15 Marzo 2005)

Rapporto Scientifico Attività 1° Semestre

Linea 7 (resp. M. Dolce e G. Serino)

INDICE

1 Contributo dell'Unità di Ricerca c/o Univ. della Basilicata (R1_UNIBAS - Resp.: Dolce).....	4
1.1 Edifici con isolamento sismico.....	4
1.2 Edifici con sistemi di controventamento per il controllo passivo	5
1.3 Sistemi d'isolamento e dispositivi	7
1.4 Attività previste nel secondo semestre.....	8
2 Contributo dell'Unità di Ricerca c/o Univ. di Napoli Federico II (R2_UNINA_Se - Resp.: Serino)	10
2.1 Sviluppo di metodologie di progetto dei dissipatori	10
2.2 Studio sull'instabilità degli isolatori elastomerici armati.....	11
2.3 Analisi delle potenzialità dei dispositivi di tipo Wire-Rope.....	12
2.4 Attività previste nel secondo semestre.....	12
3 Contributo dell'Unità di Ricerca c/o Univ. di Napoli Federico II (R3_UNINA_DL - Resp.: De Luca)	13
3.1 Stato dell'arte sull'applicazione dell'isolamento sismico a strutture monumentali	13
3.2 Attività previste nel secondo semestre.....	15
4 Contributo dell'Unità di Ricerca c/o Univ. di Perugia (E1_UNIPG - Resp.: Parducci).....	16
4.1 Le configurazioni strutturali delle costruzioni resistenti al sisma.....	16
4.2 Gli aspetti economici.....	17
4.3 Redditività degli interventi di protezione sismica.....	17
4.4 Attività previste nel secondo semestre.....	18
5 Contributo dell'Unità di Ricerca c/o Univ. della Calabria (E2_UNICAL - Resp.: Vulcano)	19
5.1 Criteri di progetto semplificati di edifici con controventi dissipativi.....	19
5.2 Tecniche di isolamento alla base di edifici in presenza di terremoti "near-fault"	20
5.3 Attività previste nel secondo semestre.....	21
6 Contributo dell'Unità di Ricerca c/o Politecnico di Torino (E3_POLITO - Resp.: De Stefano)	22
6.1 Classificazione dei sistemi di controllo passivo a masse accordate	22
6.2 TMD	23
6.3 TLD	24
6.4 TMD e TLD a confronto	25
6.5 Attività previste nel secondo semestre.....	26
7 Contributo dell'Unità di Ricerca c/o Univ. di Udine (E4_UNID - Resp.: Sorace)	27
7.1 I dispositivi fluido-viscosi a matrice silconica.....	27
7.2 Sistemi d'isolamento sismico includenti dispositivi fluido-viscosi.....	28
7.3 Sistemi di controventi dissipativi includenti dispositivi fluido-viscosi	28
7.4 Attività previste nel secondo semestre.....	29
8 Contributo dell'Unità di Ricerca c/o Univ. di Salerno (E5_UNISA - Resp.: Palazzo).....	30
8.1 Stato dell'arte relativo all'applicazione dei Tuned mass Damper.....	30
8.2 Attività previste nel secondo semestre.....	33
9 Contributo dell'Unità di Ricerca c/o Univ. di Camerino (E6_UNICAM - Resp.: Dall'Asta).....	34
9.1 Dispositivi elasto-plastici ad instabilità impedita.....	34
9.2 Dispositivi in gomma ad alto smorzamento	35
9.3 Attività previste nel secondo semestre.....	36
10 Contributo dell'Unità di Ricerca c/o Univ. di Bologna (E7_UNIBO - Resp.: Savoia).....	37
10.1 Smorzamento strutturale e coefficienti di struttura per la progettazione in zona sismica di strutture pluripiano in c.a. protette con sistemi di dissipazione viscosa.....	37
10.2 Criteri di progettazione ed affidabilità di edifici multipiano con sistemi dissipativi a fluido silconico	38
10.3 Strutture prefabbricate con sistemi dissipativi di protezione sismica: sperimentazione su un prodotto di struttura al vero	38

10.4	Strutture prefabbricate con sistemi dissipativi di protezione sismica: sperimentazione su un prodotto di struttura al vero	39
11	Contributo dell'Unità di Ricerca c/o Univ. di Napoli "Parthenope" (E8_UNIPARTH - Resp.: Occhiuzzi)	40
11.1	Introduzione	40
11.2	Disamina critica delle applicazioni esistenti di sistemi di controllo con dissipatori.....	41
11.3	Attività previste nel secondo semestre	42
12	Contributo dell'Unità di Ricerca c/o Univ. de L'Aquila (E89_UNIAQ - Resp.: Gattulli).....	43
12.1	Introduzione	43
12.2	Tecnologie correnti ed in corso di sviluppo	43
12.3	Metodologie di progettazione e calcolo	45
12.4	Strutture e realizzazioni	46
12.5	Attività previste nel secondo semestre	46

Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica

Progetto esecutivo 2005–2008**Progetto di ricerca N. 7****TECNOLOGIE PER L'ISOLAMENTO ED IL CONTROLLO DI STRUTTURE ED
INFRASTRUTTURE****Coordinatori: M. Dolce, G. Serino****1 Contributo dell'Unità di Ricerca c/o Univ. della Basilicata (R1_UNIBAS - Resp.: Dolce)**

***Titolo specifico del programma svolto dall'Unità di Ricerca:** Controllo passivo di edifici e ponti: studi sperimentali e numerici per la validazione ed il miglioramento dei metodi di progettazione, analisi e verifica delle strutture e delle modalità di prova dei dispositivi.*

1.1 Edifici con isolamento sismico

Il crescente numero di applicazioni dell'isolamento sismico ad edifici e ponti e la diversificazione delle tecnologie disponibili hanno portato i paesi a più elevata sismicità a dotarsi di norme per la progettazione di strutture isolate dal sisma, al passo con l'attuale tecnologia ed in linea con i progressi tecnico-scientifici al riguardo [Martelli and Forni 2003, Dolce et al. 2004a, Dolce e Santarsiero 2004b, 2004c, ICC 2000, 8ISIED 2003, 9ISIED 2005]. L'Eurocodice 8, nelle parti 1 e 2 [CEN-1998-1-1 2003, CEN-1998-1-2 2004], relative rispettivamente agli edifici (e alle strutture in generale) e ai ponti, tratta la progettazione delle strutture dotate d'isolamento sismico in specifici capitoli. Anche le nuove norme sismiche italiane e le successive modifiche e integrazioni [PCM 2005] contengono due specifici capitoli, nelle parti relative agli edifici e ai ponti, per una progettazione delle strutture con isolamento sismico pienamente coerente con i criteri e gli obiettivi generali delle norme. Esse lasciano ampio margine all'innovazione, sia progettuale che tecnologica, prendendo in esame e fornendo gli strumenti per il progetto con le diverse strategie d'isolamento sismico, incremento del periodo o limitazione della forza, realizzate mediante dispositivi con diversi comportamenti.

Riguardo alle modalità di calcolo e di progettazione, il mantenimento in campo sostanzialmente elastico della struttura semplifica e rende più affidabile l'intera procedura di progetto, grazie alla migliore aderenza del modello di calcolo al reale comportamento della struttura sotto terremoti violenti. Le norme recepiscono tali vantaggi, consentendo l'esecuzione di analisi semplificate, di tipo statico, e permettendo la progettazione senza l'adozione di particolari regole per la determinazione delle sollecitazioni di progetto.

Le norme dedicano una particolare attenzione alla corretta impostazione del progetto, cruciale per il buon funzionamento dell'isolamento sismico, fornendo indicazioni riguardanti i dispositivi e il sistema strutturale nel suo insieme. Le prime sono volte ad evitare malfunzionamenti dei dispositivi per difetti propri o di montaggio e a rendere possibile la loro ispezione, manutenzione e, eventualmente, sostituzione. Le seconde sono volte ad ottenere un comportamento corretto e ottimale del sistema d'isolamento, assicurando innanzitutto il libero movimento della porzione dell'opera isolata (sovrastuttura) rispetto al resto dell'opera (sottostruttura), a strutture circostanti e al terreno. Particolare attenzione è rivolta alla limitazione degli effetti torsionali e di sollecitazioni anomale su singoli dispositivi e alla limitazione di spostamenti differenziali tra le diverse parti della struttura.

Le normative o linee guida dei paesi in cui l'isolamento sismico ha una storia più lunga e/o la cui applicazione è numericamente rilevante, quali Giappone, USA, Cina, Nuova Zelanda, Francia, Cile, Russia, Armenia, sono raccolte in [Martelli and Forni 2003].

Riguardo alle tipologie strutturali, in tutti i paesi in questione le norme trattano edifici, ponti e strutture industriali. In Armenia, le norme (o linee guida) sull'isolamento sismico sono dirette alla progettazione di strutture in genere, ma unicamente dotate di dispositivi in elastomero naturale armato ad alto smorzamento. In Russia, e negli altri stati delle ex Unione sovietica, le norme trattano sistemi d'isolamento cosiddetti "adattanti" all'azione sismica, che utilizzano elementi di riserva ovvero fusibili [Eisenberg et al. 1997].

La maggior parte delle norme o linee guida mondiali consentono di utilizzare tre metodi di analisi diversi: (i) analisi statica lineare, (ii) analisi dinamica lineare e (iii) analisi dinamica non lineare, differenziandone sensibilmente i limiti di applicabilità.

Tutte le normative più avanzate sono concordi nella possibilità di effettuare analisi semplificate (come l'analisi statica lineare), stante l'affidabilità offerta dai dispositivi di isolamento e la semplicità di comportamento dinamico delle strutture isolate, a patto che siano soddisfatte una serie di condizioni

riguardanti: (A) le caratteristiche meccaniche del sistema di isolamento e (B) le caratteristiche meccaniche e geometriche della sovrastruttura, cui si aggiunge una serie di limitazioni sul terreno di fondazione e sulla sismicità del sito. In Giappone è prescritto che lo smorzamento massimo che si può portare in conto nel calcolo dell'accelerazione spettrale è pari circa al 28%, come in Italia, ed un valore minimo del periodo della struttura isolata, che non dipende dal periodo della corrispondente struttura a base fissa, come invece accade nelle altre normative. Non viene fissato, inoltre, un valore massimo del periodo della struttura isolata, mentre l'altezza massima della sovrastruttura è pari a 60 m (contro i 20 m previsti in Italia, Armenia e USA). L'eccentricità fra centro di massa e di rigidezza è limitata al 3% del giratore di inerzia del sistema di isolamento (e non della dimensione trasversale della struttura come in Italia). La presenza della componente sismica verticale non deve determinare trazione negli isolatori. Sono, inoltre, imposte limitazioni al tipo di suolo in fondazione e viene esclusa la possibilità di adottare l'isolamento sismico sui terreni suscettibili di fenomeni di liquefazione.

La norma cinese prevede l'uso di metodi semplificati, con limitazioni parzialmente in accordo con quelle di tipo A, B, con le seguenti precisazioni: la limitazione dell'altezza dell'edificio è riportata in termini di periodo di vibrazione della struttura fissa $T_f \leq 1.0$ sec, il che corrisponde tipicamente ad edifici di 10-12 piani (in Italia è 5 piani, in USA 4 piani, in Giappone 60 m). Il periodo massimo della struttura isolata è il minimo tra 2 sec e 5 volte T_g , periodo caratteristico del terreno di fondazione. È esplicitamente richiesta la regolarità in elevazione e la differenza tra i periodi dei modi di vibrazione fondamentali della struttura isolata, nelle due direzioni in pianta, deve essere inferiore al 30% [Mezzi 2003]. Infine, sono previste limitazioni sulle classi di terreno di fondazione. I metodi d'analisi semplificati forniscono il taglio totale alla base della struttura, da distribuire lungo l'altezza della stessa secondo leggi coerenti con le limitazioni assunte per l'applicabilità dei metodi semplificati. La norma italiana e quella francese, ad esempio, prevedono distribuzioni di forza proporzionali alla massa, nell'ipotesi di accelerazioni di piano costanti lungo l'altezza della struttura. La norma statunitense, invece, prevede una distribuzione delle accelerazioni linearmente crescente lungo l'altezza della struttura. La norma cinese adotta, in generale, una distribuzione lineare delle forze di piano, anche se, per edifici sufficientemente rigidi (ad esempio quelli in muratura), consente una distribuzione costante. Da segnalare, infine, la complessa distribuzione di forze previste dalla norma giapponese, che consente l'analisi statica su edifici di altezza fino a 60 m, dipendente dai contributi al taglio totale alla base dato dai dispositivi lineari, viscosi ed isteretici.

L'analisi dinamica lineare si rende necessaria quando le condizioni di tipo B non sono verificate, implicando che la sovrastruttura non sia assimilabile ad una massa rigida. Trattandosi di un'analisi lineare, le condizioni di tipo A risultano comunque necessarie e, nella norma italiana, sono anche sufficienti. Negli USA, invece, risulta necessario anche il rispetto delle condizioni sul tipo di suolo e sulla sismicità del sito. La norma giapponese impone di passare direttamente all'analisi dinamica non lineare, qualora non siano soddisfatte le condizioni per l'analisi statica.

L'analisi dinamica non lineare è sempre applicabile e prevede l'impiego di accelerogrammi coerenti con le caratteristiche spettrali dei terremoti che possono verificarsi nel sito in esame. La norma italiana, a differenza delle altre normative, consente di modellare in maniera semplificata le strutture che soddisfano le condizioni di tipo B (ma non quelle di tipo A), assimilando la sovrastruttura ad una massa rigida collegata a terra tramite isolatori di cui, invece, viene richiesto un accurato modello numerico non lineare.

È evidente che le differenze tra le diverse normative scaturiscono dalle diversità delle esperienze e delle tradizioni progettuali e costruttive, dal livello di avanzamento tecnologico, dal tipo di sismicità delle diverse aree, dall'atteggiamento più o meno prudentiale dei normatori. Le differenze osservate fanno ritenere che l'atteggiamento molto prudentiale, presente nelle norme di cinque o dieci anni fa, si stia attenuando progressivamente, man mano che le conoscenze migliorano e le esperienze dei terremoti confermano l'efficacia e la "robustezza" concettuale e sostanziale dell'isolamento sismico.

1.2 Edifici con sistemi di controventamento per il controllo passivo

Sebbene la tecnica del controllo passivo mediante controventi dissipativi abbia una storia abbastanza consolidata alle spalle, se non altro in termini di studi numerici e sperimentali, di varietà di dispositivi realizzati e verificati sperimentalmente [Braga et al. 2002, Cardone et al. 2000, 2004, Dolce et al. 2000, 2001, 2004d, 2005b, Costantinou et al. 1998], e utilizzati in applicazioni reali [8ISED 2003, 9ISED 2005], non vi è stato uno sviluppo altrettanto esteso a livello normativo, come per l'isolamento sismico. Infatti, mentre solo le normative di nuova concezione ne prevedono l'utilizzo [PCM 2003, 2005, CEN-TC340 2004, Min. Infrastr. Trasp. 2005], quasi nessun codice definisce i dettagli sul dimensionamento delle caratteristiche meccaniche dei sistemi dissipativi. Fa eccezione l'americana FEMA [FEMA 274 1997, FEMA 356 2000], che, pur evidenziando l'estrema varietà dei metodi di progetto e verifica legata alla varietà dei dispositivi dissipativi, tenta di inquadrare in maniera organica il problema della progettazione.

Il sistema di protezione passiva con smorzatori a dissipazione di energia comprende un'ampia gamma di dispositivi destinati ad incrementare lo smorzamento e, generalmente, anche la rigidità e la resistenza strutturale. I controventi con dispositivi ricentranti [Dolce et al. 2000], inoltre consentono di riportare, dopo l'evento sismico e a seguito di plasticizzazioni nelle membrature, l'edificio nella sua condizione indeformata. La FEMA 274 distingue due tipologie di dispositivi, una con comportamento dipendente dagli spostamenti e caratterizzata da una legge di tipo bilineare o trilineare isteretico, elastoplastico o rigido-plastico (attritivo) [Whittaker et al. 1989, Aiken and Kelly 1990, ATC 1993, Soong and Constantinou 1994, Grigorian and Popov 1994, Yang and Popov 1995, Li and Reinhorn 1995], l'altra con comportamento dipendente dalla velocità, con dispositivi viscoelastici polimerici [Chang et al. 1991, Bergman and Hanson 1993], viscoelastici solidi [Kasai et al., 1993], fluido viscosi [Constantinou and Symans 1993, Soong and Constantinou 1994]. Oltre ai dettagli sulle modellazioni di tipo lineare e non lineare delle strutture contenenti le diverse tipologie di dispositivi, le FEMA 274 e 356 forniscono prescrizioni sul comportamento complessivo dell'insieme struttura-dispositivi e sulle modalità di prova, preliminare e di accettazione, dei dispositivi e approfondiscono gli aspetti legati al dimensionamento di massima degli stessi in funzione delle caratteristiche strutturali dell'edificio. Si distinguono due tipologie di procedure, una lineare ed una non lineare. Quella lineare si basa su considerazioni di tipo energetico. In altre parole si valuta in maniera iterativa l'abbattimento della forzante sismica prodotto dall'incremento di dissipazione di energia, con l'obiettivo di ridurre gli spostamenti massimi del sistema struttura-controventi entro limiti prestabiliti. Quella non lineare si basa sulla ricerca del performance point di un sistema in cui la curva di capacità è fornita dalla risposta della struttura controventata, ricavata mediante analisi di push-over, e la curva di domanda è ricavata iterativamente in funzione dello spostamento raggiunto dal sistema e della relativa dissipazione dei dispositivi. In bibliografia è possibile trovare molti altri metodi di progetto, legati alle tipologie di struttura (acciaio, c.a., muratura) e di dispositivo. In generale, i parametri caratteristici della progettazione dei controventi (capacità dissipativa, resistenza e rigidità) sono ottimizzati in base alle caratteristiche della struttura e del "tipo" di sisma atteso, in funzione degli stati limite considerati e per ridurre al minimo l'impiego di materiale e quindi i costi dei dispositivi. I metodi di progettazione si distinguono in metodi che considerano la struttura sempre in campo elastico e metodi in cui la struttura può subire escursioni controllate in campo plastico. Alla prima categoria appartiene il metodo di progetto dovuto a [Filiatrault e Cherry 1990] per dispositivi di tipo isteretico ed elastoplastico, che individua la forza di scorrimento del dispositivo (slip-load) ottimale in quella che consente la minimizzazione dell'integrale esteso alla durata del sisma della differenza tra energia di ingresso e quella dissipata dal sistema di controventi (Vibrating Energy Surface). Gli stessi autori hanno proposto una variante al metodo [Filiatrault e Cherry 1990b] basata sulla minimizzazione di un indice (Relative Performance Index) che fornisce, nell'ipotesi che la dissipazione avvenga solo nei controventi, una misura dell'energia immagazzinata dalla struttura controventata in rapporto a quella relativa alla stessa struttura priva di controventi e infinitamente elastica. Il limite principale di questo metodo è il rigore delle ipotesi di struttura elastica e di distribuzione costante delle rigidità e delle resistenze in altezza, che comportano uno sfruttamento delle risorse dissipative dei dispositivi eccessivo ai livelli inferiori e scarso ai piani alti e, in alcuni casi, sezioni molto grandi dei controventi. Sicuramente più appropriati appaiono i metodi basati sull'accettazione di una plasticizzazione controllata delle strutture, particolarmente di quelle in c.a.. Uno di questi metodi è quello proposto in [Vulcano 1993], il quale ovvia alle ipotesi restrittive del primo metodo sopra illustrato, considerando una distribuzione differenziata delle rigidità e delle resistenze ai diversi piani dei controventi e la possibilità di escursione in campo plastico della struttura in c.a. [Ciampi 1991, 1993] considera la progettazione dei controventi applicata ad un oscillatore ad 1 G.D.L. elastoplastico equivalente a duttilità imposta, estendendo le caratteristiche del controvento equivalente ai vari piani dell'edificio secondo leggi di distribuzione in altezza definite a priori e legate alle caratteristiche e alla distribuzione di resistenza e rigidità di massima del telaio in c.a.. Il Metodo di progetto in [Braga and D'anzi 1994] propone una distribuzione in altezza delle caratteristiche di rigidità e resistenza dei controventi dissipativi, legata alle reali caratteristiche di resistenza delle sezioni in c.a. del telaio, e quindi più ottimizzante ai fini della riduzione dei parametri di risposta. A differenza dei metodi precedenti, i parametri per la quantificazione e distribuzione delle rigidità e resistenze dei controventi elasto-plastici sono trattati in maniera congiunta, correlandoli con la rigidità e resistenza del telaio in c.a. (approccio misto rigidità-resistenze). A questo metodo è stata apportata una modifica [Braga e De Carlo 2004] per considerare la variazione dello sforzo normale in travi e pilastri al variare della forza sismica. In [Constantinou et al. 1998] è proposta un'analisi semplificata non lineare di strutture dotate di controventi dissipativi, in cui si sostituisce il sistema non lineare con un sistema lineare equivalente, utilizzando delle procedure di analisi modale. La struttura, completa di controventi dissipativi, viene sottoposta ad un'analisi di push-over, in cui la distribuzione delle forze applicate deve essere coerente con la distribuzione delle forze d'inerzia della struttura [Reinhorn et al. 1995]. Distribuzioni dell'accelerazione triangolari ed uniformi producono curve di push-over limite, per cui il calcolo viene effettuato con entrambe le distribuzioni di carico.

Poiché l'analisi è statica, le caratteristiche dei dispositivi dissipativi dipendenti dalla velocità (dissipatori viscosi e viscoelastici) non possono essere tenute in conto. Si assume che queste caratteristiche incidano solo sullo smorzamento effettivo del sistema che viene considerato modificando lo spettro di risposta. Alcune caratteristiche dei dispositivi dissipativi, ad esempio la rigidità dei dispositivi viscoelastici, sono dipendenti dalla frequenza e dovrebbero essere determinate in base alla frequenza effettiva della struttura ai diversi spostamenti e considerate nell'analisi di push-over. Basandosi su un approccio nel dominio delle frequenze il metodo messo a punto da [Serino and Spizzuoco 2002] supera queste limitazioni, fornendo il coefficiente viscoso o lo slip load a seconda che si voglia usare un dispositivo viscoso o rigido-plastico.

1.3 Sistemi d'isolamento e dispositivi

I componenti di un sistema di isolamento si possono distinguere in isolatori e dispositivi ausiliari [PCM 2003]. Gli isolatori svolgono la funzione di sostegno dei carichi gravitazionali, ossia sono dei particolari apparecchi di appoggio, con elevata rigidità verticale ed elevata deformabilità (o bassa resistenza) orizzontale. A tale funzione possono essere associate o meno quelle di dissipazione di energia, di vincolo laterale sotto carichi orizzontali di servizio non sismici (vento, etc.), di ricentraggio della struttura al termine del sisma. I dispositivi ausiliari svolgono la funzione dissipativa e/o di ricentraggio del sistema e/o di vincolo laterale sotto carichi orizzontali di servizio. Dispositivi con principi di funzionamento analoghi ai dispositivi ausiliari vengono utilizzati anche nei sistemi di controventamento degli edifici [Housner et al 1998, Soong and Dargush 1997, Hanson et al. 1993, Constantinou et al. 1998].

Gli isolatori più utilizzati possono essere distinti in due principali categorie: (a) isolatori in materiale elastomero ed acciaio, (b) isolatori a scorrimento.

Gli isolatori in elastomero (gomma) armato sono realizzati alternando strati di elastomero dello spessore di 5-20 mm con lamierini in acciaio dello spessore di 2-3 mm. Questi ultimi esplicano un'azione di confinamento sull'elastomero, che aumenta sensibilmente la rigidità verticale e la portanza, senza influenzare la deformabilità a taglio in direzione orizzontale. Alcune problematiche degli isolatori in gomma sono: (i) la stabilità sotto compressione e taglio, (ii) il creep della gomma, (iii) l'efficacia dell'aderenza gomma-acciaio ad elevati spostamenti, (iv) le variazioni di comportamento meccanico dell'elastomero con la temperatura, la frequenza di oscillazione e l'invecchiamento. Esistono sostanzialmente tre tipi di isolatori elastomerici: (i) a basso smorzamento; (ii) ad elevato smorzamento (iii); con nucleo in piombo o altro materiale dissipativo.

Gli isolatori in gomma armata a basso smorzamento [Kelly and Quiroz 1992, Taylor et al. 1992] presentano un comportamento meccanico sostanzialmente elastico (rigidità quasi costante) al crescere della deformazione ed un rapporto di smorzamento molto basso, dell'ordine del 2-4%. Gli isolatori in gomma armata ad elevato smorzamento [Kelly 1991, Derham et al. 1985] sono ottenuti aggiungendo alla miscela della gomma opportuni additivi (resine, oli, etc.) che consentono di raggiungere valori di smorzamento compresi fra il 10% ed il 20%. La natura della dissipazione di energia è in parte viscosa ed in parte isteretica [Naeim and Kelly 1999]. Le proprietà meccaniche degli isolatori ad elevato smorzamento variano in modo significativo durante i primi cicli di deformazione, a causa del fenomeno noto come "scragging" [Morgan and Whittaker 2001]. Gli isolatori in gomma armata con nucleo in piombo [Robinson 1982, Kelly 1992] utilizzano uno o più inserti cilindrici in piombo, disposti in appositi fori verticali nell'isolatore in gomma armata. Lo smorzamento equivalente è tipicamente compreso fra il 15% ed il 35% [Naeim and Kelly 1999]. Sia la rigidità che l'energia dissipata diminuiscono al crescere del numero di cicli, per i primi 5-10 cicli, con un fenomeno analogo allo "scragging" nella gomma, ma con effetti più marcati. Elevate capacità dissipative, ma con un'aliquota viscosa decisamente più elevata ed un comportamento più stabile, possono essere ottenute utilizzando nuclei di materiali polimerici ad elevata viscosità [Dolce et al. 2003a].

Negli isolatori a scorrimento, le superfici di scorrimento più utilizzate sono di acciaio inossidabile lucidato e PTFE (Teflon). Il coefficiente di attrito dinamico è compreso fra il 6% ed il 12%, riducendosi all' 1.2% in caso di superfici lubrificate [Constantinou et al. 1988, Tyler 1977], ed è funzione di: (i) pressione di contatto, (ii) velocità di scorrimento, (iii) temperatura [Bondonet and Filiatrault 1997, Constantinou et al. 1987, Hwang et al. 1990, Dolce et al. 2004a]. Nella pratica, si rinuncia quasi sempre a sfruttare la dissipazione di energia per attrito, per l'eccessiva variabilità del coefficiente d'attrito. Per questo gli isolatori in acciaio-PTFE non sono utilizzati come unico componente del sistema di isolamento, a meno che non incorporino elementi atti a svolgere tali funzioni. Gli unici isolatori a scorrimento che svolgono la funzione ricentrante e dissipativa, senza elementi aggiuntivi, sono quelli con superfici di scorrimento curve [Al Hussaini et al. 1994].

Fra i dispositivi ausiliari, per il completamento di un sistema d'isolamento o per la realizzazione di un sistema di controventamento per il controllo passivo degli edifici, si distinguono: dispositivi a comportamento non lineare, indipendente dalla velocità di deformazione, basati sull'isteresi di alcuni metalli (acciaio, piombo), sull'attrito fra superfici opportunamente trattate o sulle proprietà superelastiche di particolari leghe metalliche [Dolce et al 2000]; dispositivi a comportamento viscoso, dipendente dalla velocità di deformazione, basati sull'estrusione di fluidi viscosi; dispositivi a comportamento lineare, o quasi, basati su speciali polimeri.

Il sistema d'isolamento svolge un ruolo cruciale all'interno di una struttura isolata. Per tale motivo, le norme sismiche sono tutte concordi nel richiedere un livello di sicurezza superiore rispetto alle altre parti della struttura. Le prestazioni del sistema di isolamento possono variare in funzione di una serie di fattori meccanici, ambientali e temporali di cui si deve tenere conto durante la progettazione sia dei dispositivi d'isolamento che degli elementi della sovra- e sotto- struttura (variabilità all'interno di una stessa fornitura, velocità di deformazione, entità dei carichi verticali, deformazioni simultanee nelle due direzioni, temperatura, invecchiamento). Molte normative, così come la normativa italiana, prescrivono l'esecuzione della cosiddetta "Upper and Lower Bound Analysis" prendendo in considerazione i valori minimi e massimi dei parametri di comportamento del dispositivo nelle diverse condizioni di lavoro [Morgan and Whittaker 2001]. Per quanto riguarda la caratterizzazione e la verifica dei dispositivi, la norma italiana, contrariamente ad altre norme, fornisce indicazioni precise sulle modalità di prova e di valutazione dei parametri sperimentali dei singoli dispositivi. In ambito CEN è in corso di sviluppo una specifica normativa armonizzata con l'EC8, per i dispositivi capaci di modificare la risposta sismica delle strutture [CEN-TC340 2004]. In essa vengono forniti i requisiti funzionali e le regole generali di progettazione, le caratteristiche dei materiali, i requisiti di produzione e verifica sperimentale, i criteri di accettazione, installazione e manutenzione.

1.4 Attività previste nel secondo semestre

Le attività dell'UR R1 – Università della Basilicata nel primo anno di attività riguarderanno tutti e quattro i task della linea di ricerca 7 (task 1 – Isolamento edifici, task 2 – Dissipazione edifici, task 3 – Isolamento ponti, task 4 – Dispositivi). Con approccio comune ai quattro task, la prima parte delle attività, in buona parte già effettuata nel primo semestre, è l'analisi dello stato dell'arte e delle normative internazionali. Nel secondo semestre, l'attenzione verrà particolarmente dedicata al riesame dei dati sperimentali originali rivenienti da precedenti attività di ricerca svolte dai componenti della stessa UR negli ultimi 10 anni e non ancora pienamente analizzati in relazione agli obiettivi della ricerca RELUIS. Tale analisi sarà eventualmente completata con dati, ovviamente di minor dettaglio, ricavati dalla letteratura scientifica. I risultati elaborati saranno oggetto di confronto con le prime analisi di simulazione numerica da svolgere nel primo anno, volte alla messa a punto di modelli da utilizzare nelle attività successive e alla preparazione delle attività sperimentali.

Per quanto riguarda le attività sperimentali, le prime prove in programma sono quelle che riguardano il task 4, ed in particolare le prove sugli isolatori in gomma per le verifiche di instabilità e di comportamento a trazione. A tal fine nel primo semestre è stata progettata e realizzata una modifica all'apparato di prova per isolatori in gomma, che consentirà nel corso del secondo semestre di effettuare prove su isolatori anche di grandi dimensioni. Nel corso del secondo semestre si prevede l'ulteriore potenziamento di tale apparato, con l'acquisto di un nuovo attuatore da 1000 kN e 1000 mm di corsa. Per quanto riguarda gli altri task, le attività relative alla sperimentazione saranno essenzialmente preparatorie per l'effettuazione delle prove del secondo anno, con la progettazione dei modelli (telai in c.a. per il task 1 e pile da ponte per il task 3) e la realizzazione dei primi modelli di pila da ponte.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Aiken I. D. and Kelly J. M. (1990). Earthquake Simulator Testing and Analytical Studies of Two Energy-Absorbing Systems for Multistory Structures. Report No. EERC-90/03, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
- ATC (1993). Proceedings of Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control, Report No. ATC-17-1, Applied Technology Council, Redwood City, California.
- Bergman D. M. and Hanson R. D. (1993). Viscoelastic Mechanical Damping Devices at Real Earthquake Displacements. Earthquake Spectra, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California, Vol. 9, No. 3, pp. 389–412.
- Bondonet G. and Filiatrault A. (1997). Frictional Response of PTFE sliding bearings at high frequencies. Journal of Bridge Engineering, 2 (4), 139-148.
- Braga F. and D'Anzi P. (1994). Steel braces with energy absorbing devices: a design method to retrofit reinforced concrete existing buildings. Proceedings of the Italian-french symposium on Strengthening and repair of structures in seismic area, Nizza.
- Braga F., Crewe A., D'Anzi P., Dolce M. and Ponzo F. C. (2002). Experimental and Numerical Behaviour of R/C Building Frames Upgraded with Energy Dissipating Braces. European Earthquake Engineering, 1.
- Braga F. e De Carlo G. (2004). Un Metodo di Progetto per l'Adeguamento Sismico di Strutture Esistenti in C.A. mediante Controventi Dissipativi. Atti del XI Congresso Nazionale ANIDIS: L'ingegneria Sismica in Italia, Genova 25-29 gennaio 2004.
- Cardone D., Dolce M., Ponzo F. C. and Valente C. (2000). Manside: Shaking table tests of R/C frames with various passive control systems. 12th World Conference on Earthquake Engineering, paper n. 2271/6/A, Auckland, New Zealand.
- Cardone D., De Canio G., Dolce M., Marnetto R., Moroni C., Nicoletti M., Nigro D., Pizzari A., Ponzo F. C., Renzi E., Santarsiero G. and Spina D. (2003). Comparison of different passive control techniques through shaking table tests. 8th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structure, Yerevan, Armenia, October 6-10, 2003.
- Cardone D., Coelho E., Dolce D. and Ponzo F. C. (2004). Experimental Behaviour of R/C Frames Retrofitted with Dissipating and Re-centring Braces. Journal of Earthquake Engineering, Vol. 8, No. 3 (2004) 361-396.
- CEN, European Committee for Standardisation, (2004), Eurocode 8: Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures. Part 1.2: General rules, seismic actions and rules for buildings. ENV1998-1-2 Vers. 2004.
- CEN, European Committee for Standardisation, TC340 (2004). Antiseismic Devices. Vers. 06-2004.
- CEN, European Committee for Standardisation, (2003), Eurocode 8: Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures. Part 1.1:

- General rules, seismic actions and rules for buildings. ENV1998-1-1 vers. Dicembre 2003.
- Chang K. C., Soong T. T., Oh S. T. and Lai M. L. (1991). Seismic Response of a 2/5 Scale Steel Structure with Added Viscoelastic Dampers. Report No. NCEER-91-0012, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, New York.
- Ciampi V. (1991). Use of energy dissipating devices, based on yielding of steel, for earthquake protection of structures. In: Protezione sismica degli edifici, Ancona.
- Ciampi V., De Angelis M. and Paolacci F. (1993). Sul progetto sismico di controventi dissipativi per la progettazione sismica delle strutture. Atti del VI convegno nazionale: l'Ingegneria sismica in Italia, 1, Perugia.
- Constantinou M. C., Caccese J. and Harris H. G. (1987). Frictional characteristics of Teflon-steel interfaces under dynamic conditions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 15 (6), 751-759.
- Constantinou M. C., Soong T. T. and Dargush G. F. (1998). Passive energy dissipation systems for structural design and retrofit. MCEER - State University of New York at Buffalo.
- Constantinou M. C. and Symans M. D. (1993). Experimental Study of Seismic Response of Buildings with Supplemental Fluid Dampers. *The Structural Design of Tall Buildings*, John Wiley & Sons, New York, New York, Vol. 2, pp. 93–132.
- Dolce M., Cardone D. and Marnetto R. (2000). Implementation and Testing of Passive Control Devices Based on Shape Memory Alloys. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 29 (7), 945-968.
- Dolce M., Cardone D. and Ponzo F. C. (2001). Retrofitting of R/C framed structures through SMA-based energy dissipating and re-centering braces. 7th International Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibrations of Structures – Assisi, Italia – 2-5 Ottobre.
- Dolce M., Cardone D., Marnetto R., Nigro D. and Palermo G. (2003a). A new added damping rubber isolator (ADRI): experimental tests and numerical simulations. Proc. 8th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Yerevan, Armenia, 2003.
- Dolce M., Cardone D. and Croatto F. (2004a). Frictional Behaviour of Steel-PTFE Interfaces for Seismic Isolation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, Kluwer, Volume 3, N. 1, 2004.
- Dolce M. e Santarsiero G. (2004b). Stato dell'applicazione delle tecniche di isolamento sismico in Italia ed all'estero: aspetti normativi. XI Congresso Nazionale L'Ingegneria Sismica in Italia, Genova, 2004.
- Dolce M. and Santarsiero G. (2004c). Development of Regulations for Seismic Isolation and Passive Energy Dissipation of Buildings and Bridges in Italy and Europe. Proc. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004, Paper No. 2991.
- Dolce M., Cardone D., Marnetto R., Mucciarelli M., Nigro D., Ponzo F. C. and Santarsiero G. (2004d). Experimental static and dynamic response of a real r/c frame upgraded with SMA re-centering and dissipating braces. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, Paper No. 2878.
- Dolce M., Martelli A. and Panza G. (2005a). *Proteggersi dal terremoto: le moderne tecnologie e metodologie e la nuova normativa sismica*. 2a edizione, 21° Secolo Editore.
- Dolce M., Cardone D., Ponzo F. C. and Valente C. (2005b). Shaking Table Tests On Reinforced Concrete Frames Without and With Passive Control Systems. *Int. Journ. of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Volume 34, Issue 14, Pages 1687-1717.
- Eisenberg J.M., Smirnov V.I. and Uzdin A.M. (1997). Progress in application and development rules for base isolation and passive energy dissipation of civil buildings, bridges and nuclear reactors in the Russian Federation. International Post-Smirt Conference Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Seismic Vibration of Structures. Taormina, Italy.
- FEMA 274, (1997). NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings. Federal Emergency Management Agency Publication, U.S.A., 274.
- FEMA – ASCE 356 (2000). Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings. Federal Emergency Management Agency and American society of civil engineering, Washington, DC, 2000.
- Filiatrault A. and Cherry S. (1990). A simplified seismic design procedure for friction damped structures. *Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, 3, Palm Springs.
- Filiatrault A. and Cherry S. (1990). Seismic design spectra for friction damped structures. *Journal of Structural Engineering*, 116/5, 1334-1355.
- Grigorian C. E. and Popov E. P. (1994). Energy Dissipation with Slotted Bolted Connections. Report No. UCB/EERC-94/02, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
- Hanson R. D. et al. (1993). State of the art and state of the practice in seismic energy dissipation. Proc. Of the ATC-17-1 Seminar, San Francisco, California, 1993.
- Housner G. W. et al. (1998). Structural control: past, present and future. *Journal of Engineering Mechanics-ASCE*, 123 (9), 897-971.
- Hwang J. S., Chang K. C. and Lee G. C. (1990). Quasi-static and dynamic sliding characteristics of Teflon-stainless steel interfaces. *Journal of Structural Engineering-ASCE*, 116 (10), 2747-2762.
- ICC 2000, International Code Council, IBC International Building Code, Section 1623. Seismically Isolated Structures.
- Kasai K., Munshi J. A., Lai M. L. and Maison B. F. (1993). Viscoelastic Damper Hysteretic Model: Theory, Experiment, and Application. *Proceedings: Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control*, Applied Technology Council Report No. ATC-17-1, Redwood City, California.
- Kelly J. M. and Quiroz E. (1992). Mechanical Characteristics of Neoprene Isolation Bearings. Report N. UCB/EERC-92/11, Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, CA.
- Kelly T. E. (1992). Skellerup Industries Lead Rubber Isolation Bearings: Experimental Properties. Holmes Consulting Group Ltd.
- Li C. and Reinhorn A. M. (1995). Experimental Study and Analytical Investigation of Seismic Retrofit of Structures with Supplemental Damping: Part II - Friction Devices. Report No. NCEER-95-0009, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, New York.
- Martelli A. and Forni M. (2003). Design rules and guidelines for structures provided with passive control systems of seismic vibrations applied or proposed in Armenia, Chile, France, Italy, Japan, Mexico, P.R. China, Russian Federation, USA. *Anti-Seismic Systems International Society - ASSISi*, Technical Report No. A/03-01, Bologna.
- Mezzi M. (2003). Guidelines for seismic isolation in Italy, Usa, China. Comparison of provisions and outcome on design. 8th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Yerevan, Armenia, October 6-10, 2003.
- Ministero delle Infrastrutture e Trasporti, Norme tecniche per le costruzioni, D.M. 14 settembre 2005.
- Morgan T. A. and Whittaker A. S. (2001). Cyclic Behavior of High Damping Rubber Bearings. Proc. 5th World Congress on Joints, Bearings and Seismic Systems for Concrete Structures, Rome, Italy, 2001.
- Naeim F. and Kelly J. M. (1999). Design of seismic isolated structures. John Wiley & Sons Ltd.
- Presidente del Consiglio dei Ministri, Ordinanza No. 3274 (2003). Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e normative tecniche per le costruzioni in zona sismica. Roma, 20 Marzo 2003.

- Presidente del Consiglio dei Ministri, Ordinanza No. 3431 (2005). Ulteriori modifiche ed integrazioni all'Ordinanza del PCM n. 3274 del 20.03.2003. Roma, 3 Maggio 2005.
- Reinhorn K.L., Li C. and Constantinou M.C. (1995). Experimental and Analytical Investigation of Seismic Retrofit of Structures with Supplemental Damping. Technical Report NCEEC-95-0001, National Center for earthquake Engineering Research, Buffalo, NY.
- Robinson W. H. (1982). Lead-Rubber Hysteretic Bearings suitable for protecting structures during earthquakes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 10 (4), 593-604.
- Serino G. and Spizzuoco M. (2002). Modelling magnetorheological dampers for the seismic protection of buildings and bridges. 12th European Conference on Earthquake Engineering, London, UK, September 9-13.
- Soong T. T. and Constantinou M. C. (1994). *Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering*. Springer-Verlag, Wien-New York.
- Soong T. T. and Dargush G. F. (1997). *Passive energy dissipation systems in structural engineering*. John Wiley & Sons Ltd.
- Tyler R. G. (1977). Dynamic Tests on PTFE Sliding Layers under Earthquake Conditions. *Bull. New Zealand National Society of Earthquake Engineering*, 10 (3), 129-138.
- Vulcano A. e Guzzo-Foliaro G. (1993). Criteri progettuali di strutture intelaiate con controventi dissipativi. *Atti del VI convegno nazionale: l'Ingegneria sismica in Italia*, Perugia.
- Whittaker A. S., Bertero V., Alonso J. and Thompson C. (1989). Earthquake Simulator Testing of Steel Plates Added Damping and Stiffness Elements. Technical Report EERC-89/02, University of California, Berkeley, CA.
- Yang T. S. and Popov E. P. (1995). Experimental and Analytical Studies of Steel Connections and Energy Dissipators. Report No. UCB/EERC-95/13, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.

2 Contributo dell'Unità di Ricerca c/o Univ. di Napoli Federico II (R2_UNINA_Se - Resp.: Serino)

Titolo specifico del programma svolto dall'Unità di Ricerca: Metodologie di progettazione per edifici e ponti con dispositivi viscosi e di strutture isolate leggere.

2.1 Sviluppo di metodologie di progetto dei dissipatori

Il primo obiettivo dell'Unità di Ricerca UNINA_Se è lo sviluppo di una metodologia di progetto di dissipatori a comportamento viscoso e visco-elastico previsti nel progetto di una nuova struttura (edificio o ponte) e nell'adeguamento di una struttura esistente. A tale aspetto è strettamente connesso lo sviluppo di metodologie di prova ed indicazioni normative per i su citati dispositivi.

Durante gli ultimi anni, sono stati fatti dei grossi passi in avanti nello sviluppo e nella costruzione di dispositivi di dissipazione, e nella loro caratterizzazione analitica e sperimentale, mentre sono ancora molto lenti i progressi relativi alla stesura di norme di progetto [Soong and Spencer 2002]. Infatti, sebbene l'adozione di dispositivi di smorzamento supplementare per la protezione sismica di edifici e ponti non sia una novità nell'ingegneria sismica, non esiste una chiara metodologia di progetto per la determinazione delle proprietà meccaniche da assegnare ai dispositivi. Comunque alcuni autori hanno affrontato il problema e proposto alcune procedure di progetto [Ciampi et al. 1993, Serino 1994a].

Un metodo iterativo di progetto di smorzatori viscosi a fluido incorporati nei controventi di una struttura intelaiata in acciaio è stato presentato da Chiarugi et al. [Chiarugi et al. 2000]. Tale metodo consiste nell'assegnare ai dispositivi ad ogni iterazione la capacità di dissipare un'aliquota predefinita dell'energia totale in input, calcolata ad ogni piano del telaio da progettare o adeguare.

Hanson e Soong forniscono ai progettisti alcuni concetti di base della tecnologia di dissipazione di energia nella monografia pubblicata da EERI nel 2001 [Hanson and Soong 2001]. Gli autori presentano due esempi di progetto di strutture con dissipatori di tipo visco-elastico e ad attrito. La procedura di progetto è un processo iterativo: nel primo step viene realizzata un'analisi della struttura, nel secondo step viene calcolato il rapporto di smorzamento globale desiderato, nel terzo step sono selezionate le posizioni ottimali dove installare i dissipatori, nel quarto step sono calcolati lo smorzamento e la rigidità indotti dai dispositivi, nel quinto step sono ricavati i rapporti di smorzamento modale equivalenti, le rigidità e le forme modali della struttura controllata, nel sesto step è realizzata l'analisi della struttura controllata. Quando il quinto e sesto step soddisfano i rapporti di smorzamento desiderati e i criteri di performance della struttura, il progetto è completo, altrimenti deve essere realizzato un nuovo ciclo di progetto che può portare a nuove caratteristiche strutturali, posizioni dei dissipatori e proprietà dei dispositivi.

Per quanto riguarda le normative redatte per l'uso di dispositivi di dissipazione di energia, nel 1993 l'"Energy Dissipation Working Group" (EDWG) del "Base Isolation Subcommittee of the Structural Engineers Association of Northern California" (SEAONC) cercò di fornire delle linee guida attraverso la stesura di un documento contenente indicazioni progettuali applicabili ad un'ampia gamma di sistemi hardware per confermare i parametri utilizzati nel processo di progetto [Whittaker et al. 1993]: la filosofia generale del documento consisteva nel concentrare la deformazione anelastica principalmente nei dissipatori, laddove gli elementi strutturali si comportano elasticamente sotto l'azione di un sisma. Un approccio più semplice è stato descritto nell'Appendice al Capitolo 13 delle Norme [FEMA 368 2000]: esso fornisce alcuni criteri di progetto degli elementi che appartengono al sistema di dissipazione di energia e degli elementi indipendenti da tale

sistema. Nelle FEMA 368 il coefficiente di smorzamento effettivo della struttura è considerato come combinazione dello smorzamento proprio del materiale che costituisce il sistema strutturale, lo smorzamento viscoso equivalente dei dispositivi di dissipazione, e lo smorzamento isteretico non-lineare del sistema strutturale. Il primo dipende dal tipo di materiale strutturale e non dovrebbe essere superiore al 5% dello smorzamento critico, il terzo corrisponde alle sole deformazioni isteretiche anelastiche del sistema resistente al sisma, e il secondo è calcolato per dispositivi dipendenti dallo spostamento, considerando solo l'energia dissipata in corrispondenza degli spostamenti minori o uguali di quelli corrispondenti allo snervamento del sistema strutturale. Ciò significa che la dissipazione di energia nei dispositivi dopo che la struttura ha raggiunto lo snervamento può essere trascurata rispetto alla dissipazione di energia della struttura.

In [Serino and Spizzuoco 2002] è esposta una metodologia per la valutazione dei valori ottimali da assegnare ai parametri di smorzamento e rigidità dei controventi dissipativi di un modello di telaio controventato, laddove lo smorzamento dipende dalle caratteristiche meccaniche dei dispositivi di controllo passivo installati tra i controventi e la struttura. Sono stati proposti semplici spettri di progetto ottenuti determinando analiticamente la risposta nel dominio delle frequenze della struttura soggetta ad un moto armonico alla base, e calcolando il valore ottimale dei parametri di smorzamento viscoso, al variare della rigidità relativa telaio/controvento. Nel caso di input sismici, è stato dimostrato che i parametri ottimali determinati numericamente sono differenti per sismi con caratteristiche diverse ma abbastanza prossimi al valore fornito dallo spettro di progetto.

Nel caso di un ponte, il sistema di isolamento, caratterizzato da appoggi elastomerici e dispositivi di dissipazione viscosi passivi installati tra le pile e l'impalcato, può essere dimensionato utilizzando un analogo approccio analitico. Viene proposta in [Paolacci and Serino 2002] una semplice procedura di progetto allo scopo di determinare il valore ottimale del parametro di smorzamento da assegnare ai dispositivi. L'adeguatezza del procedimento è verificata attraverso l'analisi della risposta di un ponte soggetto a input sismici naturali.

2.2 Studio sull'instabilità degli isolatori elastomerici armati

Il secondo obiettivo dell'Unità di Ricerca UNINA_Se è lo sviluppo di modelli matematici per la simulazione del comportamento sperimentale di isolatori elastomerici armati e la formulazione di espressioni relative all'instabilità degli isolatori, da inserire nella normativa. Nelle strutture isolate leggere (piccoli edifici, elementi di impianti industriali) la ridotta massa della struttura in elevazione comporta, per assicurare un periodo sufficientemente elevato del sistema isolato, la necessità di adottare isolatori caratterizzati da una notevole deformabilità trasversale, e nella valutazione del carico assiale di progetto dell'isolatore non è possibile trascurare il fenomeno dell'instabilità euleriana, né l'influenza dello sforzo assiale sulla deformabilità trasversale. In [Raithel and Serino 1993], la valutazione del comportamento post-critico degli isolatori in presenza del solo carico assiale e la determinazione dell'influenza dello sforzo normale sulla deformabilità trasversale dell'isolatore, viene affrontato operando attraverso il metodo energetico, pervenendo alle equazioni esatte di equilibrio. Nell'ambito di una teoria linearizzata, ottenuta arrestandosi ai termini del 2° ordine nella teoria energetica generalizzata, completa dei risultati ottenuti da Koh e Kelly [Koh and Kelly 1987], è possibile considerare sia il caso puramente teorico di comportamento elastico lineare, sia quello più realistico di smorzamento isteretico lineare. Assumendo un modello elasto-rigido, in cui le deformabilità tagliante e flessionale vengono concentrate in elementi discreti, si ricava che il comportamento post-critico risulta stabile anche in presenza di grandi deformazioni e a stabilità decrescente al crescere della deformazione a taglio rispetto a quella flessionale. Il legame forza spostamento trasversale risulta non lineare ed a stabilità crescente. In una teoria linearizzata si tiene conto quindi del comportamento dissipativo del materiale elastomerico e si valuta l'influenza dello sforzo assiale sull'energia dissipata in un ciclo e sul fattore di smorzamento complessivo del dispositivo. Operando in una teoria del secondo ordine, ottenuta considerando i termini fino al 4° grado nelle funzioni che definiscono la deformata, e assumendo un modello continuo, in cui le deformabilità tagliante e flessionale risultano diffuse come in un concio di trave piana, è possibile determinare l'espressione del carico critico V_{cr} [Serino et al. 1994] in accordo con quello determinato con il modello elasto-rigido. L'affidabilità delle espressioni analitiche ricavate viene confermata da alcuni confronti con i risultati sperimentali.

In [Serino 1994b] sono riportati i risultati di prove realizzate su una miscela (denominata SISMI 60) e su una miscela di nuova produzione (S950) caratterizzata da una maggiore deformabilità a taglio: l'affidabilità del modello continuo nel prevedere la rigidità a taglio della gomma è la stessa per entrambe le mescole, mentre per l'energia dissipata in un ciclo e per il rapporto di smorzamento viscoso equivalente si ottengono nel caso della miscela S950 valori analitici con scarti percentuali maggiori dei risultati sperimentali, rispetto alla miscela SISMI 60. L'adozione di un modello isteretico per l'elastomero, sia esso elasto-rigido oppure continuo, può essere considerato soddisfacente ai fini applicativi, seppure comporta una sovrastima dell'energia dissipata per unità di volume e del modulo di taglio dell'elastomero all'aumentare della velocità

di applicazione del carico, a causa di un pur limitato comportamento viscoso del materiale. Non a caso, i valori analitici della rigidità e dell'energia dissipata ottenuti attraverso il modello isteretico continuo proposto risultano intermedi tra quelli sperimentali relativi alle prove quasi statiche e quelli relativi alle prove dinamiche.

2.3 Analisi delle potenzialità dei dispositivi di tipo Wire-Rope

Il terzo obiettivo dell'Unità di Ricerca UNINA_Se è lo sviluppo di modelli matematici per la simulazione del comportamento sperimentale di dispositivi di tipo wire-rope e l'individuazione di una metodologia di progetto per strutture leggere dotate di tali dispositivi.

I dispositivi wire-rope sono costituiti da un unico cavo a trefoli in acciaio inox avvolto ad elica e trattenuto da due morsetti di acciaio di sezione quadrata disposti parallelamente all'asse della spirale: la flessibilità del cavo conferisce proprietà di isolamento dalle vibrazioni in tutte le direzioni mentre lo sfregamento fra i trefoli gli conferisce capacità dissipativa. Questi sistemi sono particolarmente idonei per l'isolamento di strutture leggere.

Per valutare le risposte al sisma di una struttura a base fissa e a base isolata, sono state condotte una serie di analisi numeriche, adottando differenti accelerogrammi in opportuna scala, in accordo con le procedure proposte da Shome et al., e un semplice modello della struttura [Demetriades et al. 1993]. La sperimentazione realizzata sui dispositivi ha permesso di caratterizzare il comportamento ciclico degli isolatori per le diverse sollecitazioni (trazione-compressione, shear, roll) [Di Donna and Serino 2002, Paolacci e Giannini 2004]. Le prove di trazione-compressione hanno evidenziato una marcata asimmetria di comportamento per elevati valori dello spostamento ed una certa variabilità nella forma del ciclo. Il comportamento ciclico a trazione-compressione è stato riprodotto con il modello classico Buoc-Wen modificato, che riproduce una simile asimmetria [Wen 1976]. Le prove di taglio hanno evidenziato un comportamento ciclico simmetrico nelle due direzioni esaminate e una moderata riduzione della rigidità trasversale con il numero dei cicli: questo comportamento può essere ben rappresentato dal modello isteretico Buoc-Wen. Dal momento che si è visto che quest'effetto diminuisce quando si ripete più volte la prova, è consigliabile adoperare isolatori già assestati.

2.4 Attività previste nel secondo semestre

Le attività programmate dall'UR UNINA_Se nel corso del primo anno del progetto riguardano i primi 5 Task della linea di ricerca 7. Nel primo semestre è stata svolta l'attività relativa al Task 1 (Stato dell'arte), nel secondo semestre sono previste le seguenti attività:

- Nell'ambito del Task 2 (Progetto dissipatori viscosi), partendo dall'analisi dello stato dell'arte e dai risultati ottenuti dalla stessa UR negli ultimi anni, si prevede di fornire una chiara metodologia di progetto di dissipatori a comportamento viscoso, visco-elastico ed elasto-plastico per edifici e ponti.
- Nell'ambito del Task 3 (Prove dissipatori viscosi e strutture), si prevede di realizzare alcune prove sui dispositivi viscosi, e di programmare le prove sperimentali da realizzare successivamente sui modelli di strutture, selezionati nell'ambito del progetto, dotate di tali dispositivi.
- Nell'ambito del Task 4 (Modelli e progetto *wire-rope*), partendo dallo stato dell'arte, si prevede di sviluppare modelli matematici capaci di fornire una buona interpretazione del comportamento sperimentale dei dispositivi di tipo *wire-rope*, e di realizzare alcune prove su tali dispositivi, utilizzando un'attrezzatura di prova recentemente acquisita dall'UR e opportunamente predisposta per prove di questo tipo.
- Nell'ambito del Task 5 (Modelli instabilità isolatori), partendo dallo stato dell'arte, si prevede di mettere a punto alcuni modelli matematici, più o meno sofisticati, che siano in grado di simulare il comportamento sperimentale degli isolatori elastomerici armati, e di coordinarsi con le altre UR per le tipologie di prova da realizzare su tali dispositivi.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Ciampi V., De Angelis M. e Paolacci F. (1993). Sul Progetto sismico di controventi dissipativi per la protezione sismica della strutture. VI Congresso Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia", Perugia, 13-15 ottobre.
- Chiarugi A., Terenzi G. and Sorace S. (2000). Effectiveness of viscous damped bracing systems for steel structures. Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas, STESSA 2000. Montreal, Canada, 379-385.
- Demetriades G. F., Constantinou M. C. and Reinhorn A. M. (1993). Study of Wire-Rope Systems for seismic protection of equipment in Buildings. Engineering Structures, Vol. 15, N.15.
- Di Donna M. and Serino G. (2002). Base Isolation of High Voltage Equipment: Comparison between Two Different Solutions. 12th ECEE. Elsevier, Oxford, UK.
- FEMA 368, (2000). NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures. Washington, DC.
- Hanson R. D. and Soong T. T. (2001). Seismic design with supplemental energy dissipation devices. Monograph Series MNO-8, Earthquake Engineering Research Institute.
- Koh C. G. and Kelly J. M. (1987). Effects of Axial Load on elastomeris Isolation Bearings. Report No. UCB/EERC-86/12, Earthquake

- Engineering Research Center, University of California, Berkeley. California, November 1987.
- Paolacci F. and Serino G. (2002). Optimal design of passive energy dissipation systems for seismic protection of concrete bridges. Fifth World Congress on Joints, Bearings and Seismic Systems for Concrete Structures, Roma.
- Paolacci F. e Giannini R. (2004). Studio dell'efficacia di ammortizzatori a cavo metallico per la protezione sismica di apparecchiature elettriche. XI Congresso Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia", Genova.
- Raithel A. and Serino G. (1993). Stabilità e comportamento post-critico degli isolatori elastomerici armati. 6° Convegno ANIDIS, Perugia.
- Serino G., Raithel a. and Augenti N. (1994). Comportamento meccanico degli appoggi elastomerici armati: modelli teorici e confronti sperimentali. XXIII Convegno AIAS. Rende.
- Serino G. (1994a). Design methodologies for energy dissipation devices to improve seismic performance of steel buildings: Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas, STESSA '94. Timisoara, Romania, 26 June-1 July, 703-713.
- Serino G. (1994b). Modelli per al determinazione delle proprietà meccaniche degli isolatori elastomerici armati. Convenzione di ricerca con ENEL/DSR/CRIS, Rapporto Tecnico fase 1/94, Napoli.
- Serino G. and Spizzuoco M. (2002). About the design of passive and semi-active MR dampers for seismic protection of buildings. 12th ECEE. Elsevier, Oxford, UK.
- Soong T. T. and Spencer B. F. (2002). Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice. Engineering Structures 24 (243-259).
- Wen Y. (1976). Method for random vibration of hysteretic system. Journal of the Engineering Mechanical Division, Proceeding ASCE, Vol. 102, N. EM2.
- Whittaker A. S., Aiken I., Bergman P., Clark J., Cohen J., Kelly J. M. and Scholl R. E. (1993). Code requirements for the design and implementation of passive energy dissipation systems. Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control. San Francisco, California, 497-508.

3 Contributo dell'Unità di Ricerca c/o Univ. di Napoli Federico II (R3_UNINA_DL - Resp.: De Luca)

Titolo specifico del programma svolto dall'Unità di Ricerca: *Isolamento sismico di edifici di interesse storico-monumentale.*

3.1 Stato dell'arte sull'applicazione dell'isolamento sismico a strutture monumentali

L'isolamento alla base (BIS), che si delinea come una tecnica di protezione sismica ormai matura [De Luca and Mele 1997a, Kelly 1996], ha recentemente interessato il settore del restauro e adeguamento di edifici esistenti, con particolare riferimento a quelli di valore storico-monumentale [Buckle et al. 1995]. Infatti il BIS consente di mediare le opposte esigenze che si configurano nella protezione sismica dell'edilizia monumentale, ovvero sicurezza strutturale e conservazione architettonica. Tale applicazione si è rapidamente diffusa negli USA, e molti interventi di restauro tramite BIS attualmente completati o in fase di realizzazione, costituiscono opere di rilevante impegno, sia economico che strutturale [Allen and Bailey 1987, De Luca and 1996, Naaseh 1995, Youssef et al. 1995a].

Nell'ambito del Progetto Finalizzato Beni Culturali CNR il responsabile della UR ha sviluppato un'ampia ricerca su "La Protezione di Edifici Monumentali in Aree Sismiche Attraverso l'Isolamento alla Base", in cui, al fine di valutare la trasferibilità dell'esperienza nordamericana al caso italiano, è stato effettuato uno studio approfondito dei progetti di restauro tramite BIS realizzati in USA, individuando le principali problematiche che emergono in tali applicazioni, ovvero: livello di sicurezza sismica da conferire all'edificio; necessità di interventi in elevazione; interazione tra interventi alla base ed in elevazione; definizione dei parametri di confronto tra soluzioni strutturali convenzionali e soluzione BIS; sequenza di fasi costruttive; procedura per l'installazione dei dispositivi di isolamento [De Luca and Mele 1995, De Luca and Mele 1996]. Tali problematiche sono state analizzate ed approfondite soprattutto con riferimento ai 4 progetti più significativi realizzati in USA, ovvero: Salt Lake City and County Building, Oakland City Hall, San Francisco City Hall, Los Angeles City Hall [Elsesser et al. 1991, De Luca and Mele 1996, Bailey and Allen 1988, Youssef et al. 1995b], per i quali è stata anche definita e compilata una scheda per l'analisi comparativa [Mele and De Luca 1997, De Luca and Mele 1997b].

L'esame dei progetti statunitensi ha anche consentito di individuare la strategia di modellazione ed analisi strutturale adottata per lo studio degli edifici esistenti isolati alla base. I risultati di tali indagini, peraltro confortate dai risultati dell'attività di ricerca sviluppata dai componenti dell'unità di ricerca sulla modellazione delle strutture isolate alla base [Mele et al. 1996, Mele et al. 1997], ha consentito di definire alcune linee generali riguardanti la modellazione e l'analisi degli edifici monumentali con BIS: (a) Necessità di raffinate modellazioni delle strutture murarie degli edifici per analisi dinamiche nonlineari dei singoli componenti strutturali e del complesso strutturale "a base fissa", al fine di definire in maniera attendibile la capacità sismica di tali edifici. (b) Analisi dinamica del complesso strutturale isolato alla base con modelli elastici lineari per la parte in elevazione e modelli lineari o nonlineari per il sistema di isolamento.

Nella ricerca in esame si prendono in considerazione varie tipologie edilizie in muratura di interesse storico-monumentale, suddivise in due grandi categorie, ovvero gli edifici ecclesiastici, che costituiscono l'80% del

patrimonio monumentale italiano, e gli edifici in muratura di carattere monumentale ad uno o più piani, con lo scopo di studiare in maniera comparativa l'efficacia del BIS e di interventi più tradizionali (inserimento di impalcati rigidi, impiego di catene e cordoli in c.a., etc.).

La scelta degli edifici ecclesiastici scaturisce essenzialmente dalle seguenti considerazioni: (a) le chiese presentano una elevata vulnerabilità alle azioni sismiche, come dimostrato nel recente terremoto Umbro-Marchigiano [Lagomarsino 1998, Lagomarsino and Podestà 1999, Lagomarsino et al. 1999]; (b) le chiese risultano largamente diffuse nel patrimonio monumentale italiano; (c) le chiese presentano configurazioni geometrico-morfologiche e schemi strutturali ripetitivi, che suggeriscono la possibilità di estendere i risultati di studi effettuati su un numero limitato di esempi ad una ampia casistica. Per le ragioni suddette, proprio in seguito ai recenti terremoti, si è assistito in Italia ad un rinnovato interesse verso la valutazione del comportamento sismico degli edifici ecclesiastici [Mele et al. 1996, Mele et al. 1997, Cocina et al. 1999, D'Ayala 2000, Ciampoli and Giovenale 1999]. In tali studi generalmente viene proposta un'analisi tramite la scomposizione dell'edificio in macro-elementi [Dogliosi et al. 1994], che consente di individuare le zone critiche dell'edificio e di valutare conseguentemente il livello di vulnerabilità sismica del complesso strutturale [D'Ayala 2000, Ciampoli and Giovenale 1999, Dogliosi et al. 1994].

Il progetto proposto utilizza come base di partenza sia gli studi condotti da altri ricercatori, sopra brevemente richiamati, sia le ricerche condotte dal responsabile dell'UR (che è stato coordinatore nazionale di due PRIN biennali, cofinanziati per gli anni 1997-1998 e 2000-2002 sulla Protezione Sismica dell'Edilizia e di Nuova Edificazione Attraverso Sistemi Innovativi), su problematiche specifiche dell'applicazione del BIS per l'adeguamento sismico di chiese in muratura. In tali ricerche, con riferimento ad un caso di studio (una chiesa a tre navate) si è analizzato il comportamento statico e dinamico dell'edificio nello stato attuale, con l'obiettivo di definirne la capacità sismica e valutare quantitativamente i benefici ottenibili tramite l'introduzione del BIS [Mele et al. 1998, De Luca et al. 1999a]. Tale studio ha richiesto la preliminare definizione di una procedura di analisi semplificata, articolata in tre passi: step-1: analisi lineare dell'intero edificio sia in campo statico che dinamico, per derivare la richiesta di resistenza elastica sui singoli macro-elementi costituenti l'edificio; step-2: analisi nonlineari agli elementi finiti ed analisi limite dei singoli macro-elementi, per definirne il comportamento nonlineare e la capacità di resistenza [Mele et al. 1999a]; step-3: confronto richiesta di resistenza elastica - capacità di resistenza ultima per ciascun macro-elemento strutturale e verifica dell'edificio [Mele et al. 1999b].

I risultati ottenuti con riferimento al caso di studio hanno confermato l'alta vulnerabilità sismica delle costruzioni di tipologia ecclesiastica ed hanno consentito di valutare gli effetti, non sempre benefici, derivanti da alcuni tipici interventi di consolidamento strutturale (inserimento di diaframmi rigidi) [Mele et al. 1999b, Mele and De Luca 1999]. Inoltre si è effettuato un confronto tra l'edificio "a base fissa" ed a seguito dell'introduzione del BIS, che ha consentito di delineare alcune conclusioni: la struttura a base fissa evidenzia un comportamento dinamico particolarmente complesso [Mele et al. 1998, Mele et al. 1999b]; peraltro la struttura a base isolata mette in luce la possibilità di ottenere tramite un'opportuna progettazione del BIS un comportamento dinamico molto più "semplice" [Mele et al. 1998, Mele et al. 1999b]; il confronto ha evidenziato riduzioni delle deformazioni e della richiesta di resistenza nei diversi elementi strutturali tali da mantenere la chiesa praticamente in campo elastico. Tali risultati, sebbene ottenuti da uno screening preliminare del problema e da analisi basate su ipotesi semplificative, appaiono incoraggianti e suggeriscono che l'isolamento può effettivamente delinearsi come strategia di protezione sismica per le chiese di valore storico-monumentale.

Una conferma delle potenzialità del BIS nell'applicazione ai beni monumentali è stata ottenuta anche tramite una campagna di prove pseudo-dinamiche recentemente effettuate su un modello in scala reale di un sotto-assemblaggio del monastero San Vincente de Fora, dotato di un sistema di isolamento sismico. Il modello consiste di una successione di archi e colonne in muratura e rappresenta un elemento architettonico-strutturale molto ricorrente negli edifici monumentali, in particolare nelle chiese. Le prove sono state realizzate presso l'ELSA del JRC ad Ispra. I risultati sperimentali, valutati assumendo come termine di confronto gli analoghi risultati ottenuti sul campione "a base fissa", hanno consentito di quantificare i benefici conseguibili tramite l'isolamento, ovvero: riduzione degli spostamenti nella parete muraria (fino a 24 volte minori rispetto alla struttura a base fissa), riduzione delle forze (fino a 15 volte minori), assenza di fessurazioni e danneggiamenti che invece si erano ampiamente sviluppati nel modello a base fissa [De Luca et al. 1999b, De Luca et al. 1999c, De Luca et al. 1999d].

Dall'analisi delle applicazioni dell'isolamento già realizzate e dall'esame delle caratteristiche morfologico-strutturali degli edifici storici oggetto della ricerca in esame è emerso che restano da risolvere ancora alcuni aspetti specifici, sia progettuali che costruttivi, correlati alla peculiarità di tali costruzioni monumentali ed alle caratteristiche prestazionali richieste al sistema di isolamento sismico in tali applicazioni.

In particolare si sono evidenziati i seguenti aspetti sui quali occorre procedere ad un ulteriore approfondimento, nel corso della ricerca, oltre a quanto già definito nel programma:

1. definizione di una procedura progettuale ad hoc per il dimensionamento dei dispositivi di isolamento, in grado di ottimizzare diverse esigenze contrastanti, ovvero: tasso di lavoro per carico verticale sui dispositivi contenuto entro un range limitato (6-9 MPa); fattore di forma primario dei dispositivi superiore a 18; fattore di forma secondario dei dispositivi superiore a 3-4; rigidezza orizzontale complessiva del sistema di isolamento tale da consentire il raggiungimento del periodo di isolamento target (2.5-3.5 sec), definito in maniera da rendere le richieste di resistenza confrontabili o inferiori alla capacità della parte in elevazione; rigidezze orizzontali dei singoli dispositivi distribuite in maniera simmetrica rispetto alle masse della parte in elevazione; variazione dello sforzo assiale sui dispositivi per effetto delle azioni sismiche contenuto in un range limitato (+/- 30% del valore per carico verticale); adeguata distanza dal carico critico (maggiore o uguale a 2).
2. definizione e risoluzione delle problematiche progettuali di cui sopra in presenza di edifici di massa ridotta (piccole chiese o palazzi storici di limitata estensione), per i quali può risultare particolarmente difficile, con una procedura standard e con dispositivi usuali, raggiungere periodi di isolamento elevati (2.3-3.5 sec).
3. valutazione del comportamento della struttura isolata in presenza ed in assenza di impalcato rigido disposto in corrispondenza del sistema di isolamento, al variare di morfologia e tipologia strutturale dell'edificio. La valutazione delle differenze di comportamento in questi due casi emerge dalla considerazione che in molti edifici di interesse storico monumentale la realizzazione di un impalcato rigido in testa ai dispositivi di isolamento può rivelarsi particolarmente problematico per la presenza di elementi di interesse artistico.

3.2 Attività previste nel secondo semestre

Nel secondo semestre del primo anno si prevede di sviluppare i seguenti punti:

1. Individuazione di un campione significativo di edifici ecclesiastici di interesse storico-monumentale, reperimento per ciascuno di essi di notizie storiche, documentazione grafica/fotografica, caratteristiche geometrico-dimensionali, proprietà dei materiali, eventuale stato di danneggiamento, eventuali interventi di restauro architettonico e/o strutturale.
2. Analisi tipologica degli edifici selezionati e dei singoli macro-elementi, consistente nell'esame delle caratteristiche geometrico-dimensionali dell'edificio nel suo complesso e dei singoli macro-elementi, e nella definizione e caratterizzazione dei rapporti geometrico-dimensionali, al fine di valutare la possibilità di parametrizzazione e di definizione di un range di variazione degli stessi.
3. Individuazione degli aspetti tipologico-strutturali responsabili della vulnerabilità sismica, spesso evidenziata da tali edifici in occasione dei terremoti.
4. Analisi strutturali statiche e dinamiche, in campo lineare e non lineare, di alcuni edifici selezionati nell'ambito del campione (in base a dimensioni, valore storico-monumentale, morfologia e geometria, localizzazione) orientate alla valutazione delle proprietà strutturali e delle caratteristiche dinamiche di ciascun edificio nel suo complesso e dei singoli macro-elementi, del comportamento sotto carichi orizzontali crescenti, sia nel piano che fuori dal piano, ed alla stima delle capacità di resistenza e deformazione ultima, in modo da pervenire a metodi di tipo speditivo di valutazione della capacità sismica.
5. Definizione delle caratteristiche prestazionali dei dispositivi da isolamento sismico da impiegare nell'adeguamento sismico di edifici di interesse storico-monumentale (leggerezza, durabilità, elevata capacità deformativa), tenendo conto dei problemi di eventuali costruzioni in adiacenza e dei relativi giunti, di compatibilità e reversibilità dei sistemi da inserire in fondazione.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Allen E. W. and Bailey J. S. (1987). Seismic isolation retrofitting of the Salt Lake City & County Building. Proc. of Joint USA-Italy Workshop on Evaluation and Retrofit of Masonry Structures, 63-92.
- Bailey J. S. and Allen E. W. (1988). Massive Resistance, Civil Engineering, ASCE, Sept.
- Buckle I. G. (1995). Application of base isolation systems to the seismic retrofit of historical buildings in the United States. In: Final Report on the International Workshop on the Use of Rubber-Based Bearings for the Earthquake Protection of Buildings. by James M. Kelly, Report UCB/EERC-95/05, C5-C18.
- Ciampoli M. and Giovenale P. (1999). Sulla valutazione della sicurezza sismica degli edifici monumentali. Atti dell'8° Convegno Nazionale ANIDIS "L'Ingegneria Sismica in Italia", Torino, settembre 1999.
- Cocina S., Lagomarsino S. and Podesta' S. (1999). Analisi di vulnerabilità della facciata nelle chiese di Catania. Atti dell'8° Convegno Nazionale ANIDIS "L'Ingegneria Sismica in Italia", Torino, settembre 1999.
- D'Ayala D. (2000). Establishing correlation between vulnerability and damage survey of churches. Proceedings of 12th WCEE, 12th World Conference of Earthquake Engineering, Auckland, January 2000.
- De Luca A. and Mele E. (1995). L'isolamento sismico nel restauro di edifici storici. Atti del 7° Convegno Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia", Siena, 25-28 settembre, 1995, Vol.3°.
- De Luca A. and Mele E. (1996). The seismic isolation in the retrofit of historic buildings. Proceedings of USA/ITALY Seminar Seismic Restoration of Historic Buildings, Los Angeles, USA, July 1996.
- De Luca A. and Mele E. (1997a). Base isolation and energy dissipation. General Report. In: Behaviour of Steel Structures in Seismic

- Areas - STESSA '97, Kyoto, Japan, August 1997. Edited by F.M. Mazzolani and H. Akiyama, pp. 683-699.
- De Luca A. and Mele E. (1997b). Base isolation for seismic protection of monuments. Proceedings of the International Co-ordination Workshop "Testing and Modelling Innovative Systems for Seismic Response Control of Buildings and Bridges" Naples, May 1996, CUEN October 1997, pp.1-20.
- De Luca A., Giagnuolo C. and Mele E. (1999a). The retrofit of ancient worship buildings through seismic isolation. Proceedings of 2nd International Congress on "Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin", Paris, July, 1999.
- De Luca A., Mele E., Molina J., Verzeletti G. and Pinto A. V. (1999b). Preliminary experimental results on a base isolated subassemblage of a historical building. Proceedings of 2nd International Congress on "Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin", Paris, July, 1999.
- De Luca A., Mele E., Molina J., Verzeletti G. and Pinto A. V. (1999c). Conventional and base isolated historical buildings: comparison of seismic performance through experimental investigation. Atti dell'8° Convegno Nazionale ANIDIS "L'Ingegneria Sismica in Italia", Torino, settembre 1999.
- De Luca A., Mele E., Molina J., Verzeletti G. and Pinto A. V. (1999d). The retrofit of historic buildings through seismic isolation: results of pseudo-dynamic tests on a full scale specimen. Proceedings of 12th WCEE, Eleventh World Conference of Earthquake Engineering, Auckland, January 2000. [1] T.T. Soong, B.F. Spencer Jr. Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice. Engineering Structures 24 (243-259). 2002.
- Dogliani F., Moretti A. and Petrini V. (1994). Le chiese e il terremoto, LINT, Trieste.
- Elsesser E., Naaseh S., Walters M., Sattary V. and Whittaker A. S. (1991). Repair of five historic buildings damaged by the Loma Prieta earthquake. The Seismic Retrofit of Historic Buildings Conference Workbook, San Francisco, California, 4-1 - 4-40.
- Kelly J. M. (1996). Earthquake Resistant Design with Rubber, Springer Verlag, App. A.
- Lagomarsino S. (1998). A new methodology for the post earthquake investigation of ancient churches. Proc. of 11th European Conference of Earthquake Engineering, Balkema.
- Lagomarsino S. and Podestà S. (1999). Metodologie per l'analisi di vulnerabilità delle chiese. Atti dell'8° Convegno Nazionale ANIDIS "L'Ingegneria Sismica in Italia", Torino, settembre 1999.
- Lagomarsino S. et al. (1999). Modelli di calcolo per il miglioramento sismico delle chiese. Atti dell'8° Convegno Nazionale ANIDIS "L'Ingegneria Sismica in Italia", Torino, settembre 1999.
- Mele E., De Luca A. and Ramasco R. (1996). The effect of using different device numerical models on the global nonlinear behaviour of base isolated structures. 11th WCEE, Acapulco, Mexico, Paper No.1541.
- Mele E. and De Luca A. (1997). Seismic strengthening of cultural heritage through base isolation: some case studies. Proceedings of International Conference New Technologies in Structural Engineering, Lisbon, Portugal, July 1997.
- Mele E., De Luca A. and Ramasco R. (1997). Modelling problems in base isolation. Proceedings of the International Co-ordination Workshop "Testing and Modelling Innovative Systems for Seismic Response Control of Buildings and Bridges" Naples, May 1996, CUEN October 1997, pp.48-60.
- Mele E., Modano M. and De Luca A. (1998). The seismic retrofit of historic masonry buildings through BIS: preliminary analysis for application to church typology. MONUMENT '98 Workshop on Seismic Performance of Monuments, Lisbon, Portugal, pp. 269-280.
- Mele E. and De Luca A. (1999). Behaviour and modelling of masonry church buildings in seismic regions, in: Earthquake Resistant Engineering Structures, Ed. G. Oliveto and C.A. Brebbia, WIT, Southampton, UK, pp. 543-552.
- Mele E., Giordano A. and De Luca A. (1999a). Nonlinear analysis of some typical elements of a basilica plan church. in: Earthquake Resistant Engineering Structures, Ed. G. Oliveto and C.A. Brebbia, WIT, Southampton, UK, pp. 533-542.
- Mele E., De Luca A. and Giagnuolo C. (1999b). L'effetto di alcuni interventi di adeguamento sismico sul comportamento di edifici in muratura. Atti dell'8° Convegno Nazionale ANIDIS "L'Ingegneria Sismica in Italia", Torino, settembre 1999.
- Naaseh S. (1995). Seismic retrofit of San Francisco City Hall. The role of masonry and concrete, Proc. of the 3rd National Concrete & Masonry Eng. Conf., San Francisco, California, pp.769-795.
- Youssef N., Nuttall B., Rahman A., Hata O. and Tahtakran O. (1995a). The role of reinforced concrete in the stiffening and strengthening above base isolation for a tall historic landmark: Los Angeles City Hall. Proc. of the 3rd National Concrete & Masonry Engineering Conference, San Francisco, California, 729-740.
- Youssef N., Nuttall B., Rahman A., Hata O. (1995b). Passive control of the Los Angeles City Hall. PVP - Vol. 319, Seismic, Shock and Vibration Isolation, ASME, 241-248.

4 Contributo dell'Unità di Ricerca c/o Univ. di Perugia (E1_UNIPG - Resp.: Parducci)

Titolo specifico del programma svolto dall'Unità di Ricerca: Aspetti progettuali ed architettonici nell'applicazione dell'isolamento sismico.

4.1 Le configurazioni strutturali delle costruzioni resistenti al sisma

E' un annoso problema, fondamentale, ma ancora poco affrontato. Nelle nuove norme (Ordinanza 3274/03) così come nell'Eurocodice 8 compaiono, forse per la prima volta, indicazioni e prescrizioni riguardanti la regolarità strutturale. Questo, è uno degli aspetti del problema, al di fuori del quale esistono ancora molte possibilità di scelta delle configurazioni che possono condurre a risultati molto differenti.

L'argomento è di ampio respiro perché, pur riguardando molti aspetti prettamente ingegneristici, coinvolge anche competenze che con esso non si sono ancora confrontate in modo adeguato e lascia aperti campi di ricerca poco esplorati nei quali c'è spazio per sperimentare nuove idee e per sviluppare nuove concezioni. L'argomento infatti, apre la via verso una ricerca degli aspetti morfologici delle costruzioni resistenti al sisma, riguardanti le competenze degli architetti. La carenza di attenzione è stata denunciata da persone autorevoli perfino nei Paesi più attenti al problema sismico: "E' sorprendente; con tutte le conoscenze acquisite sembra che i giapponesi non abbiano imparato molto sull'importanza della regolare articolazione strutturale ai fini sismici. Molti edifici presentano incongruenze costruttive ed irregolarità così evidenti da non lasciare molti

dubbi sul loro probabile danneggiamento al prossimo terremoto" (R. Reitherman direttore del CUREE " Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering". Vedi "Costruire in Laterizio", N° 56, 1997).

Alcune esperienze sono state già maturate da chi propone un approfondimento della ricerca in alcuni progetti del Nuovo Centro della Protezione Civile in corso di realizzazione a Foligno (la particolare configurazione della cupola principale è stata pubblicata dallo stesso Reitherman nel sito web del CUREE) e della ricerca condotta alcuni anni or sono sulla realizzazione di edifici a struttura sospesa, illustrata in bibliografia (Progetto ESSI), commissionata dall'allora Ministero della Ricerca Scientifica (sebbene quest'ultima non abbia potuto trovare una realizzazione).

4.2 Gli aspetti economici

Il tema di ricerca, pur presentando una sua autonomia, contiene alcuni aspetti collegati con l'argomento precedente. Un numero limitato di studi è stato dedicato finora all'analisi dei problemi economici connessi con le valutazioni progettuali riguardanti la sicurezza sismica. Le analisi si sono rivolte prevalentemente a problemi assicurativi, peraltro poco applicati in ambito sismico. Generalmente, si prescinde da considerazioni riguardanti i valori "intangibili" (vite umane e beni non riproducibili), perché non appare percorribile la via di assegnare loro un valore economico di riferimento. In questo caso si possono valutare i costi marginali dei possibili interventi di protezione, per individuare i criteri di un impiego ottimale delle risorse.

Considerando il problema economico nei suoi aspetti generali, come espressione della potenzialità di intervento delle collettività interessate, le perdite e i danni da terremoto possono essere raggruppati nelle categorie indicate di seguito.

Costi e danni diretti. Corrispondono ai costi da sostenere per la sostituzione dei beni perduti (riparazione delle opere danneggiate e ricostruzione di quelle distrutte o non riparabili).

Perdite e danni indiretti. Corrispondono agli effetti prodotti dalla mancata disponibilità dei beni danneggiati (mancato utile di gestione di attività commerciali, interruzione di attività produttive, interessi passivi, perdite di mercato, mancanza dei servizi, effetti sul turismo, ecc.) e dalle conseguenze sociali nella regione colpita (movimenti di popolazione, disponibilità di manodopera, riduzione delle capacità imprenditoriali, ecc.). Le valutazioni, pur risultando piuttosto incerte a causa della dispersione e della non facile computabilità dei costi, fanno comunque ritenere che i danni indiretti raggiungono in genere valori maggiori di quelli diretti.

Perdite e danni ai valori "intangibili". Riguardano, come si è detto, i valori non riproducibili. Comprendono le perdite di vite umane, le mutilazioni, i ferimenti; ma anche i danni alle opere d'arte ed agli edifici storici e monumentali.

4.3 Redditività degli interventi di protezione sismica

In merito al problema dei costi per la protezione sismica delle costruzioni esistono due differenti punti di vista.

Punto di vista imprenditoriale. Riguarda l'appaltatore, impegnato a realizzare un'opera che deve assicurare un predeterminato livello di protezione sismica, richiesto dal progetto, dalle prescrizioni definite nei capitolati d'appalto e dai requisiti di norma. E' compito del costruttore scegliere appropriati procedimenti costruttivi per assicurare, con il minimo costo d'esecuzione, il raggiungimento degli obiettivi prescritti.

Punto di vista collettivo. Riguarda la comunità che gestisce l'opera o l'Ente pubblico che la gestisce per conto di una collettività, oppure l'intera comunità nazionale che, in qualsiasi modo, deve provvedere alla riparazione ed al ripristino dei beni perduti. In tal caso, oltre al costo di costruzione, si deve valutare il costo atteso (attualizzato) dei probabili interventi di riparazione in relazione ai possibili livelli di protezione sismica prescelti per il progetto del fabbricato, da valutare in funzione della pericolosità sismica dei siti.

Le analisi riguardanti il secondo punto di vista sono governate da problemi non sempre facilmente quantificabili. In ogni caso, richiedono di valutare un rapporto B/C (beneficio/costo), da rendere massimo, relativo alle differenti scelte progettuali, da stimare in funzione di analisi di rischio. Queste analisi devono essere basate su considerazioni probabilistiche nelle quali intervengono vari fattori di aleatorietà. Il denominatore C rappresenta il costo di costruzione dell'opera, valutato al momento della realizzazione; ai fini di queste analisi può essere considerato come un costo certo. Il numeratore B rappresenta un beneficio probabile, da valutare in funzione della sismicità del sito e della vulnerabilità della costruzione correlata al livello che è stato prescelto per definire l'intensità sismica di progetto. Il beneficio deve essere poi attualizzato riportandolo, per confronto, alla stessa epoca della costruzione. Il beneficio deriva sostanzialmente dai maggiori o minori costi attesi per gli interventi di riparazione, che potrebbero essere richiesti in un momento qualsiasi della vita utile dell'opera, tenendo opportunamente conto dei costi indiretti.

Per essere confrontati con il costo di riparazione o di ricostruzione i benefici attesi devono essere attualizzati applicando un appropriato tasso da valutare tenendo conto sia della natura probabilistica del problema, sia della perdita di valore associata all'invecchiamento della costruzione. In un'analisi completa, occorre poi stabilire alcuni criteri idonei a valutare l'incidenza dei danni indiretti, la cui valutazione dipende dagli scenari di danno relativi alla regione in esame.

Le nuove norme sismiche (Ordinanza PCM 3274/03 e successivi aggiornamenti) modificano sostanzialmente i criteri ed i metodi per il progetto delle costruzioni in zona sismica, allo scopo di migliorare le prestazioni delle costruzioni, introducendo nuovi sistemi di protezione sismica basati sull'isolamento delle costruzioni e sull'inserimento di sistemi dissipativi. L'applicazione di questi ultimi, in particolare, comporta anche conseguenze di natura economica, valutabili in termini di nuovi costi e nuovi benefici. Si pone pertanto un duplice problema: da un lato è opportuno conoscere, nei termini generali, in quali casi vi siano variazioni, in più o in meno, rispetto alle precedenti norme in vigore in Italia; dall'altro, occorre stimare, mediante analisi generalizzate, i maggiori benefici attesi. Ciò costituisce l'obiettivo della ricerca proposta.

4.4 Attività previste nel secondo semestre

1. *Le configurazioni strutturali delle costruzioni resistenti al sisma.*
 Individuazione delle categorie delle principali configurazioni strutturali antisismiche compatibili con l'impiego dei sistemi di isolamento e di dissipazione di energia.
 Analisi preliminare delle classi di problemi riconducibili alle categorie di morfologie architettoniche in funzione della loro interazione con le configurazioni strutturali antisismiche individuate.
 Impostazione delle modalità esecutive delle analisi comparative prestazionali delle configurazioni suddette e dei parametri comportamentali.
2. *Gli aspetti economici.*
 Definizione preliminare delle correlazioni fra pericolosità sismica del territorio, scelta del livello di capacità resistente (intensità sismica di progetto), livelli di danno atteso (vulnerabilità), costi di intervento (costi diretti ed indiretti correlati agli scenari di danno), in relazione alle indicazioni della nuova normativa di progetto.
 Definizione delle metodologie di analisi per il calcolo delle risposte prestazionali, dell'individuazione dei corrispondenti parametri di danno da porre in relazione con i costi di intervento attesi.
 Criterio economico per l'attualizzazione di costi probabili in funzione del tasso annuo di attualizzazione e del periodo di vita utile di riferimento.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Arnold C. and Reitherman R. (1982). Building Configuration and Seismic Design. John Wiley & Sons.
- Arnold C. and Reitherman R. (1989). In "Architectural Considerations" - F. Naeim editor - Von Nostrand, New York.
- Arnold C. (1997). La Configurazione Strutturale. Latina C. (1997). La forma è la sostanza: irregolarità di configurazione e azioni sismiche. In "Costruire in Muratura".
- Dong W., Wong F., Kim J. and Shah H. (1988). A Knowledge-Based Seismic Risk Evaluation System for the Insurance and Investment Industries. 9th WCEE, Tokyo.
- Ferritto J. M. (1980). An economic analysis of earthquake design levels. Civil Engineering Laboratory. US Department of the Navy. Technical note 1640. Port Hueneme (California).
- Ferritto J. M. (1984). Economics of seismic design for new buildings. Journal of Structural Engineering, ASCE, ST.110, No.12.
- Levy M. and Salvatori M. (1999). Why buildings fall down - How structures fail. ("Perché gli edifici crollano" - Edizione italiana di "Strumenti Bompiani").
- Parducci A. (1988). Un Criterio per la Valutazione dei Benefici Economici Attesi in Relazione all'impiego dei Sistemi di Isolamento Sismico" - Volume "Omaggio a Giulio Ceradini" - Dip.to di Ingegneria Strutturale e Geotecnica - Università Di Roma "La Sapienza".
- Parducci A. (1991). Strategie di Progettazione e Benefici Economici dell'Isolamento Sismico. International Meeting on Earthquake Protection of Buildings" Ancona.
- Parducci A. (1991). Design Strategies and Economical Benefits in Seismic Isolation. Pacific Conference on Earthquake Engineering - Auckland (New Zealand).
- Parducci A. e Mezzi M. (1993). Il Sistema ESSI - Edifici Sospesi Sismicamente Isolati. 6° Convegno dell'associazione Nazionale Italiana di Ingegneria Sismica "L'ingegneria Sismica In Italia" - Perugia (Italia).
- Parducci A. (1993). Aspetti Economici dell'isolamento Sismico. 6° Convegno dell'Associazione Nazionale Italiana Di Ingegneria Sismica "L'ingegneria Sismica In Italia" - Perugia (Italia).
- Parducci A. and Mezzi M. (1994). Aseismic Suspended Buildings Based on Energy Dissipation. 10th ECEE - Vienna (Austria).
- Parducci A. and Materazzi A. L. (1994). A Widespread Criterion for the Estimation of Expected Benefits Derived by the Use of Seismic Isolation. 10th European Conference on Earthquake Engineering - Vienna (Austria).
- Parducci A. and Mezzi M. (1995). Economics in Seismic Isolation Options - Expected Benefits Versus Construction Costs. Pacific Conference on Earthquake Engineering - Melbourne (Australia).
- Parducci A. (1999). Seismic Isolation: Why, Where, When: Design Options for Ordinary Isolated Structures. International Post-Smirn Conference Seminar on Isolation, Energy Dissipation and Control of Vibration of Structures - Cheju (Korea), August 23+25.
- Thiel C. C. (1986). Life cycle cost consideration in structural systems selection. Applied Technology Council, ATC-17, 1986, San Francisco (California).
- Walker G. R. (1997). Prediction of Insurance Loss from Earthquakes. Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering - March.

5 Contributo dell'Unità di Ricerca c/o Univ. della Calabria (E2_UNICAL - Resp.: Vulcano)

Titolo specifico del programma svolto dall'Unità di Ricerca: Progettazione di edifici con controventi dissipativi o aon isolamento alla base ed effetti di near-fault.

5.1 Criteri di progetto semplificati di edifici con controventi dissipativi

Come evidenziato da studi ed esperienze condotte in vari paesi, l'impiego di controventi metallici provvisti di dispositivo dissipativo rappresenta una delle tecniche più efficaci per il controllo della risposta sismica sia di edifici esistenti, per i quali si rende necessario l'adeguamento, che di edifici di nuova costruzione. Si richiede, pertanto, lo sviluppo di procedure progettuali abbastanza semplici da poter essere agevolmente impiegate nella pratica professionale, sempre che non si vogliano utilizzare procedure numeriche più sofisticate, finalizzate all'ottimizzazione strutturale ovvero all'analisi, eventualmente non lineare, per una verifica diretta delle scelte progettuali.

I numerosi tipi di controventi dissipativi disponibili in letteratura differiscono sia per la particolare disposizione dei controventi (diagonali semplici, a X, a K concentrici o eccentrici) che per le caratteristiche del dispositivo dissipativo e, in particolare, per la forma di dissipazione dell'energia: per es., attrito, isteresi, viscosità, viscoelasticità [Soong and Dargush 1997, Housner et al. 1997]. Dispositivi particolari sono quelli basati sull'impiego di fluidi elettro-reologici e magneto-reologici a comportamento visco-plastico [Makris 1997], ovvero di leghe nichel-titanio con memoria di forma [Dolce et al. 2001]. La progettazione di edifici con controventi dissipativi richiede, in generale, la scelta delle caratteristiche di rigidezza e di resistenza sia per il telaio che per i controventi dissipativi, in modo da perseguire gli obiettivi prefissati. In particolare, per quanto riguarda la parte intelaiata, occorre conseguire un incremento del livello di sicurezza rispetto a strutture di tipo convenzionale, allo scopo di limitare o eliminare il danneggiamento e di ridurre la deformabilità, soprattutto in occasione di terremoti violenti. Pertanto, poiché per i telai con controventi dissipativi è atteso un livello di danneggiamento minore rispetto al telaio non controventato, nel progettare la parte intelaiata è possibile accettare prescrizioni di progetto e di dettaglio meno restrittive di quelle previste per il telaio senza controventi dissipativi.

Nell'ambito delle metodologie progettuali disponibili in letteratura, si possono distinguere approcci che utilizzano procedure di ottimizzazione strutturale ed approcci che ricorrono a procedure semplificate.

Alla prima categoria appartengono le procedure che ammettono, in occasione di terremoti di forte intensità, la possibilità di limitate deformazioni plastiche della parte intelaiata [Austin and Pister 1985, Braga and D'Anzi 1994, Braga e De Carlo 2004]. Tali procedure prevedono, generalmente, un'analisi preliminare e l'ottimizzazione della scelta progettuale. L'analisi preliminare, condotta nell'ipotesi di comportamento elastico, è impiegata per stabilire l'influenza dei controventi dissipativi e per delimitare il campo delle soluzioni effettivamente realizzabili. Il processo di ottimizzazione, seppur attuato con metodi differenti, consente di ottenere per via iterativa, nell'ipotesi di comportamento elasto-plastico, le caratteristiche di rigidezza e di resistenza dei controventi dissipativi ed, eventualmente, anche del telaio, ricorrendo alla minimizzazione di opportune funzioni della risposta strutturale. Più precisamente, Austin e Pister prevedono una condizione di minimo per il volume strutturale o per altra grandezza da scegliere in funzione dell'azione sismica (per es., riferendosi a terremoti di forte intensità, l'energia in ingresso o quella dissipata per isteresi). Braga e D'Anzi, ricorrendo al "metodo del gradiente coniugato", impongono, per forze sismiche assegnate, l'uguaglianza tra il lavoro compiuto da tali forze supposte agenti sul telaio controventato in campo elastico ed il lavoro che le stesse forze compiono sull'analogo telaio ma in campo elasto-plastico; il tutto con l'ausilio di ulteriori condizioni legate al comportamento locale (più precisamente, condizioni riguardanti lo scorrimento nei dispositivi ai vari piani ed i limiti di resistenza dei nodi di connessione telaio-controventi).

In alternativa, si possono utilizzare procedure progettuali semplificate, tali da poter essere agevolmente utilizzate nella pratica tecnica [Filiatrault and Cherry 1990, Vulcano e Guzzo-Foliaro 1993, Ciampi et al. 1997, Fu and Kasai 1998, Vulcano and Mazza 2002]. In tale ambito, sotto particolari ipotesi (per es., telaio di caratteristiche assegnate o meno, con comportamento elastico ovvero elasto-plastico) sono assunti, sia per le caratteristiche di rigidezza dei controventi che per quelle di resistenza (per es., lo sforzo di scorrimento, nel caso di dissipatori isteretici, o il fattore di smorzamento viscoso, nel caso di dissipatori viscoelastici) la legge di distribuzione ed il livello corrispondente. Quindi, modellata la struttura come un sistema ad un grado di libertà, attraverso l'analisi sismica di tale modello semplificato sono costruiti spettri di progetto, con riferimento a parametri adimensionali che mettono in conto le caratteristiche principali del sistema strutturale: periodo di vibrazione, livello di resistenza del telaio, rigidezza del telaio e dei controventi, livello dello sforzo di scorrimento nei dispositivi dissipativi, ecc. Utilizzando tali spettri è possibile definire, per un prefissato

grado di protezione del telaio, il livello di rigidità dei controventi e quello ottimale da assumere per lo sforzo di scorrimento nei dispositivi dissipativi; l'ottimizzazione di tale sforzo si effettua seguendo un criterio di minimizzazione per un opportuno "indice di performance" ovvero "di danneggiamento".

Infine, la progettazione dei controventi dissipativi richiede anche la scelta del numero e della localizzazione più opportuna dei dissipatori a ciascun piano della struttura: è lecito attendersi che la posizione più favorevole è là dove si prevedono i maggiori spostamenti relativi fra le estremità del controvento dissipativo; in tale scelta non si deve, però, trascurare il problema dell'incremento dello sforzo assiale nei pilastri. Criteri sistematici in merito alla localizzazione ottimale dei dissipatori sono stati proposti da diversi autori [Ashour and Hanson 1987, Zhang and Soong 1992, Shukla and Datta 1999].

5.2 Tecniche di isolamento alla base di edifici in presenza di terremoti "near-fault"

La notevole diffusione dei sistemi d'isolamento sismico per gli edifici ed i ponti è stata favorita dallo sviluppo di adeguati codici sismici internazionali (ASSISI 2003). Recentemente, opportuni criteri progettuali sono stati introdotti anche in Europa (Eurocodice 8, EC8) ed in Italia (Ordinanza P.C. 3274, OPCM). L'inserimento di un sistema d'isolamento alla base di un edificio è generalmente favorevole nei confronti dei terremoti cosiddetti "far-fault", aventi elevati contenuti energetici soprattutto nel campo delle frequenze medio-alte. L'obiettivo principale del presente lavoro è quello di confrontare diverse tecniche d'isolamento alla base, valutandone gli effetti sulla risposta ed i limiti di applicabilità nel caso di terremoti "near-fault".

Il notevole incremento di deformabilità orizzontale di una struttura isolata, rispetto alla corrispondente struttura a base fissa, può amplificare la risposta strutturale in occasione di moti del suolo anomali, quali quelli che si verificano in prossimità di faglie, che sono caratterizzati da un movimento impulsivo di lunga durata [Kelly 1999]. Più precisamente, se l'intensità di un impulso è tanto grande da provocare il raggiungimento della soglia di plasticizzazione della sovrastruttura, il contenuto in frequenza del moto trasmesso dagli isolatori alla sovrastruttura stessa può diventare critico. In particolare, si può verificare un'amplificazione della risposta strutturale, esaltata dalla lunga durata dell'impulso [Mazza and Vulcano 2001].

I terremoti "near-fault" sono caratterizzati anche da elevati valori del rapporto tra il picco di accelerazione al suolo in direzione verticale, PGAV, e quello in direzione orizzontale, PGAH [Benedetti and Carydis 1999, Salazar and Haldar 2000]. Ad elevati valori del rapporto PGAV/PGAH corrispondono notevoli escursioni dello sforzo normale nei pilastri, che possono produrre in tali elementi fenomeni indesiderati: instabilità, rottura fragile a compressione (nel caso di elementi in c.a.) ovvero apprezzabili sforzi di trazione [Papazoglou and Elnashai 1996, Mazza and Vulcano, 2004].

D'altra parte, la progettazione di una struttura isolata alla base viene generalmente condotta ritenendo trascurabile il contributo delle azioni sismiche verticali rispetto a quello delle azioni sismiche orizzontali. L'azione contemporanea delle due componenti sismiche può provocare la plasticizzazione della struttura in elevazione; in tal caso, si può verificare un'amplificazione della risposta strutturale, esaltata dalla lunga durata dell'impulso orizzontale. Inoltre, cerniere plastiche si possono formare, per effetto dell'accelerazione verticale, nella campata delle travi, soprattutto ai piani più alti, dove è possibile un'amplificazione della risposta strutturale in funzione della rigidità verticale degli isolatori [Mazza and Vulcano 2006].

Infine, i risultati di prove sperimentali a carico assiale variabile, condotte su classici isolatori ad alto smorzamento ("High-Damping-Laminated-Rubber Bearing", HDLRB) e con un nucleo di piombo (ossia "Lead-Rubber Bearing", LRB) hanno messo in evidenza le interazioni esistenti tra i legami forza-spostamento che caratterizzano il comportamento di tali isolatori nelle direzioni orizzontale e verticale [Ryan et al. 2004]. In particolare, la rigidità orizzontale si riduce all'aumentare del carico assiale, mentre quella verticale diminuisce al crescere della deformazione orizzontale; tali effetti possono diventare importanti in presenza di elevati valori del rapporto PGAV/PGAH.

Attualmente, l'EC8 considera soltanto gli effetti dei terremoti "far-fault", richiedendo l'adozione di specifici spettri di risposta soltanto per strutture isolate di notevole importanza (per es., ospedali e centrali nucleari), localizzate a meno di 15 km dalla più vicina faglia potenzialmente attiva per la quale è attesa una magnitudo $M_s \geq 6.5$. Inoltre, l'EC8 prevede che le azioni sismiche verticali debbano essere considerate nella progettazione di strutture isolate alla base nel caso in cui il valore di progetto di PGAV risulti maggiore di 0.25 g. A tale proposito, è opportuno ricordare che l'EC8, per regioni ad elevato rischio sismico (magnitudo $M_s > 5.5$), assume differenti valori del rapporto di accelerazione aPGA (= PGAV/PGAH) in funzione del tipo di suolo: per es., un valore massimo di 0.9 nel caso di suolo molto rigido (tipo A) ed un valore pari a 2/3 nel caso di suolo piuttosto deformabile (tipo D). Tuttavia, le registrazioni effettuate in occasione di forti terremoti "near-fault" hanno evidenziato che il rapporto di accelerazione aPGA può risultare anche maggiore dell'unità. I sistemi di isolamento alla base fanno uso di isolatori elastomerici ed appoggi scorrevoli, eventualmente accoppiati con dispositivi dissipativi.

L'elevato spostamento alla base prodotto da terremoti "near-fault" di notevole intensità richiederebbe l'uso di isolatori elastomerici di dimensioni considerevoli (per es., quelle degli strati di gomma, per HDLRB, e anche del nucleo di piombo, per LRB); analoghe considerazioni valgono nel caso di appoggi scorrevoli (per es., per il Friction Pendulum, FP, si richiede di incrementare gradualmente la curvatura e la scabrezza della superficie di scorrimento). In alternativa, è possibile ricorrere ad isolatori elastomerici e slitte combinati in serie (per es., come nel sistema "Electricité-de-France"), oppure ad isolatori HDLRB disposti su più strati e collegati tra loro da piastre in acciaio [Morikawa et al. 1991, Skinner et al. 1993].

Un approccio differente consiste nel limitare lo spostamento alla base sfruttando la risposta incrudente degli isolatori elastomerici per elevate deformazioni a taglio, oppure disponendo, in parallelo col sistema d'isolamento, dei dispositivi dissipativi supplementari. Questi ultimi differiscono, fra l'altro, per la forma di dissipazione dell'energia: per es., attrito, isteresi, viscosità, viscoelasticità. Dispositivi particolari sono quelli basati sull'impiego di fluidi elettro-reologici e magneto-reologici a comportamento visco-plastico, ovvero di leghe nichel-titanio con memoria di forma. Infine, isolatori elastomerici e slitte possono essere combinati anche in parallelo (per es., come nel sistema "Resilient-Friction-Base Isolator"). Comunque, tutti questi sistemi hanno in comune l'inconveniente di aumentare il contributo dei modi superiori di vibrazione della sovrastruttura.

5.3 Attività previste nel secondo semestre

Nel secondo semestre del primo anno l'attività di ricerca verrà rivolta alla modellazione delle principali tipologie di controventi dissipativi disponibili in letteratura, al fine di simularne la risposta ciclica non lineare per effetto di eventi sismici di notevole intensità. I controventi dissipativi si differenziano sia per la configurazione delle aste di irrigidimento (diagonali semplici, controventi a X, a K, concentrici o eccentrici) che per le caratteristiche del dispositivo (in particolare per la forma di dissipazione dell'energia: attrito, isteresi, viscosità ovvero viscoelasticità). Per analizzare gli effetti prodotti dall'inserimento di tali tipologie di controventi dissipativi in una struttura intelaiata (in c.a. o in acciaio) verranno messe a punto e validate attraverso test numerici delle subroutine da inserire in un codice di calcolo per l'analisi dinamica non lineare di strutture intelaiate piane con controventi dissipativi sottoposte ad azioni sismiche orizzontali e verticali. Inoltre, verranno approfonditi i problemi connessi allo sviluppo di procedure progettuali tali da poter essere agevolmente utilizzate nella pratica tecnica. A tal fine, s'intende affrontare il problema della progettazione attraverso un'opportuna scelta delle caratteristiche di rigidità e di resistenza sia per la struttura che per i controventi dissipativi, in modo da perseguire obiettivi prefissati: in particolare, per quanto riguarda la parte intelaiata, si vuole conseguire un incremento del livello di sicurezza rispetto a strutture di tipo convenzionale, allo scopo di limitare o eliminare il danneggiamento e di ridurre la deformabilità, soprattutto in occasione di terremoti violenti. La scelta delle leggi di distribuzione della rigidità dei controventi e delle capacità dissipative dei dispositivi può avere una forte influenza sulla dislocazione del danneggiamento e delle potenziali regioni dissipative; diventa, pertanto, molto importante predisporre un'adeguata procedura di progetto.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Ashour S. A. and Hanson R. D. (1987). Elastic seismic response of buildings with supplemental damping. Report n. UMCE 87-01, University of Michigan.
- ASSISI, (2003). Design rules and guidelines for structures provided with passive control systems of seismic vibrations applied or proposed in Armenia, Chile, France, Italy, Japan, Mexico, P. R. China, Russian Federation, U.S.A., Technical Report No. A/03-01, ENEA ed. for ASSISI, Bologna, Italy.
- Austin M. A. and Pister K. S. (1985). Design of seismic-resistant friction-braced frames, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 111(12): 2751-2769.
- Benedetti D. and Carydis P. (1999). Influence of the Vertical Component on Damage During Shallow - Near Field Earthquakes, *European Earthquake Engineering*, 3: 3-12.
- Braga F. and D'Anzi P. (1994). Steel braces with energy absorbing devices: a design method to retrofit reinforced concrete existing buildings. *Procs. Italian-French Symp. on "Strengthening and repair of structures in seismic area"*, Nice, France, Ouest Éditions.
- Braga F. and De Carlo G. (2004). Un metodo di progetto per l'adeguamento antisismico di strutture esistenti in c.a. mediante controventi dissipativi. *Atti 11° Convegno Nazionale di Ingegneria Sismica*, Genova, 25-29 gennaio.
- Ciampi V., De Angelis M. and Paolacci F. (1997). Una metodologia di progetto su base energetica per controventi dissipativi viscoelastici. *Atti 8° Convegno Nazionale, L'Ingegneria Sismica in Italia*, Taormina, 21-24 settembre, 1: 653-660.
- Dolce M., Cardone D., Nigro D., Ponzo F. C., Nicoletti M. and La Monaca B. (2001). Confronto sperimentale di diversi sistemi di isolamento sismico su telaio in c.a. in scala 1:2.5. *Atti 10° Convegno Nazionale di Ingegneria Sismica*, Potenza-Matera, 9-13 settembre.
- Filiatrault A. and Cherry S. (1990). Seismic design spectra for friction-damped structures, *Journal of Structural Engineering*, ASCE 116(5): 1334-1355.
- Fu Y. and Kasai K. (1998). Comparative study of frames using viscoelastic and viscous dampers. *Journal of Structural Engineering*, ASCE 124(5): 513-522.
- Housner G. W., Bergman L. A., Caughey T. K., Chassiakos A. G., Claus R. O., Masri S. F., Skelton R. E., Soong T. T., Spencer B. F. and Yao T. P. (1997). Structural control: past, present and future. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 123(9): 899-905.

- Zhang, R.-H., Soong, T.T., 1992. Seismic design of viscoelastic dampers for structural applications. *Journal of Structural Engineering*, ASCE 118(5): 1375-1392. Costs" - Pacific Conference on Earthquake Engineering - Melbourne (Australia) Nov. 1995.
- Kelly J. M. (1999). The role of damping in seismic isolation, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 28, 1717-1720.
- Makris N. (1997). Rigidity-plasticity-viscosity: can electrorheological dampers protect base-isolated structures from near-source ground motions? *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26: 571-591.
- Mazza F. and Vulcano A. (2001). Seismic response of buildings with isolation & supplemental dissipation at the base. *Proceedings of the 5th World Congress on Joints, Bearings and Seismic Systems for Concrete Structures*, Rome, Italy; CD-ROM.
- Mazza F. and Vulcano A. (2004a). Effects of the vertical acceleration on the response of base-isolated structures subjected to near-fault ground motions. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, paper No. 2934.
- Mazza F. and Vulcano A. (2004b). Base-isolation techniques for the seismic protection of rc framed structures subjected to near-fault ground motions. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, paper no. 2935.
- Mazza F. and Vulcano A. (2006). Seismic response of base-isolated buildings under horizontal and vertical near-fault ground motions, 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, April, San Francisco (accepted for publication).
- Morikawa S., Masaki N., Suzuki S. and Suizu Y. (1991). Multi-Stage Rubber Bearings for Seismic Isolation. *Procs. of the International Meeting on Earthquake Protection of Buildings*, Ancona, 125/C-134/C.
- Papazoglou A. J. and Elnashai A. S. (1996). Analytical and field evidence of the damaging effect of vertical earthquake ground motion, *Earth. Engineering and Structural Dynamics* 25, 1109-1137.
- Ryan K. L., Kelly J. M. and Chopra A. K. (2004). Experimental observation of axial load effects in isolation bearings, *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, paper No. 1707.
- Salazar A. R. and Haldar A. (2000). Structural responses considering the vertical component of earthquakes. *Computer and Structures*, 74: 131-145.
- Shukla A. K., Datta T. K. (1999). Optimal use of viscoelastic dampers in building frames for seismic forces. *Journal of Structural Engineering*, ASCE 125(4): 401-409.
- Skinner R. I. and McVerry G. H. (1996). Seismic isolators for ground motions with large displacements and velocities. *Procs. of the 11th World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco (Messico), paper 1841.
- Soong T. T., Dargush G. F. (1997). *Passive energy dissipation systems in structural engineering*. England: John Wiley & Sons Ltd.
- Vulcano A. and Guzzo-Foliaro G. (1993). Criteri progettuali di strutture intelaiate con controventi dissipativi. *Atti 6° Convegno "L'Ingegneria Sismica in Italia"*, Perugia, 1: 131-140.
- Vulcano A. and Mazza F. (2002). A simplified procedure for the aseismic design of framed buildings with dissipative braces. *Proceedings of the 12th European Conference on Earthquake Engineering*, London, 9-11 september, paper 735.

6 Contributo dell'Unità di Ricerca c/o Politecnico di Torino (E3_POLITO - Resp.: De Stefano)

Titolo specifico del programma svolto dall'Unità di Ricerca: *Sistemi a masse accordate e controllo semi-attivo per la riduzione della risposta sismica delle costruzioni.*

6.1 Classificazione dei sistemi di controllo passivo a masse accordate

Tra tutti i dispositivi di controllo vibrazionale, gli assorbitori a masse accordate sono forse quelli più lungamente studiati. Da quando furono inventati nei primi anni del 1900, essi sono stati adottati in diversi campi dell'ingegneria (meccanica, aerospaziale, navale, civile) e contano oggi, tra le sole installazioni civili, applicazioni a:

- edifici e torri: oscillatori singoli o multipli distribuiti ai vari livelli ma prevalentemente in copertura, principalmente per il miglioramento del comfort degli utenti e del comportamento strutturale in esercizio a fronte dell'azione del vento, più raramente del sisma;
- ciminiere: oscillatore singolo in testa al camino per la riduzione delle oscillazioni trasversali indotte dal fenomeno aerodinamico di distacco dei vortici;
- ponti e passerelle pedonali: oscillatori installati sull'impalcato per ridurre la risposta verticale o torsionale all'azione di vento o traffico veicolare, o sugli stralli per assorbirne le vibrazioni indotte dal vento;
- solai: oscillatori singoli o multipli disposti in prossimità del centro campata per l'assorbimento delle vibrazioni verticali indotte dal camminamento.

Circoscrivendo il campo al solo controllo di strutture di edifici, si propongono due criteri di classificazione, rispettivamente secondo la tipologia del dispositivo e secondo la configurazione del sistema di controllo.

In base alla tipologia del dispositivo, i sistemi di controllo a massa accordata si distinguono in:

- oscillatori a massa solida (Tuned Mass Damper o TMD);
- oscillatori a massa liquida (Tuned Liquid Damper o TLD).

A sua volta la categoria dei TMD comprende le seguenti principali classi:

- TMD traslazionali, tra cui:
 - sistemi a massa-molla-smorzatore su guide a minimo attrito;
 - sistemi a massa su appoggi elastomerici;
- TMD a pendolo, tra cui:
 - sistemi a pendolo semplice;
 - sistemi a pendolo composto;

- sistemi a pendolo doppio;
- sistemi a bilanciere;
- sistemi a pendolo tipo ‘rocking’;
- sistemi a pendolo tipo ‘rolling’;

mentre la categoria dei TLD comprende le seguenti principali classi:

- Tuned Sloshing Damper (TSD);
- Tuned Liquid Column Damper (TLCD);
- Nutation Damper (ND).

In base alla configurazione di progetto del sistema di controllo, i sistemi a massa accordata possono realizzarsi nelle versioni seguenti:

- 1) oscillatore singolo accordato ad un solo modo strutturale;
- 2) batteria singola di oscillatori multipli accordata ad un solo modo strutturale;
- 3) insieme di oscillatori multipli variamente dislocati ed accordati tutti al medesimo modo strutturale;
- 4) come 1) ma replicato per più modi strutturali;
- 5) come 2) ma replicato per più modi strutturali;
- 6) come 3) ma replicato per più modi strutturali.

6.2 TMD

Il concetto del Tuned Mass Damper (TMD) risale agli anni Quaranta del secolo scorso, per quanto l'antesignano si possa già riconoscere nella proposta, avanzata da Frahm nel 1907, dell'assorbitore dinamico non smorzato. Un TMD consiste in una massa aggiuntiva dotata di molla e smorzatore opportuni, tale da fornire una isteresi, funzione della frequenza eccitante, che aumenta lo smorzamento della struttura principale. Il successo nella riduzione delle vibrazioni indotte dal vento è oggi ampiamente riconosciuto. Più controverso è il problema dell'efficacia del TMD a fronte di terremoti, che è fortemente dipendente dalla forma dell'input sismico. In particolare, l'efficacia è trascurabile sia per sismi a carattere impulsivo sia per eccitazioni prevalentemente collocate su frequenze distanti da quelle della struttura (a cui il TMD è intonato). Per evitare che i modi superiori al primo restino scoperti dal sistema di controllo, si possono adottare tanti TMD (applicati in parallelo alla struttura) quanti sono i modi che si desidera controllare, dando vita al sistema di TMD multipli (MTMD) suggerito da [Clark 1988] e studiato successivamente da diversi autori [Xu e Igusa 1992, Abé e Fujino 1994, Abé e Igusa 1995], dalle cui ricerche è emerso che la strategia dei MTMD comporta in realtà sostanziali benefici anche se applicata ad un singolo modo di vibrare. Un doubly tuned mass damper (DTMD), costituito da due masse collegate in serie alla struttura dà considerevoli vantaggi per elevati rapporti di massa ma per valori ordinari (145%) la prestazione è paragonabile a quella del TMD singolo. Palazzo e Petti dimostrarono che l'aggiunta di un TMD ad una struttura isolata alla base non interferisce con tale isolamento. Mita e Feng proposero, specificamente per edifici alti, il concetto di ‘mega-sottostruttura’, in cui nell'organismo strutturale vengono ricavate sottostrutture con la funzione di assorbitori di vibrazioni.

Se i principi base del TMD nel ridurre la risposta strutturale sono ormai stabiliti, la ricerca della configurazione ottimale per un controllo mediante TMD resta un problema aperto.

Alcune considerazioni d'ordine pratico vanno osservate nella predisposizione di un sistema di controllo a TMD: la quantità di massa applicabile in sommità condiziona inevitabilmente il progetto; lo spostamento relativo richiesto è un vincolo imprescindibile; l'attrito tra TMD e superficie di scorrimento deve essere il più limitato possibile al fine di consentire l'innescio del moto anche per modeste eccitazioni (per vibrazioni in condizioni di esercizio, come sono quelle indotte dal vento).

Un gran numero di TMD è stato installato su edifici alti, ponti, torri, ciminiere, come controllo della risposta all'azione del vento. Si possono ricordare almeno le seguenti applicazioni:

- John Hancock Building (Boston, 1975; altezza 244 m): TMD traslazionale monodirezionale, con massa in piombo e acciaio su piastre in acciaio lubrificato (\$ 3000000);
- Canadian National Tower (Toronto, 1975; altezza 503 m): due TMD anulari in acciaio e piombo, con smorzatori oleodinamici, per il controllo dei modi secondo e quarto;
- Citicorp Center (New York City, 1977; altezza 278 m): TMD traslazionale bidirezionale (rapporto di massa al 2%) in cls su appoggi idraulici, con due sistemi ortogonali di molle pneumatiche/smorzatori (\$ 1500000);
- Sydney Tower (Sydney, 1981): TMD a pendolo anulare contenente acqua smorzato da shock absorber;
- Chiba Port Tower (Chiba, 1986; altezza 125 m): TMD traslazionale (rapporto di massa all'1%) per il controllo dei primi due modi ortogonali;
- Higashiyama Sky Tower (Nagoya, 1989): TMD a pendolo inverso con molle a bobina;

- Huis Ten Bosch Domtoren (Nagasaki, 1992): TMD su appoggi in materiale viscoelastico;
- Crystal Tower (Osaka, 1990): 6 TMD a pendolo semplice per il controllo dei primi due modi ortogonali, con smorzatori oleodinamici (\$ 350000, meno del 2 per mille del costo complessivo di costruzione);
- Washington National Airport Control Tower (Washington, 1997);
- Chifley Tower (Sydney, 1994): TMD a pendolo semplice con cilindri idraulici;
- Sendai AERU (Sendai, 1998): TMD traslazionale su appoggi in gomma con molle a bobina;
- Trump World Tower (New York City, 2001; altezza 260 m): TMD a pendolo composto (rapporto di massa al 2.8%) con shock absorber idraulici per il controllo del primo modo;
- Taipei 101 (Taipei, 2004; altezza 508 m): TMD a pendolo semplice in acciaio.

Come si evince dalla precedente carrellata di esempi, la massa del TMD è tipicamente costituita da blocchi in piombo, acciaio, calcestruzzo. Esistono peraltro diversi casi di TMD realizzati senza introdurre massa aggiuntiva sulla struttura. Le seguenti installazioni, ad esempio, si avvalgono della massa di serbatoi di accumulo di acqua o ghiaccio:

- Rokko-Island P&G Building (Kobe);
- Crystal Tower (Osaka);
- Sea Hawk Hotel & Resort (Fukuoka).

6.3 TLD

Analoghi in linea di principio al TMD, il Tuned Sloshing Damper (TSD) e il Tuned Liquid Column Damper (TLCD) assorbono energia strutturale rispettivamente per i fenomeni dissipativi (azione viscosa, rottura d'onda) di una superficie liquida in oscillazione e per il passaggio di fluido attraverso un orificio. Dopo che studi condotti da Wakahara (1989) e da Sun (1991) ne dimostrarono l'efficacia per la soppressione di oscillazioni sinusoidali, i TLD hanno trovato applicazione pratica nell'area del controllo strutturale di vibrazioni indotte dal vento.

Welt e Modi (1989) furono tra i primi a suggerire l'uso di TLD su edifici. Il contenitore da loro proposto (Nutation Damper) è geometricamente un cilindro a sezione anulare e pareti verticali. Bauer (1984) aveva suggerito l'uso di contenitori rettangolari completamente riempiti di due fluidi non miscibili, in cui la dissipazione fosse affidata al moto della superficie di interfaccia. Successivamente, il comportamento di serbatoi circolari o rettangolari parzialmente riempiti fu studiato da Fujino (1988).

I TSD sono estremamente pratici e possono addirittura ricavarsi da serbatoi esistenti praticandone una compartimentazione mediante setti. Ad oggi, sono impiegati TSD che sfruttano sia la configurazione ad acqua profonda che quella ad acqua bassa. La configurazione ad acqua bassa dissipa energia attraverso l'azione viscosa e la rottura dell'onda. L'aggiunta di particelle galleggianti in PVC può aumentare la dissipazione. TSD ad acqua profonda, invece, necessitano di paratoie e setti per aumentare l'energia dissipata per fenomeno di sloshing, e non sempre coinvolgono l'intera massa nel fenomeno oscillatorio. Mentre la frequenza naturale di un TLD può essere aggiustata attraverso una variazione della profondità o della dimensione del contenitore, sussistono limitazioni pratiche alla profondità dell'acqua e pertanto alla frequenza di tuning.

Un TLCD consiste in un tubo riempito d'acqua [Xu et al. 1992]. La frequenza fondamentale dipende dalla lunghezza della colonna d'acqua, mentre il termine dissipativo, dovuto alla presenza dell'orificio, è non lineare e dipende dall'entità del restringimento.

Date le semplificazioni adottate nel descrivere il moto del fluido, furono condotti esperimenti volti a testare la validità dei modelli proposti. In generale, l'accordo tra previsioni e sperimentazione si dimostrò soddisfacente per piccole ampiezze di oscillazione, per le quali tuttavia si osservò che lo smorzamento della struttura era beneficamente incrementato solo per frequenze prossime a quelle dei TLD, come accade d'altronde per un oscillatore a comportamento lineare. Per ampiezze maggiori, invece, l'accordo con i modelli teorici proposti cadeva in difetto, ma l'efficacia sperimentale si registrava anche lontano dalla frequenza di tuning.

Studi analitici e sperimentali su TLD soggetti ad ampie eccitazioni sono riportati da [Reed et al. 1998]. Un vantaggio delle grandi ampiezze fu confermato essere la insensibilità della prestazione a contenute variazioni del rapporto di intonazione (robustezza del sistema di controllo).

Il controllo mediante TLD è stato applicato principalmente in Giappone.

I TLD installati lungo i 77.6 m della Tokyo Airport Tower (1993), ad esempio, consistono in 1400 serbatoi riempiti di acqua e particelle in sospensione. I contenitori, bassi cilindri di diametro pari a 0.6 m e 0.125 m, sono applicati in strati su consoles di acciaio. La massa totale dei TLD è di circa il 3.5% della massa del primo modo di vibrare della torre e la frequenza è intonata a 0.743 Hz. Particelle sospese in polietilene furono aggiunte per ottimizzare la dissipazione di energia per collisione. Il comportamento del sistema di controllo è stato osservato sotto varie tipologie di azione del vento. In un caso, corrispondente ad una massima velocità del vento di 25 m/s, i dati registrati mostrarono che le accelerazioni vennero ridotte del

60% rispetto al valore che avrebbero avuto in assenza di controllo.

Un'altra delle prime applicazioni di TLD fu sulla torre in acciaio dell'aeroporto di Nagasaki. La torre fu dotata di 175 sloshing TLD cilindrici in PVC, aventi diametro di 38 cm, altezza d'acqua di 4.8 cm, distribuiti in 25 pile di 7 strati ciascuna, distanziati di 7 cm l'uno dall'altro, per un'altezza complessiva di 127 cm per pila. La massa complessiva risulta 1.6% della massa effettiva del modo fondamentale, ovvero 0.59% della massa totale della torre. L'effetto del sistema di controllo fu il conseguimento di uno smorzamento strutturale finale di 4.7%, cinque volte superiore a quello della struttura originaria.

Nella più recente applicazione della Yokohama Marine Tower, 39 pile di diametro pari a 49 cm, altezza di 50 cm, accolgono ciascuna 10 strati contenenti ognuno 2.1 cm di acqua. La massa complessiva risulta appena 1% della massa effettiva del primo modo e 0.3% della massa totale della struttura.

6.4 TMD e TLD a confronto

Per quanto la teoria matematica coinvolta in una previsione accurata del comportamento di un TLD possa essere anche molto complessa, il che rende difficile sviluppare modelli predittivi elementari da applicarsi agevolmente in una procedura di progetto, la strumentazione richiesta è economica e l'installazione elementare. Lo smorzatore, in generale, consiste in un serbatoio in polipropilene, anche commercialmente disponibile, contenente vari sottili strati di acqua in pila. Paragonato ad un sistema a TMD, il controllo mediante TLD presenta numerosi vantaggi:

- l'assenza di attrito meccanico comporta un trascurabile livello di innesco (*trigger level*), rendendo il TLD operativo anche per bassi livelli di eccitazione;
- La facilità di installazione lo rende adatto anche ad un uso temporaneo, ad esempio durante le fasi costruttive della realizzazione di un ponte;
- l'assenza di componenti meccaniche in moto riduce i costi di manutenzione ed aumenta l'affidabilità del sistema di controllo;
- un TLD può operare in tutte le possibili direzioni nel piano orizzontale;
- la massa liquida può essere ripartita tra numerosi serbatoi, che risultano conseguentemente piccoli e facilmente trasportabili;
- se il serbatoio ha la sezione orizzontale variabile lungo l'asse verticale, come avviene per contenitori tronco-conici, esso diventa facilmente intonabile per semplice cambiamento dell'altezza d'acqua invasata;
- per strutture con frequenze di vibrazione differenti nelle due direzioni principali, è possibile usare contenitori con doppia simmetria assiale (rettangolari o ellittici), in modo da realizzare un doppio *tuning* (anche se gli studi fioriti attorno ai TLD hanno sempre interpretato esperimenti condotti con eccitazioni unidirezionali, sicché l'estrapolazione ad un moto bidirezionale è a rigore del tutto arbitraria).

Per converso, una proprietà sfavorevole del TLD è la bassa densità dell'acqua, che comporta, a parità di massa, un ingombro maggiore di quello richiesto da un sistema a TMD (normalmente realizzato in acciaio, piombo o calcestruzzo). Tuttavia tale svantaggio è compensato dall'attitudine di un sistema di TLD alla parcellizzazione: è possibile distribuire un gran numero di TLD in ogni spazio libero disponibile della struttura, facendoli lavorare in parallelo.

Esiguità di codificazione normativa in materia di dissipatori passivi.

I grandi sforzi fatti dalla ricerca nel campo della dissipazione passiva di energia ed il crescente interesse professionale in questa area spingono alla formulazione di requisiti per il progetto e la realizzazione di dispositivi dissipativi.

Linee guida, ispirate a criteri fortemente conservativi (comprensibili, data la novità della tecnologia) sono state stabilite per dispositivi metallici, ad attrito, viscoelastici e viscosi (SEAONC, 1993; FEMA, 1995), ed oggi finalmente introdotte nella normativa nazionale. Vi si prevede, ad esempio, l'obbligo di test per la certificazione sperimentale dei dispositivi adottati. Un'analisi non-lineare nel tempo è resa obbligatoria per quei dispositivi (smorzatori metallici e ad attrito) che non manifestano comportamento lineare (*rate-dependent devices*) mentre agli altri un'analisi con spettro (elastico) di risposta è consentita purché si garantisca per la struttura un comportamento lineare. Queste indicazioni non si applicano tuttavia ancora agli assorbitori a massa oscillante (TMD e TLD).

Sistemi di controllo semi-attivo.

In molte applicazioni pratiche, la perdita di accordatura di un dispositivo a massa oscillante, dovuta a cambinamenti nelle proprietà dinamiche del sistema, inficia l'efficacia del controllo. E' noto che TMD e TLD sono poco robusti, soprattutto quando il rapporto di frequenza si discosta dal valore ottimale. Il ricorso a strategie di controllo semi-attivo ha consentito negli ultimi anni di realizzare un interessante compromesso tra la soluzione passiva, non abbastanza robusta, e quella attiva, non abbastanza affidabile. Molta letteratura indica che sistemi semi-attivi hanno prestazioni decisamente superiori a quelle dei corrispondenti sistemi

passivi e potenzialmente paragonabili a quelle dei sistemi attivi. Tra gli esempi più significativi di tale tecnologia si ricordano gli smorzatori fluidi ad orifizio variabile, i dispositivi a rigidità variabile, i TLD controllabili, gli smorzatori a fluido controllabile (elettro-reologici o magneto-reologici), gli smorzatori ad impatto controllabili. In particolare, per quanto concerne il TLD, da alcuni anni [Kareem 1994] si sono proposti approcci semi-attivi volti a modificare i parametri dinamici dell'oscillatore per adattarlo all'eccitazione imposta. Lou propose un dispositivo semi-attivo basato su un TLD passivo, in cui la lunghezza del serbatoio può essere alterata, con conseguente modificazione della frequenza. Haroun suggerì di realizzare TLCD con orifizio di sezione variabile al fine di controllare il parametro smorzamento.

Ma la più promettente applicazione semi-attiva ad oscillatori a massa è forse rappresentata ancora dagli smorzatori magneto-reologici (MRD), ormai realizzati commercialmente secondo una molteplicità di varianti (a tubo singolo, a tubo doppio, a doppia terminazione, a spugna). Numerosi i vantaggi dei MRD: sono semplici e affidabili, in quanto capaci di offrire uno smorzamento variabile in tempo reale senza contenere parti mobili al di fuori del pistone; possono esprimere elevati valori di smorzamento, risultando efficaci anche per il controllo di grandi strutture; richiedono piccole quantità di energia per essere alimentati. Molta ricerca si è occupata di selezionare algoritmi di controllo semi-attivo ottimale. Agrawal e Yang (2000) sintetizzarono algoritmi semi-attivi (SASD e SAEMFD) specificamente intesi alla protezione di strutture soggette a terremoti; Abe e Igusa (1996) svilupparono una teoria analitica per il controllo ottimale di assorbitori semi-attivi; Hidaka e al. (1999) studiarono sperimentalmente la performance di un assorbitore dinamico a smorzamento variabile basato su fluidi elettroreologici, con legge di controllo regolata da rete neurale. [Pinkaw and Fujino 2001] studiarono l'efficacia di un TMD semi-attivo (STMD) a smorzamento variabile sotto eccitazioni armoniche.

Recentemente, diversi algoritmi ispirati al concetto di adattatività lenta sono stati pensati per preservare la condizione di accordatura a fronte di variazioni nelle proprietà della struttura, ovvero in pratica per garantire un controllo passivo ottimo istante per istante.

6.5 Attività previste nel secondo semestre

L'attività del secondo semestre, incentrata sull'approfondimento del comportamento di oscillatori passivi a massa armonizzata, si articolerà nei seguenti punti:

1. Studio dell'efficacia di TMD e TLD passivi (oscillatori singoli o multipli) per il controllo di sistemi ad un grado di libertà (controllo in norma H_{∞}) in presenza di incertezze parametriche (passive robust analysis) e ricerca di criteri di progetto ottimale del sistema di controllo passivo volti a minimizzarne la sensibilità alle incertezze attese (passive robust synthesis). Confronto tra TMD a massa certa e TMD a massa incerta, finalizzato alla quantificazione della riduzione di controllo legata all'incertezza. Confronto fra tipologie alternative di oscillatori a massa (TMD traslazionale, a pendolo, ibrido) ed evidenziazione del loro rispettivo comportamento robusto. Descrizione del comportamento di TLD mediante modelli semplici affetti da incertezza parametrica o non-parametrica.
2. Estensione al caso di strutture a più gradi di libertà, mediante simulazioni di strutture piane e spaziali passivamente controllate con TMD e/o TLD.
3. Verifica dell'efficacia sismica di oscillatori passivi a massa certa e incerta allo scopo di stabilire quanto dell'efficacia del controllo a fronte di azioni armoniche si conservi nel rispondere ad eccitazioni a carattere impulsivo

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Abe M. and Fujino Y. (1994). Dynamic characterization of multiple tuned mass dampers and some design formulas. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 23: 813-835.
- Abe M. and Igusa T. (1995). Tuned mass dampers for structures with closely spaced natural frequencies. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 24: 247-261.
- Clark A. J. (1988). Multiple passive tuned mass dampers for reducing earthquake induced building motion. In: *Proc., 9th World Conf. Earthquake Engineering.*, Vol. V, 779-784.
- Kareem A. (1994). The next generation of Tuned Liquid Dampers. In: *First World Conference on Structural Control*, Los Angeles, California, USA.
- Pinkaew T. and Fujino Y. (2001). Effectiveness of semi-active tuned mass dampers under harmonic excitation. *Earthquake, Wind and Ocean Engineering*; 23: 850-856.
- Reed D., Yu J., Yeh H. and Gardsson S. (1998). Investigation of Tuned Liquid Dampers under large amplitude excitation. *Journal of Engineering Mechanics*; 124(4): 405-413.
- Xu K. and Igusa T. (1992). Dynamic characteristics of multiple substructures with closely spaced frequencies. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*; 21: 1059-1070.
- Xu Y. L., Samali B. and Kwok K. C. S. (1992). Control of along-wind response of structures by mass and liquid dampers. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*; 118: 20-39.

7 Contributo dell'Unità di Ricerca c/o Univ. di Udine (E4_UNID - Resp.: Sorace)

Titolo specifico del programma svolto dall'Unità di Ricerca: *Metodi di progetto e di analisi semplificata e procedure di qualificazione sperimentale di sistemi di isolamento sismico e di dissipazione di energia includenti dispositivi fluido-viscosi.*

7.1 I dispositivi fluido-viscosi a matrice siliconica

I dispositivi fluido-viscosi a matrice siliconica rappresentano un'importante tipologia all'interno della più vasta classe dei sistemi a comportamento viscoso. Il principio di funzionamento si basa sul flusso di un fluido elastomerico ad elevata viscosità tra le due parti di un serbatoio al cui interno si muove un pistone ("passante", nel caso di elementi dissipatori puri, oppure contro fondo serbatoio, per elementi molla-smorzatore). Il fluido è posto in pressione mediante l'applicazione di un opportuno pre-carico in fase di realizzazione. Ciò determina una condizione di equilibrio statico tra le due parti del serbatoio, che può essere superata soltanto tramite un'azione statica o dinamica di entità tale da oltrepassare il valore del pre-carico imposto. I dispositivi siliconici si caratterizzano, innanzitutto, per il fatto di possedere le più elevate capacità smorzanti "specifiche" tra tutti i sistemi viscosi, come attestato dai più bassi valori dell'esponente frazionario α che ne governa la forza di reazione dissipativa F_d ($F_d(t) = c \operatorname{sgn}(\dot{x}(t)) |\dot{x}(t)|^\alpha$, essendo c il coefficiente di smorzamento, $\dot{x}(t)$ la velocità del pistone e $\operatorname{sgn}(\cdot)$ la funzione segno). Tali valori risultano pari ad appena 0.1-0.2 per i dispositivi di produzione dell'industria francese Jarret, in tal senso definiti ad elevata non linearità, nei quali il flusso avviene attraverso un ristretto spazio anulare realizzato tra la testa del pistone e la superficie del serbatoio cilindrico. Altri apparecchi esistenti sul mercato internazionale, di produzione dell'industria statunitense Taylor, utilizzano parimenti fluidi siliconici, seppur di diversa composizione chimica. In essi, tuttavia, avvenendo il flusso attraverso orifizi praticati nella testa del pistone, la capacità dissipativa risulta assai minore, a parità di spostamento imposto e di forza di reazione massima, essendo definita da valori dell'ordine di 0.5-0.6 del suddetto esponente α (elementi a moderata non linearità). Una notevole varietà di dispositivi classificabili come viscosi è, poi, caratterizzata dall'impiego di differenti tipi di fluido, generalmente costituiti da oli minerali, per i quali si ottengono prestazioni ancor più ridotte in termini di proprietà smorzanti ($\alpha = 0.8-1$), che portano a qualificarli come elementi a viscosità pressoché lineare.

Oltre alle superiori prestazioni in termini di capacità di dissipazione, gli apparecchi Jarret ad elevata non linearità presentano notevoli vantaggi anche sotto il profilo della stabilità delle proprietà meccaniche, in funzione sia del numero di cicli di risposta e della vita utile in opera (idealmente assumibili come "illimitati") sia della temperatura, ed inoltre per le caratteristiche autocentranti al termine dell'azione dinamica applicata. Ciò ha determinato un notevole interesse nei confronti dell'impiego di tali dispositivi ai fini della protezione sismica dei ponti e degli edifici, estendendone anche a tale settore il campo di applicazione, inizialmente limitato all'ingegneria ferroviaria e militare. A fronte di numerose installazioni in viadotti e ponti a livello internazionale, l'uso nelle strutture civili è, tuttavia, ancora abbastanza contenuto, soprattutto in relazione all'avvento solo recente di normative sismiche che riconoscano e contemplino al loro interno i sistemi avanzati di protezione. Ciò è particolarmente rilevabile in Italia dove, assieme ad alcuni importanti ponti autostradali, l'applicazione dei dispositivi fluido-viscosi Jarret si registra soltanto in qualche intervento relativo a coperture di grande luce (tra cui quella dello Stadio Olimpico di Roma), ed in un primo edificio isolato alla base, in corso di realizzazione alla periferia di Firenze, che ha visto coinvolto, in qualità di progettista strutturale, il responsabile della presente UR [Sorace and Terenzi 2004b, 2005].

Sul piano della ricerca, questa è stata prevalentemente sviluppata dai due gruppi che sono stati contattati dall'industria produttrice allo scopo di analizzare, sul piano scientifico, le potenzialità d'impiego di tali dispositivi nel settore dell'ingegneria sismica, facenti rispettivamente capo all'Università di Buffalo ed al correlato Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER), ed a ricercatori delle Università di Firenze e di Udine, che da molti anni collaborano sull'argomento. Le attività svolte da entrambi i gruppi, da oltre un decennio, hanno portato ad un completo livello di conoscenza, su base sperimentale, del comportamento meccanico dei dispositivi siliconici Jarret [Constantinou e Symans 1992, Terenzi 1994, Peckan et al. 1995, Reinhorn et al. 1995, Chiarugi et al. 1996, Soong e Dargush 1997, Sorace e Terenzi 2001a], includendo gli effetti di dipendenza dalla velocità di caricamento [Molina et al. 2004], della simulazione dello stesso comportamento in termini analitici [Constantinou e Symans 1992, Terenzi 1994, Peckan et al. 1995, Chiarugi et al. 1996, Soong e Dargush 1997, Constantinou et al. 1998, Terenzi 1999, FEMA-356 2000, Sorace e Terenzi 2001a, Soong and Pencer 2002] e della modellazione numerica agli elementi finiti mediante programmi commerciali [Peckan et al. 2000, Sorace e Terenzi 2001b, Şigaher e Constantinou 2003]. Su tale base sono state, quindi, formulate più ipotesi d'impiego degli stessi dispositivi in sistemi innovativi di protezione sismica, che vanno dall'isolamento alla base con smorzamento

supplementare [Soong e Dargush 1997, Constantinou et al. 1998, Sorace e Terenzi 2001a,b, Molina et al. 2004, Sorace e Terenzi 2002, 2004b, 2005], ai controventi dissipativi, in varie configurazioni [Constantinou e Symans 1992, Peckan et al. 1995, Reinhorn et al. 1995, Chiarugi et al. 1996, Constantinou et al. 1998, Sorace e Terenzi 1999, Chiarugi et al. 2000, Sorace e Terenzi 2003, Şigaher e Constantinou 2003, Sorace e Terenzi 2004a], ai cavi dissipativi [Peckan et al. 2000, Sorace e Terenzi 2003b,c] ed, infine, ad altri tipi d'installazione attualmente in fase di concepimento e di messa a punto.

Nonostante l'ampio lavoro di ricerca già svolto, qui richiamato in estrema sintesi, considerevoli spazi di studio restano ancora aperti con principale riguardo al perfezionamento ed all'arricchimento delle procedure di progetto sin qui proposte per i diversi sistemi di protezione includenti i dispositivi siliconici, alle conseguenti possibili ricadute sulle normative vigenti, ancora caratterizzate da approcci relativamente schematici e convenzionali, alle metodologie di qualificazione e di accettazione dei dispositivi, nonché, complessivamente, all'applicazione pratica dei sistemi considerati. Tali aspetti, in aggiunta all'analisi di azioni sismiche anomale, ed in particolare di terremoti "near-fault", costituiscono proprio gli obiettivi della ricerca assegnata alla presente UR, nell'ambito di questo Progetto. Nel seguito è presentato un altrettanto sintetico stato dell'arte riguardo alle due configurazioni sulle quali è focalizzata l'attenzione nella ricerca, ossia i sistemi d'isolamento con smorzamento supplementare ed i controventi dissipativi.

7.2 Sistemi d'isolamento sismico includenti dispositivi fluido-viscosi

Tale tecnologia è stata relativamente poco analizzata dal gruppo di ricerca dell'Università di Buffalo e del MCEER, pur essendo segnalate alcune singole realizzazioni nel campo dell'adeguamento sismico negli Stati Uniti [Constantinou et al. 1998, Soong e Spencer 2002]. Assai maggior spazio è stato invece dedicato all'argomento da parte del gruppo afferente alle Università di Udine e di Firenze, con attività sperimentali, di modellazione analitica e numerica, di definizione di procedure di progetto, ed infine, come sopra ricordato, di prima concreta realizzazione di un edificio dotato del sistema in questione. Il sistema considerato prevede, in particolare, l'inserimento di appoggi scorrevoli in acciaio-PTFE, in qualità di isolatori, oltre a dispositivi siliconici di tipo molla-smorzatore. Parti di tali attività sono state svolte nell'ambito di un Progetto MIUR 2000 (coordinato dal Prof. De Luca), in cui è stato sperimentato, presso il Laboratorio di Strutture dell'Università di Firenze, un telaio in acciaio a tre piani in scala 1:2 [Sorace e Terenzi 2001a], nonché del Progetto europeo DISPASS (coordinato dal responsabile della presente UR), in cui sono state condotte prove cicliche e pseudodinamiche con sottostrutturazione, presso il Laboratorio ELSA del Joint Research Centre di Ispra [Molina et al. 2004, Sorace e Terenzi 2004], su di un assemblaggio del sistema simulante l'applicazione dello stesso alla base di un telaio in acciaio a tre piani in scala 2:3. Unitamente agli aspetti di modellazione, sviluppati coerentemente alle leggi analitiche ed alle strategie agli elementi finiti trattate nella relativa bibliografia citata al punto 1.1, una parte consistente degli studi sviluppati ha riguardato gli aspetti di formulazione di metodi di progetto, non esistendo altrove riferimenti, se non del tutto qualitativi, su tale argomento. In [Sorace e Terenzi 2001a] è stata, in particolare, definita una procedura completa, operante in campo dinamico non lineare, basata sull'impiego di un'equazione esplicita di progetto mediante la quale, una volta stabilito il periodo fondamentale dell'edificio in condizioni isolate, è possibile determinare in via preliminare il parametro "critico" del sistema, rappresentato dal coefficiente di smorzamento dei dispositivi siliconici. Tale procedura è stata dettagliatamente applicata in [Sorace e Terenzi 2001b], a scopo dimostrativo, a due strutture a cinque piani, rispettivamente, in acciaio ed in cemento armato, ed è stata successivamente utilizzata nell'analisi progettuale della struttura oggetto di sperimentazione nel Progetto DISPASS [Molina et al. 2004] e dell'edificio reale trattato in [Sorace e Terenzi 2004b, 2005]. In ciascun caso la procedura proposta ha fornito esiti soddisfacenti, essendo sempre confermate dall'analisi di verifica finale le previsioni di risposta formulate in fase preliminare tramite la suddetta equazione di progetto.

7.3 Sistemi di controventi dissipativi includenti dispositivi fluido-viscosi

Le attività di ricerca sui controventi dissipativi incorporanti dispositivi fluido-viscosi di varia tipologia (ossia, a parte i siliconici Jarret, anche apparecchi a media non linearità o pressoché lineari) hanno visto impegnati studiosi anche al di fuori dei due gruppi di ricerca maggiormente attivi sull'argomento. In particolare, si segnalano numerosi recenti contributi per quanto attiene al posizionamento ed al dimensionamento ottimale, per via "algoritmica", degli smorzatori [Gluck et al. 1996, Singh e Moreschi 2002, Xu e Teng 2002, Martinez-Rodrigo e Romero 2003, Uetani et al. 2003]. Le attività sperimentali hanno essenzialmente riguardato, per il gruppo di Buffalo-MCEER, campagne di prove su tavola vibrante condotte su modelli in scala ridotta caratterizzati da disposizioni coassiali dei dissipatori rispetto alle aste diagonali di supporto ([Constantinou e Symans 1992] – telaio in acciaio a tre piani in scala 1:4 incorporante dispositivi Taylor moderatamente non lineari; [Reinhorn et al. 1995] – telaio in cemento armato in scala 1:3, con lo stesso tipo di smorzatori; [Peckan et al. 1995] – prove sul medesimo telaio, in questo caso equipaggiato con dispositivi Jarret;

[Constantinou et al. 2001, Şığaher and Constantinou 2003] – telaio in acciaio in scala 1:2 dotato, rispettivamente, degli innovativi sistemi “toggle-brace-damper” e “scissor-jack-damper”, includenti dispositivi siliconici). Da parte del gruppo delle Università di Udine e di Firenze si segnalano, altresì, campagne di prove pseudodinamiche su di un telaio in cemento armato a tre piani in scala reale e di un telaio in acciaio a tre piani in scala 2:3, condotte, nell’ambito del sopra citato Progetto DISPASS, presso il Laboratorio ELSA [Sorace e Terenzi 2003a, 2004a]. In questi casi, l’installazione degli smorzatori è avvenuta all’apice di aste disposte a “K”.

Rimandando anche in questo caso, per gli aspetti di modellazione, ai riferimenti già presentati al punto 1.1, relativamente alle metodologie di progetto si segnalano principalmente tre approcci. Il primo, finalizzato all’impiego in analisi push-over con spettro di capacità [Peckan et al. 1999], è basato sulla definizione di un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente che tiene conto della trasformazione dal tradizionale spettro di pseudo-velocità al corrispondente spettro di velocità effettiva, in considerazione dell’elevato livello di dissipazione connesso al sistema di protezione considerato. Tale metodo, peraltro, conduce ad una valutazione “globale” del coefficiente di smorzamento, il che lo rende scarsamente utilizzabile nel progetto di controventi dissipativi distribuiti lungo l’altezza di edifici multipiano (l’applicazione più diretta essendo prevista, infatti, per il sistema a cavi dissipativi). Una procedura essenzialmente impiegabile in ambito di analisi modale è proposta in [Hanson e Soong 2001], dove la scelta iniziale del coefficiente di smorzamento, comunque arbitraria, è posta in relazione alla prestazione richiesta in termini deformativi alla struttura protetta e, conseguentemente, al valore di tentativo del rapporto di smorzamento equivalente del sistema in grado di garantire tale prestazione. In [Sorace e Terenzi 1999], infine, è presentata una procedura basata su di un criterio energetico che prevede, nell’ambito di un’analisi dinamica non lineare, di assegnare ai dissipatori installati ad ogni piano della struttura una prestabilita aliquota dell’energia totale d’ingresso a quel piano. Diversamente dai primi due metodi, quest’ultima procedura, corredata di più dettagliate indicazioni d’impiego in [Sorace e Terenzi 2003a, 2004a], consente di ottenere una diretta valutazione della richiesta di dissipazione piano per piano e, pertanto, del coefficiente di smorzamento da attribuire all’insieme dei dispositivi in esso presenti (da cui discende immediatamente il valore di ciascuno, essendo gli apparecchi a ciascun piano tra loro identici). Al contempo, i risultati di un dimensionamento così concepito portano a differenziare, già in fase preliminare, le prestazioni dissipative richieste al sistema alla diverse quote di piano dell’edificio. Dal punto di vista delle applicazioni concrete, si assiste ad un numero ancora abbastanza limitato di realizzazioni [Constantinou et al. 1998, Hanson e Soong 2001, Miyamoto e Hanson 2003] rispetto a sistemi di controventi incorporanti altri tipi di dispositivi, soprattutto a causa del più recente sviluppo di studi metodici sull’impiego degli smorzatori fluido-viscosi in tale configurazione strutturale. Gli elevati livelli di prestazione accertati a seguito degli studi sin qui condotti sembrano, comunque, offrire interessanti spazi di diffusione, principalmente per i dispositivi siliconici, sul mercato internazionale delle costruzioni.

7.4 Attività previste nel secondo semestre

In ottemperanza alle linee di programma definite in sede di proposta del Progetto, le attività previste per il secondo semestre riguarderanno: a) la predisposizione o il completamento dei modelli computazionali degli edifici assunti a casi di studio per l’applicazione sia del sistema d’isolamento e dissipazione alla base sia dei controventi dissipativi; b) l’applicazione in chiave dimostrativa, a tali casi di studio, delle procedure di progetto richiamate ai punti 1.2 e 1.3, ed il loro confronto con gli approcci convenzionali offerti dalle attuali normative sismiche; c) la definizione e la generazione di modelli analitici di terremoti “near fault”, utilizzando leggi di tipo “cycloidal pulse”, od impulsi di spostamento “forward-and-back” espressi mediante funzioni polinomiali; d) sviluppo di indagini preliminari, mediante i suddetti segnali “near fault”, su modelli dinamici semplificati di strutture dotate del sistema d’isolamento e dissipazione alla base, ed introduzione dei segnali individuati come maggiormente critici all’interno dei modelli computazionali di cui al punto a).

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Chiarugi A., Sorace S. and Terenzi G. (1996). Optimal design parameters of fluid viscous base-isolating devices. In: “Structural Dynamics.” Proc., Eurodyn ‘96 - Third European Conference on Structural Dynamics, Florence, Italy, A. A. Balkema, Rotterdam/Brookfield, 533-540.
- Chiarugi A., Sorace S. and Terenzi G. (2000). Effectiveness of viscous damped bracing systems for steel frames. Proc., 3rd International Conference on the Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas - STESSA 2000, Montreal, Canada, A. A. Balkema, Rotterdam/Brookfield, 379-385.
- Constantinou M. C. and Symans M. D. (1992). Experimental and analytical investigation of seismic response of structures with supplemental fluid viscous dampers. Technical Report No. NCEER-92-0032, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY.
- Constantinou M. C., Soong, T. T. and Dargush G. F. (1998). Passive energy dissipation systems for structural design and retrofit. Monograph series No. 1, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY.
- Constantinou, M.C., Tsopelas, P., Hammel, W., Şığaher, A.N. (2001). Toggle-brace-damper seismic energy dissipation systems. Journal of Structural Engineering ASCE, 127, 105-112.

- CSI (2004). SAP2000NL. Structural Analysis Programs - Theoretical and Users Manual. Version No. 9.03, Computers & Structures Inc., Berkeley, CA.
- FEMA-356 (2000). Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. Building Seismic Safety Council, FEMA, Washington, DC.
- Gluck N., Reinhorn A. M., Gluck J. and Levy R. (1996). Design of supplemental dampers for control of structures. *Journal of Structural Engineering ASCE*, 122, 1394-1399.
- Hanson R. D. and Soong T. T. (2001). Seismic design with supplemental energy dissipation devices. MNO-8, Earthquake Engineering Research Institute, Buffalo, New York.
- Martinez-Rodrigo M. and Romero M. L. (2003). An optimum retrofit strategy for moment resisting frames with nonlinear viscous dampers for seismic applications. *Engineering Structures*, 25, 913-925.
- Miyamoto K. and Hanson R. D. (2003). US design procedure of steel moment frames with viscous dampers. Proc., 3rd Conference on Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas – STESSA 2003, Naples, Italy, A. A. Balkema, Lisse, 627-632.
- Molina F.J., Sorace S., Terenzi G., Magonette G. and Viacoz B. (2004). Seismic tests on reinforced concrete and steel frames retrofitted with dissipative braces. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 33, 1373-1394.
- Pekcan G., Mander J. B. and Chen S. S. (1995). The seismic response of a 1:3 scale model R.C. structure with elastomeric spring dampers. *Earthquake Spectra*, 11, 249-267.
- Pekcan G., Mander J. B. and Chen S. S. (1999). Fundamental considerations for the design of non-linear viscous dampers. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28, 1405-1425.
- Pekcan G., Mander J. B. and Chen S. S. (2000). Balancing lateral loads using tendon-based supplemental damping system. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 126, 896-905.
- Reinhorn A. M., Li C. and Constantinou M. C. (1995). Experimental and analytical investigation of seismic retrofit of structures with supplemental damping: Part 1—Fluid viscous damping devices. Report No. NCEER-95-0001, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY.
- Şigaher A.N. and Constantinou M. C. (2003). Scissor-Jack-Damper energy dissipation system. *Earthquake Spectra*, 19, 133-158.
- Singh M. P. and Moreschi L. M. (2002). Optimal placement of dampers for passive response control. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, 955-976.
- Soong T. T. and Dargush G. F. (1997). *Passive energy dissipation systems in structural engineering*. Wiley, New York.
- Soong T. T. and Spencer B. F. (2002). Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice. *Engineering Structures*, 24, 243-259.
- Sorace S. and Terenzi G. (1999). Iterative design procedure of fluid viscous devices included in braced frames. Proc., EURO DYN '99 – 4th European Conference on Structural Dynamics, Prague, Czech Republic, A.A. Balkema, Rotterdam, 169-174.
- Sorace S. and Terenzi G. (2001a). Non-linear dynamic modelling and design procedure of FV spring-dampers for base isolation. *Engineering Structures*, 23, 1556-1567.
- Sorace S. and Terenzi G. (2001b). Non-linear dynamic design procedure of FV spring-dampers for base isolation^{3/4}frame building applications. *Engineering Structures*, 23, 1568-1576.
- Sorace S. and Terenzi G. (2002). Seismic evaluation and retrofit of historical churches. *Structural Engineering International*, IABSE, 12, 241-246.
- Sorace S. and Terenzi G. (2003a). Large-scale experimental validation of a design procedure for damped braced steel structures. Proc., STESSA 2003 – 4th International Conference on the Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas, Naples, Italy, A A Balkema, Lisse, 657-662.
- Sorace S. and Terenzi G. (2003b). An advanced seismic protection technology: the damped cable system. Proc., ASSCCA'03 – International Conference on Advances in Structures, Sydney, Australia, A. A. Balkema Publishers, 1185-1192.
- Sorace S. and Terenzi G. (2003c). Verification of damped cable system in the seismic rehabilitation of buildings. Proc., ERES '03 – 4th Conference on Earthquake Resistant Engineering Structures, Ancona, Italy, WIT Press, Southampton/Boston, 283-292.
- Sorace S. and Terenzi G. (2004a). Comparative experimental investigation on a R/C structure with/without damped braces. Proc., 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, IAEE-CAEE, Mira Digital Publishing, Paper No. 3461, CD-ROM.
- Sorace S. and Terenzi G. (2004b). Analisi progettuale di un edificio dotato di dispositivi fluido-viscosi ed appoggi scorrevoli alla base. Proc., 15th Italian Congress CTE, Bari, Italy, Collegio dei Tecnici dell'Industrializzazione Edilizia, Milan, Italy, 651-660.
- Sorace S. and Terenzi G. (2005). Application of a combined base isolation/supplemental damping seismic protection strategy to a public building in Florence. Proc., International Conference “250th Anniversary of the 1755 Lisbon Earthquake”, Lisbon, Portugal, 2005, LNEC Press, Lisbon, 481-486.
- Terenzi G. (1994). Effetti dissipativi nell'isolamento sismico [Damping effects in seismic isolation]. PhD dissertation, University of Florence, Florence, Italy (in Italian).
- Terenzi G. (1999). Dynamics of SDOF systems with nonlinear viscous damping. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 125, 956–963.
- Uang C. M. and Bertero V. V. (1988). Use of energy as a design criterion in earthquake-resistant design. Report No. UCB- EERC 88/18, University of California at Berkeley, Berkeley, CA.
- Uetani K., Tsuji M. and Takewaki I. (2003). Application of an optimum design method to practical building frames with viscous dampers and hysteretic dampers. *Engineering Structures*, 25, 579-592.
- Xu Y. L. and Teng J. (2002). Optimum design of active/passive control devices for tall buildings under earthquake excitation. *Structural Design of Tall*

8 Contributo dell'Unità di Ricerca c/o Univ. di Salerno (E5_UNISA - Resp.: Palazzo)

Titolo specifico del programma svolto dall'Unità di Ricerca: Sperimentazione del sistema di controllo combinato “Isolamento alla base e smorzamento di massa”.

8.1 Stato dell'arte relativo all'applicazione dei Tuned mass Damper

Negli ultimi venti anni, i sistemi a masse smorzanti (TMD – Tuned Mass Damping) sono stati installati in un gran numero di edifici ad elevato numero di piani in molte parti del mondo, principalmente negli Stati Uniti ed in Giappone. L'efficacia di tali sistemi di controllo nella riduzione delle vibrazioni indotte dall'azione del vento è riconosciuta in ambito scientifico da molto tempo [Kitamura et al. 1988], mentre la sua applicazione al controllo delle vibrazioni indotte da un sisma è ancora oggi oggetto di analisi ed approfondimento. I sistemi a masse smorzanti, infatti, necessitano di essere progettati in relazione alle caratteristiche dinamiche del sistema da proteggere, e svolgono una riduzione selettiva della risposta dinamica, sopprimendo le armoniche contenute in una banda limitata di frequenza. Essi, dunque, consentono sensibili riduzioni della risposta sismica nel caso in cui le eccitazioni presentino componenti rilevanti in corrispondenza della frequenza principale di moto della struttura [Villaverde 1994]; nel caso in cui, invece, l'energia in ingresso non sia concentrata su particolari frequenze ma diffusa su una regione spettrale ampia, diversi studi [Kaynia et al. 1981] hanno evidenziato una efficacia molto più limitata.

Durante lo stesso periodo, è cresciuto sensibilmente l'interesse della comunità scientifica nei confronti dell'isolamento sismico [Kelly 1990, ICSMRT SmiRT 1991]. Un gran numero di edifici sono stati costruiti dall'inizio degli anni '90 ad oggi utilizzando tecniche di isolamento alla base, in particolare in paesi ad elevato rischio sismico. Come noto, l'efficacia dell'isolamento è legata alla sua azione da "filtro passa-basso" nel campo di frequenze ove l'eccitazione sismica risulta avere un contenuto energetico maggiore. Tale regione spettrale è anche, generalmente, quella in cui viene a trovarsi la frequenza naturale di moto del sistema da proteggere. Tale effetto di filtro permette di ridurre l'impegno deformativo della sovrastruttura, concentrando la domanda sismica di spostamento in corrispondenza dei dispositivi di isolamento. Il problema principale, dunque, di tale strategia di controllo è che, nell'eventualità di eccitazioni sismiche caratterizzate da energia concentrata sulle basse frequenze, gli spostamenti al livello di base possono assumere valori incompatibili con la capacità degli organi di isolamento adottati.

L'idea più semplice per limitare tale problema è quella di applicare in corrispondenza del livello di isolamento dei dispositivi supplementari di dissipazione energetica. Tuttavia, diversi studi in letteratura [Palazzo e Petti 1995, Kelly 1999] hanno evidenziato come tale strategia determini un significativo incremento degli spostamenti interpiano e delle accelerazioni assolute di piano in corrispondenza della sovrastruttura, limitando di fatto l'effetto benefico ottenuto tramite l'isolamento sismico.

Osservando che, nei sistemi isolati, la risposta sismica è dominata dal contributo della prima forma modale, e che il TMD è in grado di ridurre considerevolmente il contributo alla risposta in una banda di frequenza assegnata, Palazzo e Petti hanno proposto [Palazzo e Petti 1994] la nuova idea di combinare tali due strategie in un unico sistema di controllo passivo (BI&TMD control system).

L'efficacia di tale sistema è legata alla simbiotica combinazione delle due strategie coinvolte. In particolare le principali proprietà del sistema combinato possono essere riassunte nei seguenti punti:

- la riduzione nella trasmissione delle componenti "pericolose" dell'eccitazione sismica alla sovrastruttura, ottenuta mediante l'introduzione dell'isolamento alla base;
- la modifica delle caratteristiche modali e dei fattori di partecipazione, che rende il primo modo dominante sulla risposta, dovuta all'introduzione dell'isolamento sismico;
- la capacità di ridurre il contributo dinamico del primo modo mediante l'utilizzo di masse smorzanti opportunamente progettate.

Con riferimento ad un sistema 3DOF, l'andamento della funzione di trasferimento che lega l'input sismico allo spostamento degli isolatori alla base è riportato in [Palazzo e Petti 1994]. Tale rappresentazione permette di cogliere in maniera immediata, sia lo spostamento della frequenza principale di vibrazione del sistema verso valori bassi, sia l'effetto dello smorzatore di massa, in grado, se opportunamente dimensionato, di abbattere il picco di risonanza nella risposta del sistema.

Come è immediato dedurre, le prestazioni sismiche del sistema BI&TMD sono intimamente legate ad un corretto dimensionamento dei parametri della massa smorzante. Numerosi studi sono presenti in letteratura relativamente al progetto ottimo di sistemi di controllo basati sull'impiego di smorzatori di massa nel caso di sistema principale caratterizzato da proprietà meccaniche note. I criteri di ottimizzazione perseguiti all'interno dei lavori in oggetto possono classificarsi in tre categorie [Asami et al. 2002]:

1. minimizzare il picco della funzione di trasferimento che lega la grandezza da controllare all'eccitazione sismica (criterio H_{∞});
2. minimizzare l'energia totale di vibrazione del sistema principale sull'intero spettro di frequenze (criterio H_2);
3. minimizzare il tempo di durata di moto transitorio del sistema (criterio di stabilizzazione).

Inoltre nell'ambito del problema di ottimo c'è da distinguere il caso di smorzamento nullo del sistema principale da quello di smorzamento non nullo. Nel primo caso, infatti, la soluzione del problema è nota in forma chiusa per ognuno dei criteri citati, nel secondo caso, invece, bisogna spesso accontentarsi di soluzioni di carattere numerico [Palazzo et al. 2004]. La tabella 1 presenta in forma riassuntiva i contributi

principali presenti in letteratura relativamente al problema in oggetto, mentre in tabella 2 sono riportate le soluzioni in forma chiusa relative al caso di sistema principale non smorzato.

Tabella 1: Stato dell'arte nella valutazione dei parametri ottimi di un TMD

No.	Caso particolare $\xi = 0$		Caso generale $\xi \neq 0$	
	Soluzione numerica	Soluzione esatta	Soluzione numerica	Soluzione esatta
1	Hahnkamm E. (1932) Brock J.E. (1946)	Nishihara O. & Matsuhisa H. (1997a)	Ikeda K. & Ioi T. (1978) Randall S.E. et al. (1981) Thompson A.G. (1981) Soom A. & Lee M. (1983) Sekiguchi H. & Asami T. (1984) Palazzo B., Petti L., De Lulius M. (2004)	
2		Iwata Y. (1982) Asami T. et al. (1991)	Asami T. et al. (1991)	Asami T., Nishihara O., Baz A.M. (2002)
3		Yamaguchi H. (1988) Nishihara O. & Matsuhisa H. (1997b)		Nishihara O. & Matsuhisa H. (1997)

Tabella 2: Soluzioni numeriche esatte al problema di ottimizzazione per sistema principale non smorzato ($\mu = m_{TMD} / m$)

No.	Accordo ottimo (ω_{TMD} / ω_1)	Optimum damping (ξ_{TMD})
1	$\frac{1}{1+\mu}$ soluzione approssimata $\frac{2}{1+\mu} \sqrt{\frac{2[16+23\mu+9\mu^2+2(2+\mu)\sqrt{4+3\mu}]}{3(64+80\mu+27\mu^2)}}$ soluzione esatta	$\sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}}$ soluzione approssimata $\frac{1}{4} \sqrt{\frac{8+9\mu-4\sqrt{4+3\mu}}{(1+\mu)}}$ soluzione esatta
2	$\frac{1}{1+\mu} \sqrt{\frac{2+\mu}{\mu}}$	$\sqrt{\frac{\mu\sqrt{4+3\mu}}{8(1+\mu)(2+\mu)}}$
3	$\frac{1}{1+\mu}$	$\sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}}$

Il dimensionamento della massa smorzante, tuttavia, è compiuto nell'ipotesi di perfetta conoscenza delle caratteristiche dinamiche del sistema da proteggere. Come noto tali caratteristiche possono essere identificate in maniera approssimata, il che può portare ad un "mistuning" della massa ausiliaria. L'analisi degli effetti di un errore nell'accordo del sistema sono stati oggetto di diversi studi tesi a dimostrare la non robustezza della strategia [Li and Liu 2002, Jangid 1999]. Tuttavia in relazione al sistema BI&TMD, una vasta sperimentazione numerica [De Ligio et al. 1997] ha dimostrato che per una ampia classe di eccitazioni sismiche sia sintetiche che registrate, errori del 5-10% nella sintonizzazione della massa smorzante non comportano significative variazioni della risposta sismica del sistema combinato.

Passando agli aspetti applicativi della strategia di controllo basata sull'uso di TMDs, il problema di progetto della massa smorzante generalmente si presenta decisamente più articolato rispetto al caso unidimensionale. La risposta sismica in presenza di accoppiamento dinamico latero-torsionale dovuto all'eccentricità tra baricentro delle masse e delle rigidità del sistema richiede una capacità di controllo di più modi di vibrazione. In tempi recenti sono stati condotti diversi studi [Singh et al. 2002, Palazzo et al. 2005] sulla possibilità di utilizzare un sistema a più masse (MTMD – Multiple Tuned Mass Damper) al fine di ridurre gli effetti legati al moto torsionale di sistemi semplici. Tali studi hanno evidenziato l'efficacia della strategia in oggetto, sottolineando l'opportunità di ulteriori studi al fine di definire criteri di progetto semplici e affidabili. Inoltre, in caso di sisma "impulsivo" (near fault earthquake) il TMD non è in grado di fornire delle azioni di controllo significative nelle fasi iniziali essendo un oggetto dotato di una propria dinamica e quindi soggetto ad un transitorio prima di essere pienamente efficiente. Studi sui vantaggi dell'utilizzo di sistemi di controllo MTMD rispetto al singolo TMD sono oggetto di diversi lavori in letteratura [Clark 1988, Chen 1996, Chen and Wu 2003]. Essi hanno evidenziato come, anche con un progetto non ottimo delle caratteristiche del sistema MTMD, esso consente prestazioni superiori a quelle di un singolo TMD anche nel caso in cui le eccitazioni sismiche considerate siano caratterizzate da energia elevata in corrispondenza della frequenza fondamentale di moto della struttura. Chiaramente tali prestazioni si pagano in termini di una maggiore complessità realizzativa del sistema, che comporta dei costi più elevati.

La complessità del problema legato al progetto dei "mass damper" è indirettamente sottolineata dal numero limitato di applicazioni sul campo di tale tecnologia. Allo stato le uniche applicazioni in cui un TMD è stato progettato per il controllo delle vibrazioni indotte da sisma sono il Chiba Port Tower e l'MHS Building di Tokyo. In particolare nel caso della Port Tower di Chiba si trattava di definire e progettare una tecnologia che permettesse lo sviluppo nell'ambito di un'area limitata di un meccanismo che portasse una massa di 10 o 15 tonnellate ad avere spostamenti superiori al metro [Kitamura et al. 1988]. Più frequenti sono invece, le

realizzazioni in cui lo smorzamento di massa ha lo scopo di mitigare l'effetto del vento su edifici ad elevato numero di piani, ovvero sui cavi di ponti sospesi o strallati.

Anche nel campo delle analisi sperimentali su modelli in scala esistono ben pochi riferimenti in letteratura per lo più legati a strutture benchmark o a modelli in scala di applicazioni da realizzarsi.

Lo stato dell'arte, dunque, presenta un quadro in cui a dispetto della grande mole di studi concettuali e numerici sull'impiego dello smorzamento di massa, la parte legata alla sperimentazione in scala e all'applicazione sul campo appare fortemente limitata, soprattutto se si pensa alle potenzialità che il sistema di controllo a masse oscillanti può offrire in relazione agli enormi passi avanti compiuti nell'ambito delle tecnologie applicative.

In relazione al sistema combinato BI&TMD tali considerazioni risultano ancora più consistenti per la circostanza che la concezione di tale strategia è più recente. Non esiste al mondo alcuna applicazione pratica di tale strategia di controllo, ne è stata mai condotta una campagna sperimentale che permetta di valutarne le peculiarità rispetto all'impiego separato delle due strategie. Il programma di ricerca a compiersi ha come obiettivo proprio tali analisi da svolgersi parallelamente sia in campo numerico che in campo sperimentale, al fine di giungere a delle linee guida che individuino gli aspetti principali del problema di progetto e ne forniscano, sulla base dei dati acquisiti, delle soluzioni praticabili e affidabili.

8.2 Attività previste nel secondo semestre

In accordo al programma temporale delle attività allegato al progetto, per il secondo semestre è previsto:

1. Progettazione della sperimentazione finalizzata a valutare l'efficacia dello smorzamento di massa nel controllo della risposta sismica di sistemi dotati di isolamento alla base per mezzo di modelli in scala.
2. Implementazione della strategia combinata isolamento e smorzamento di massa su modelli benchmark di edifici isolati alla base al fine di compararne le prestazioni con altre metodologie di controllo.
3. Analisi di fattibilità sull'applicazione della strategia combinata isolamento e smorzamento di massa nel recupero sismico di costruzioni esistenti.
4. Redazione di una bibliografia sullo stato dell'arte in merito all'applicazione dello smorzamento di massa e sulla strategia di controllo ottenuta dalla combinazione di questi con l'isolamento alla base.

Per quanto concerne il primo aspetto è prevista la progettazione di un programma di prove da condurre con il supporto dei laboratori afferenti al progetto. In particolare, si valuterà e studierà la possibilità di realizzare un modello in scala dotato di isolamento e smorzamento di massa.

In tale semestre è inoltre prevista l'implementazione numerica dello smorzamento di massa sul modello benchmark adottata in campo internazionale per valutare in modo comparato le prestazioni di sistemi di controllo della risposta sismica di strutture dotate di isolamento alla base. In particolare, il modello benchmark è costituito da un edificio ad otto livelli con struttura intelaiata in acciaio e pianta asimmetrica. La struttura benchmark è descritta da un modello numerico in ambiente MATLAB.

Infine, allo scopo di valutare l'applicabilità di tale strategia combinata di controllo a costruzioni esistenti si esaminerà il caso dell'Ospedale di Villa d'Agri (PZ) già oggetto di studio nell'ambito di un intervento di adeguamento sismico per mezzo di isolamento alla base.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Asami T. et al. (1991). Optimum Design of Dynamic Absorbers for a System Subjected to Random Excitation. JSME Int. J., Ser. III, 34-2, pp. 218–226.
- Asami T. and Hosokawa Y. (1995). Approximate Expression for Design of Optimal Dynamic Absorbers Attached to Damped Linear Systems. 2nd Report, Optimization Process Based on the Fixed-Points Theory, Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., Ser. C, 61-583, pp. 915–921, (in Japanese).
- Asami T., Nishihara O. and Baz A.M. (2002). Analytical solutions to H_{∞} and H_2 optimization of dynamic vibration absorbers attached to damped linear systems. Journal of Vibration and Acoustics, 124:67–78.
- Brock J. E. (1946). A Note on the Damped Vibration Absorber. ASME Journal of Applied Mechanics, 13-4, p. A-284.
- Chen G. (1996). Multi-stage tuned mass damper. Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico, 1996; Paper No. 1326.
- Chen G. and Wu J. (2003). Experimental study on multiple tuned mass dampers to reduce seismic responses of a three-storey building structure. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 32, 793–810.
- Clark A. J. (1988). Multiple passive tuned mass dampers for reducing earthquake induced building motion. Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering, 2–9 August, Tokyo-Kyoto, Japan, V, 1988; 779–784.
- De Ligio M., Palazzo B. and Petti L. (1997). Response of Base Isolated system equipped with tuned mass dampers to random excitations. Journal of Structural Control - Vol. 4 n. 1.
- Den Hartog J. P. (1956). Mechanical Vibrations. 4th ed., McGraw-Hill, New York.
- Hahnkamm E. (1932). Die Dämpfung von Fundamentalschwingungen bei veränderlicher Erregerfrequenz. Ing. Arch., 4, pp. 192–201, (in German).
- Kaynia A. M., Veneziano D. and Biggs J. M. (1981). Seismic effectiveness of Tuned Mass Dampers. Journal of Structural Division, ASCE, 107, 1465-1484.
- Kelly J. M. (1990). Base Isolation: Linear Theory and Design. Earthquake Spectra, vol. 6, n. 2.
- Kelly J. M. (1999). Role of Damping in Seismic Isolation. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 28: 3-20.
- Kitamura H., Fujita T., Teramoto T. and Kibara H. (1988). Design and Analysis of a Tower Structure with a Tuned Mass Damper.

- Proceedings of 9th World Conference Earthquake Engineering, Japan, 8, 415-420.
- Ikeda K. and Ioi T. (1978). On the Dynamic Vibration Damped Absorber of the Vibration System. Bull. JSME, 21-151, pp. 64–71.
- Iwata Y. (1982). On the Construction of the Dynamic Vibration Absorbers. Jpn. Soc. Mech. Eng., No. 820-8, pp. 150–152.
- Jangid R. S. (1999). Optimum multiple tuned mass dampers for baseexcited undamped system. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 28, 1041–1049.
- Li and Liu (2002). Further characteristics for multiple tuned mass dampers. Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 128, pp. 1362-1365.
- Nishihara O. and Matsuhisa H. (1997a). Design and Tuning of Vibration Control Devices via Stability Criterion. Jpn. Soc. Mech. Eng., No. 97-10-1, pp. 165–168, (in Japanese).
- Nishihara O. and Matsuhisa H. (1997b). Design of a Dynamic Vibration Absorber for Minimization of Maximum Amplitude Magnification Factor Derivation of Algebraic Exact Solution. Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., Ser. C, 63-614, pp. 3438–3445, (in Japanese).
- Palazzo B. and Petti L. (1994). Seismic Response Control in Base Isolated Systems using Tuned Mass Dampers. Proceedings of First World Conference on Structural Control, August 3-5, 1994 Los Angeles, California.
- Palazzo B. and Petti L. (1995). Seismic Response Control of Base Isolated Systems using Tuned Mass Dampers. European Earthquake Engineering, Vol. IX n° 2, pages 3-13.
- Palazzo B., Petti L. and De Lullis M. (2004). A passive robust control strategy: Base Isolation System and Tuned Mass Damping. Proceedings of the 3th European Conference on Structural Control, Vienna
- Palazzo B., Petti L. and De Lullis M. (2005). Optimal robust design of tuned mass damper for controlling torsional response of assymetric-plan systems. Proceedings of Sixth European Conference on Structural Dynamics- Eurodyn 2005.
- Randall S. E., Halsted III D. M. and Taylor D. L. (1981). Optimum Vibration Absorbers for Linear Damped Systems. ASME Journal of Mechanical Design, 103-4, pp. 908–913.
- Sekiguchi H. and Asami T. (1984). Theory of Vibration Isolation of a System with Two Degrees of Freedom. Bull. JSME, 27-234, pp. 2839–2846.
- Seismic Isolation and Response Control for Nuclear and Non-nuclear structures, (1991). Special issue for the Exhibition of the 11th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology SMIRT 11 Tokyo, Japan.
- Singh M. P., Singh S. and Moreschi L. M. (2002). Tuned mass dampers for response control of torsional buildings. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 31, 749–769.
- Soom A. and Lee M. (1983). Optimal Design of Linear and Nonlinear Vibration Absorbers for Damped Systems. ASME Journal of Vibration and Acoustic, 105-1, pp. 112–119.
- Thompson A. G. (1981). Optimum Tuning and Damping of a Dynamic Vibration Absorber Applied to a Force Excited and Damped Primary System. Journal of Sound and Vibrations, 77-3, pp. 403–415.
- Villaverde R. (1994). Seismic control of structure with damped resonant appendages. Proceedings First World Conference on Structural Control, Vol. 1, WP4-113-WP4-122.
- Yamaguchi H. (1988). Damping of Transient Vibration by a Dynamic Absorber. Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., Ser. C, 54-499, pp. 561–568, (in Japanese).

9 Contributo dell'Unità di Ricerca c/o Univ. degli Studi di Camerino (E6_UNICAM - Resp.: Dall'Asta)

Titolo specifico del programma svolto dall'Unità di Ricerca: *Controllo della risposta dinamica di telai esistenti in c.a. mediante dispositivi in gomma ad alto smorzamento e mediante controventi dissipativi con aste di acciaio ad instabilità impedita.*

9.1 Dispositivi elasto-plastici ad instabilità impedita

I dispositivi basati su materiali elasto-plastici (acciaio o alluminio) hanno trovato una discreta diffusione per la loro facilità di realizzazione e per alcuni aspetti caratteristici del loro comportamento, indipendente dalla velocità di deformazione e dalle variazioni di temperatura. In passato sono stati concepiti e realizzati diversi dispositivi basati su deformazioni inelastiche flessionali o torsionali di elementi monodimensionali e bidimensionali (ADAS, TADAS). Negli ultimi anni è nato un particolare interesse per alcune nuove tipologie come i controventi dissipativi eccentrici o quelli concentrici ad instabilità impedita (Buckling Restrained Braces, BRB). Questa ultima tipologia risulta particolarmente interessante negli interventi di adeguamento di edifici esistenti intelaiati in quanto permette di incrementare la rigidità e fornire adeguati valori di energia dissipata anche nei limiti di deformazione imposti dalla ridotta duttilità del telaio. Il principio di base di questo tipo di controventi dissipativi è quello di permettere ampie escursioni in campo plastico anche al diagonale compresso del controvento evitando che si instabilizzi mediante elementi esterni rigidi che lo avvolgono. Sono state proposte diverse soluzioni costruttive che permettono all'elemento compresso di scorrere e di dilatarsi trasversalmente senza che si sviluppino significative tensioni tangenziali e di sconfinamento. In tal modo il nucleo interno sottoposto a cicli di trazione e compressione dissipa energia tramite cicli di isteresi quasi simmetrici. Le prime applicazioni risalgono agli anni 90. In particolare, due tipi di BRB sono stati proposti da [Nagao and Takahashi 1992, Watanabe and Nakamura 1992] nella 10a WCEE. I primi proposero un sistema costituito da un tubolare quadro in acciaio posto all'interno di una sezione in cemento armato tramite l'interposizione di un foglio di polietilene. I secondi proposero un'asta tubolare interna rivestita di una sostanza lubrificante ed inserita all'interno di un profilato quadrato cavo in acciaio riempito di calcestruzzo. I risultati relativi al primo sistema, ottenuti tramite tests a scala reale su provini con diverse disposizioni di armatura, posero in evidenza l'influenza della rigidità e della resistenza dell'elemento

esterno di calcestruzzo nel contrastare efficacemente l'instabilizzazione del nucleo interno. Numerosi altri autori hanno focalizzato la loro attenzione su dispositivi realizzati tramite aste in acciaio annegate in sezioni in c.a., dove il problema dell'influenza della resistenza della sezione in c.a. può essere superato utilizzando un ricoprimento costituito da una sezione cava in acciaio come quello proposto da Watanabe and Nakamura. In tali dispositivi al ricoprimento esterno è affidato il compito di contrastare ogni possibile azione flettente, mentre il nucleo è progettato in modo da assorbire esclusivamente le azioni assiali. Successivamente sono stati proposti altri dispositivi molto simili a quello studiato da Watanabe and Nakamura, con nuclei interni diversi che vanno dai profili tubolari a barre piene alle aste con sezioni ad L od a croce, tutti inseriti all'interno di elementi cavi esterni riempiti di calcestruzzo. La facilità di realizzazione di tali dispositivi ha favorito la loro commercializzazione e la loro applicazione. In particolare [Black et al. 2002] hanno condotto un programma di prove sperimentali per la caratterizzazione del comportamento dinamico di alcuni dispositivi disponibili in commercio. Sono state analizzate diverse tipologie in accordo con le raccomandazioni proposte da SEAOC (Structural Engineers Association of California). Tali tests hanno dimostrato la stabilità e la ripetibilità della risposta dei dispositivi testati e la loro conformità alle raccomandazioni SEAOC sia in termini di deformazioni ultime che in termini di deformazioni plastiche accumulate. La risposta dei dispositivi testati è risultata tipicamente bilineare con comportamento moderatamente hardening di tipo cinematico pressoché simmetrico (differenze del 10% tra trazione e compressione). Nello stesso lavoro sono state condotte inoltre simulazioni numeriche del comportamento globale del dispositivo fatte con i modelli classici della plasticità, come il modello di Bouc-Wen. Tali simulazioni hanno condotto a risultati accurati e in accordo con le prove sperimentali. Più recentemente sono stati sviluppati modelli più sofisticati che includono anche i fenomeni di contatto [Usami et al 2003].

Il progetto di ricerca prevede anche una parte sperimentale in cui si intende sottoporre a prova dispositivi realizzati dalla FIP costituiti da un nucleo interno in alluminio, da un tubo in acciaio esterno e da un riempimento in calcestruzzo. Tra il nucleo interno e il calcestruzzo è interposto uno strato di materiale distaccante con lo scopo di impedire la trasmissione di tensioni tangenziali o di confinamento. Questi dispositivi possono costituire un'intera asta del controvento o solamente una sua parte nel caso siano richieste rigidità elevate o spostamenti di progetto piccoli.

Una consistente parte della bibliografia esistente è rivolta alla valutazione degli aspetti progettuali legati all'applicazione di tali dispositivi a sistemi ad uno e più gradi di libertà. Su questo tema molte questioni sono ancora aperte e saranno oggetto di studio nella ricerca in corso. Gli aspetti principali riguardano l'identificazione dei parametri ottimali di progetto dei dissipatori al fine di minimizzare spostamenti ed accelerazioni della struttura di origine e la distribuzione dei dispositivi in pianta ed in alzato in modo tale da evitare fenomeni di localizzazione delle deformazioni plastiche che possono verificarsi in conseguenza della bassa rigidità in campo post-elastico dei dispositivi. Un interessante approccio progettuale è quello proposto in. Numerose analisi parametriche non lineari sono state inoltre condotte da [Sabelli et al. 2003] con l'obiettivo di determinare le principali caratteristiche della struttura che controllano la risposta del sistema in relazione al sisma in ingresso.

9.2 Dispositivi in gomma ad alto smorzamento

Accanto ai controventi ad instabilità impedita il progetto di ricerca prevede un approfondimento sul comportamento di sistemi dissipativi costituiti da controventi incorporanti dispositivi in gomma ad alto smorzamento. Tali dispositivi risultano spesso vantaggiosi in quanto le gomme sono un materiale a memoria evanescente quindi non manifestano deformazioni permanenti dopo l'evento sismico (al contrario dei dispositivi elasto-plastici) ed inoltre permettono di dissipare energia anche con spostamenti laterali modesti ed in maniera scarsamente dipendente dalla velocità di deformazione (al contrario degli usuali dispositivi viscoelastici). A fronte di questi vantaggi esistono attualmente diversi problemi aperti per quanto riguarda la modellazione. In letteratura sono reperibili molti lavori sperimentali che mostrano come il comportamento di queste gomme sia influenzato da alcuni fenomeni inelastici come la dipendenza non lineare dalla velocità, l'esistenza di una curva di equilibrio di tipo isteretico ed il così detto effetto Mullins che può essere visto come una progressiva riduzione della rigidità e delle capacità dissipative al progredire della storia di deformazione. Un'ampia panoramica sul comportamento del materiale può essere trovata in [Lion 1997] e [Dorfmann and Ogden 2004]. Diversi lavori sono orientati alla modellazione di questi fenomeni, in particolare negli ultimi anni si è proceduto in maniera parallela in due direzioni. Da una parte molti lavori come [Govindjee and Simo 1991, Dorfmann and Ogden 2003] sono stati finalizzati alla modellazione dell'effetto Mullins tramite modelli basati sulla teoria del danno, senza considerare la dipendenza dal tempo e dalla velocità, solo nel lavoro di la teoria del danno viene estesa e applicata ad un modello viscoelastico. D'altra parte esistono una serie di lavori, come [Haupt and Sedlan 2001] orientati principalmente alla descrizione del comportamento dissipativo mediante modelli viscoelastici ed isteretici, trascurando l'effetto Mullins che si manifesta nei cicli iniziali. E' ancora aperta quindi la definizione di un modello completo in grado di tenere in

considerazione tutti i fenomeni caratteristici delle gomme sopra elencati. Un ulteriore aspetto da chiarire riguarda il fenomeno di healing, cioè di recupero in tempi brevi delle caratteristiche di rigidità iniziale. I codici più recenti (Fema 356) suggeriscono modelli molto semplificati proposti in relazione all'utilizzo delle gomme ad alta dissipazione nei dispositivi per l'isolamento sismico dove la dissipazione gioca un ruolo secondario. L'utilizzo di tali gomme all'interno di controventi dissipativi determina la necessità di indagini più approfondite sul loro comportamento dinamico. Recenti studi [Dall'Asta et al. 2005] sono stati finalizzati alla caratterizzazione dei fenomeni più importanti relativi al comportamento delle gomme sottoposte a carichi ciclici e allo sviluppo di leggi costitutive appropriate nel campo di deformazioni e velocità di deformazione di interesse per le applicazioni finalizzate alla riduzione degli effetti del sisma.

Per quanto riguarda le questioni relative ai parametri ottimali di progetto dei dissipatori in gomma e alla loro disposizione ottimale in pianta ed in alzato esistono ad oggi pochissimi lavori e l'argomento costituirà una parte importante della ricerca che si intende sviluppare.

9.3 Attività previste nel secondo semestre

Nel corso del secondo semestre verranno avviate le attività relative alla definizione di modelli costitutivi per i dispositivi di dissipazione in gomma e metallici ad instabilità impedita (durata prevista 12 mesi) e allo studio teorico del comportamento dinamico del sistema accoppiato struttura-dissipatore (durata prevista 18 mesi).

Per quanto riguarda gli approfondimenti sul comportamento dei dissipatori, la ricerca sarà inizialmente orientata allo studio dei dispositivi in gomma ad alto smorzamento. A tal riguardo si intende approfondire ulteriormente la ricognizione delle prove sperimentali disponibili in condizioni di taglio puro. Seguirà una prima elaborazione dei dati sperimentali finalizzata ad ottenere informazioni sulla dipendenza delle principali caratteristiche della risposta (rigidità e capacità dissipative) dalla velocità e dall'ampiezza della deformazione. In base ai risultati delle elaborazioni dai dati disponibili verrà inoltre valutata la necessità di integrare le prove sperimentali esistenti con ulteriori tests.

Parallelamente verranno esaminati gli approcci proposti in letteratura per la definizione di modelli costitutivi della gomma. L'obiettivo è quello di sviluppare un modello reologico in grado di descrivere i principali fenomeni che caratterizzano il comportamento del materiale e valutare l'affidabilità di eventuali modelli semplificati in termini di risposta tensionale e caratteristiche dissipative.

Tali modelli verranno implementati in un codice di calcolo che verrà appositamente sviluppato per eseguire analisi dinamiche non lineari nel dominio del tempo di sistemi ad un grado di libertà equipaggiati con dissipatori in gomma, col fine di caratterizzarne il comportamento dinamico sia in presenza di forzanti armoniche che sotto azioni sismiche.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Black C., Makris N. and Aiken I. (2002). Component testing , stability and characterization of buckling restrained "unbonded" braces. PEER report 2002/08 University of California, Berkeley.
- Dall'Asta A., Dezi L., Giacchetti R., Leoni G. and Ragni L. (2005). Cyclic behaviour of HDR dissipating devices: experimental tests and analytical model. Proceedings of 9th world seminar on seismic isolation, energy dissipation and active vibration control of structures, Kobe, Japan.
- Dorfmann A. and Ogden R. W. (2003). A pseudo-elastic model for loading, partial unloading and reloading of particle-reinforced rubber. *Int. J. Solids Struct.*, 40: 2699-2714.
- Dorfmann A. and Ogden R. W. (2004). A constitutive model for the Mullins effect with permanent set in particle-reinforced rubber. *Int. J. Solids Struct.*, 41:1855-1878.
- Govindjee S. and Simo J. C. (1991). A micro-mechanically based continuum damage model for carbon black filled-rubber incorporating the Mullins effect. *J.Mech. Phys. Solids*, 39: 87-112.
- Govindjee S. and Simo J. C. (1992). Mullins effect and the strain amplitude dependence of the storage modulus. *Int. J. Solids Struct.*, 29: 1737-1751.
- Haupt P. and Sedlan H. (2001). Viscoplasticity of elastomeric materials: experimental facts and constitutive modelling. *Arch. Appl. Mech.*, 71: 89-109.
- Iwata M., Kato T. and Wada A. (2003). Performance evaluation of buckling-restrained braces in damage-controlled structures. *Proc.of STESSA 2003*, 37-43.
- Lion A. A. (1997). Physically based method to represent the thermomechanical behaviour of elastomers. *Acta Mech.*, 123: 1-25.
- Nagao T. and Takahashi S. (1992). Development of reinforced concrete encased steel brace with high ductility. *Proc. of 10° WCEE*, vol.8, Madrid, Spain.
- Sabelli R., Mahin S. and Chang C. (2003). Seismic demands on steel braced frame buildings with buckling restrained braces. *Eng Struct* 25, 655-666.
- Usami T., Kasai A. and Kato M. (2003). Behavior of buckling-restrained brace members. *Proc. of STESSA 2003*, 211-216.
- Watanabe and Nakamura (1992). Study on the behavior of buildings using steel with low yield point. *Proc. of 10° WCEE*, vol.8, Madrid, Spain.
- Watanabe (1996). Some damage control criteria for a steel building with added hysteresis damper. *Proc. of 11° WCEE*, Acapulco, Mexico.

10 Contributo dell'Unità di Ricerca c/o Univ. di Bologna (E7_UNIBO - Resp.: Savoia)

Titolo specifico del programma svolto dall'Unità di Ricerca: *Metodologie di progettazione ed affidabilità di edifici protetti con sistemi di dissipazione sismica.*

10.1 Smorzamento strutturale e coefficienti di struttura per la progettazione in zona sismica di strutture pluripiano in c.a. protette con sistemi di dissipazione viscosa

A) *Modellazione del comportamento sperimentale degli smorzatori.*

Sono innanzitutto state esaminate le differenti tecnologie utilizzate per la realizzazione di sistemi di dissipazione viscosa. Le tipologie più comunemente utilizzate sono quelle a smorzatori di tipo viscoso con fluido silconico e quelle assimilabili agli "unbonded braces".

Per la loro maggiore diffusione, è stato deciso di concentrare lo studio principalmente sui dispositivi a fluido. Sono stati quindi studiati i principi di funzionamento delle principali tipologie di smorzatori viscosi a fluido silconico (Fip, Taylor, etc.) e raccolto un primo data-base di risultati sperimentali [Taylor and Constantinou 2002a, 2002b, Brown et al. 2001, Infanti et al. 2002, Benzoni and Seible 2001, Benzoni et al. 2003].

L'esame dei risultati sperimentali disponibili ha evidenziato che le prestazioni dello smorzatore in termini di energia dissipata per ciclo dipende, in modo più o meno rilevante a seconda del tipo di smorzatore, dai seguenti fattori: 1) diminuisce al crescere della temperatura del fluido silconico, e quindi al crescere del numero di cicli effettuati dal dispositivo; 2) dipende dalla frequenza del ciclo. Inoltre, la forma del ciclo di isteresi, compreso l'eventuale presenza di un termine di rigidità, è molto variabile da dispositivo e dispositivo (spesso esso rappresenta a tutti gli effetti un parametro che può essere deciso dal progettista), ma tuttavia molto stabile nel tempo. Per la complessità dei dispositivi, tali fenomeni devono essere certamente misurati dal punto di vista sperimentale, in quanto non possono essere predetti dal punto di vista teorico.

Sono stati quindi studiati i principali modelli proposti in letteratura per la modellazione degli isolatori, esaminandone le caratteristiche in termini di bontà di previsione del comportamento e possibilità di essere implementati in più complessi programmi di calcolo agli elementi finiti. In particolare sono stati studiati lo *Standard Mechanical Model* (o modello di Maxwell generalizzato) e il *Fractional Derivative Model*.

Con riferimento al comportamento reologico dei materiali viscosi, il comportamento del damper può essere descritto analiticamente attraverso lo *Standard Mechanical Model*. Tale modello, ampiamente utilizzato per caratterizzare le funzioni di rilassamento di un mezzo viscoelastico, è costituito da una serie di unità di Maxwell disposti in parallelo. È possibile scegliere il numero di unità e determinare le caratteristiche delle stesse (con particolare riferimento allo *storage modulus* e al *loss modulus*) attraverso prove sperimentali sul damper stesso. È importante notare che i parametri del modello possono essere ugualmente determinati dalla conoscenza dei dati sperimentali sia dal dominio del tempo che dal dominio delle frequenze [Park 2001, Singh et al. 2003].

Il *Fractional Derivative Model* è basato sul calcolo frazionario ed ha ricevuto considerevole attenzione in quanto la struttura standard del modello molla-smorzatore è implementata sostituendo agli operatori differenziali ordinari operatori differenziali frazionari. Così operando è possibile descrivere il comportamento di una vasta gamma di materiali viscosi con un numero ridotto di parametri [Ma kris and Constantinou 1991].

In tali modelli è possibile ricavare la dipendenza delle proprietà dello smorzatore in funzione della frequenza della forzante applicata.

Infine sono stati studiati anche modelli non-parametrici, in quanto essi hanno campo di applicazione a materiali con smorzamento non lineare, isteretici e misti, e non necessitano a priori della conoscenza dell'ordine della non linearità del sistema. Tali metodi si basano sulla determinazione della restoring force, associata al sistema non lineare di cui le caratteristiche fenomenologiche siano complesse o non trattabili con le teorie di identificazione parametrica. Di particolare interesse è l'utilizzo di polinomi di Chebyshev per l'approssimazione del comportamento del damper nel dominio del tempo [Wolfe et al. 2002].

B) *Comportamento non lineare di strutture con sistemi di dissipazione viscosa.*

Poiché uno degli obiettivi della ricerca è quello di condurre analisi dinamiche non lineari di strutture in c.a. con dispositivi di smorzamento, allo scopo di calibrare coefficienti di struttura che consentano una progettazione sismica nello spirito delle più recenti Normative (Eurocodici, Ordinanza 3274 [PCM 2003], Testo Unico), sono stati testati alcuni programmi di calcolo numerico d elementi finiti in campo non lineare. In particolare, sono state messe a confronto modellazioni di semplici telai piani in c.a. utilizzando

i programmi [OpenSees] (che si basa su una modellazione alle forze) e SismoStruct [SeismoSoft 2005] (modello agli spostamenti). Entrambi i programmi, basati su modelli a fibre, consentono al programmatore di intervenire, inserendo se necessario nuovi legami costitutivi per i materiali, e quindi appaiono indicati per il problema oggetto di studio.

Uno degli scopi dell'analisi è stato quello di verificare come i due programmi consentivano di modellare la diffusione delle deformazioni plastiche lungo l'elemento (cerniere plastiche diffuse), e quindi di ottenere corrette valutazioni delle curvature e degli spostamenti in regime plastico. Le indagini effettuate hanno mostrato che entrambi i programmi, a causa del legame softening utilizzato per la modellazione del calcestruzzo, hanno il problema numerico della localizzazione delle deformazioni, per cui l'approssimazione delle rotazioni ultime tende a peggiorare al crescere della discretizzazione in elementi finiti. Sono stati quindi elaborati dei criteri per definire la discretizzazione ottimale per un elemento strutturale (trave o pilastro), che consenta quindi di ottenere stime della lunghezza della porzione plasticizzata dell'elemento in accordo con le risultanze sperimentali.

Sono quindi in corso studi per consentire l'implementazione in tali programmi di leggi di comportamento per gli smorzatori calibrate a partire dalle risultanze sperimentali (vedi punto A).

10.2 Criteri di progettazione ed affidabilità di edifici multipiano con sistemi dissipativi a fluido sisliconico

È stata condotta una vasta attività di ricerca bibliografica sui sistemi di dissipazione e sulla loro applicazione ad edifici di tipo civile per la mitigazione dell'azione del sisma.

Tale ricerca bibliografica ha evidenziato come le principali problematiche connesse all'utilizzo di smorzatori possano essere raggruppate nelle seguenti tematiche.

1. Analisi dei principali criteri utilizzabili per la scelta progettuale (quanti e quale tipologia di smorzatori adottare per una data struttura, al duplice fine di ottenere specifici obiettivi prestazionali e di ottimizzare l'efficacia dei dispositivi stessi).
2. Studio dei problemi connessi alla realizzazione pratica di strutture dotate di tali dispositivi: specifiche tecniche da fornire ai produttori, efficacia degli smorzatori viscosi in caso di piccoli spostamenti, studio dei sistemi di connessione tra smorzatori e struttura, etc.

a) *Criteri progettuali.*

Per quanto riguarda la prima tematica, di grande interesse sia dal punto di vista scientifico che per le interessanti ricadute di tipo tecnico-applicativo, non sono disponibili a tutt'oggi metodologie consolidate per l'identificazione di sistemi ottimali di smorzamento. Le tecniche proposte finora possono essere ricondotte ad approcci di tipo fisico [Trombetti and Silvestri 2005], approcci di tipo numerico basati sull'utilizzo di algoritmi genetici [Singh and Moreschi 2002, Silvestri et al. 2003, Trombetti and Silvestri 2004, Silvestri et al. 2004] ed approcci di tipo numerico basati sull' "incremental inverse problem approach" [Takewaki 1997] e sullo "steepest direction search algorithm" [Takewaki 2000] e sulla "sequential procedure based on the degree of controllability" [Zhang and Soong 1992].

Per quanto riguarda la prima tecnica, l'U.O. di Bologna ha già da alcuni anni svolto molti studi, rivolti in particolare all'ottimizzazione di posizionamento e dimensioni degli smorzatori per edifici multipiano. È stato inoltre mostrato che, quando possibile, sistemi collegati a strutture molto rigide (quali nuclei di controventamento) sono da preferire, ed in tal caso, il dimensionamento ottimale deve essere fatto proporzionalmente alle masse di piano.

b) *Problemi di tipo applicativo.*

Per quanto riguarda i problemi connessi con la realizzazione pratica di sistemi di smorzamento per edifici multipiano, i contributi scientifici presenti in letteratura sono a tutt'oggi piuttosto limitati [Taylor 1999, Trombetti et al 2003, Coccoli et al. 2004] a cui si aggiungono i testi di [Soong and Dargush 1997, Constantinou et al. 1998, Hart and Wong 2000].

I principali problemi riscontrati riguardano il fatto che smorzatori a fluido esercitano la loro funzione solo in presenza di spostamenti di una certa entità (almeno dell'ordine del cm), e la necessità di realizzare particolari costruttivi ad hoc per il loro svincolamento alla struttura, anche in ragione delle elevate forze che devono essere trasferite dai dispositivi alla struttura. Tale aspetto può comportare evidenti problemi dal punto di vista costruttivo nel caso di utilizzo di sistemi di smorzamento per la protezione di edifici esistenti. È in corso una ricerca sulle varie tipologie di soluzioni adottate.

10.3 Strutture prefabbricate con sistemi dissipativi di protezione sismica: sperimentazione su un prodotto di struttura al vero

Come anticipato nel progetto triennale, si è concordata con una azienda produttrice di strutture prefabbricate la realizzazione di un prototipo di struttura a due piani. La struttura, realizzata in dimensioni leggermente ridotte, sarà soggetta a prove dinamiche mediante vibrodina (disponibile presso il Laboratorio del DISTART, forza massima 20 kN, campo di frequenza 1 – 25 Hz). Tali prove saranno condotte sulla struttura senza smorzatori e, successivamente, utilizzando differenti tipologie di smorzatori di tipo viscoso. Le prove saranno condotte con differenti livelli di forze (centrate in pianta o in posizione eccentrica). A partire dai dati rilevati durante le prove, saranno identificati i parametri modali della struttura mediante tecniche di identificazione dinamica.

Nei primi sei mesi è stato condotto uno studio di fattibilità di tale prototipo sperimentale. Il principale problema consiste nel riuscire ad ottenere, fissato il valore di forza massima applicabile al prototipo mediante vibrodina, spostamenti di interpiano apprezzabili, tali per cui si riesca ad attivare in modo sufficiente i dispositivi di dissipazione viscosa. Sono allo studio anche sistemi di prova non tradizionale, nei quali sia possibile eccitare alla base la struttura (e non mediante vibrodina posizionata sul secondo impalcato), al fine di simulare meglio l'azione del sisma. Infine, si sta progettando un sistema per il posizionamento di masse aggiuntive agli impalcati, ottenendo così sistemi strutturali con significative eccentricità del baricentro delle masse rispetto al baricentro delle rigidità, al fine di ottenere effetti torsionali significativi sulla struttura.

10.4 Strutture prefabbricate con sistemi dissipativi di protezione sismica: sperimentazione su un prodotto di struttura al vero

Nel secondo semestre del progetto di ricerca si intende proseguire nella modellazione numerica delle strutture dotate di smorzatori, nonché progettare il prototipo strutturale che sarà soggetto a prove nei due anni successivi. Con maggiori dettagli, il programma previsto è il seguente:

Indagini e modellazione numerica.

Saranno affrontati i problemi connessi con la modellazione in campo non lineare di strutture intelaiate in c.a. dotate di smorzatori. In particolare, sarà implementato in codici di calcolo non lineare (Opensees, Seismostruct) un elemento finito in grado di modellare il comportamento isteretico di uno smorzatore viscoso in regime dinamico.

Saranno quindi condotte le prime analisi per studiare, dal punto di vista numerico, le capacità di smorzamento dei dispositivi. A tale scopo, saranno condotte analisi dinamiche, prevedendo differenti tipologie di forzanti. I dati numerici ottenuti saranno quindi elaborati con tecniche di identificazione nel dominio del tempo e delle frequenze al fine di stimare le frequenze e soprattutto i coefficienti di smorzamenti effettivi della struttura con smorzatori.

Attività sperimentale.

Sarà progettato il prototipo strutturale che sarà soggetto a prove sperimentali in campo dinamico. Tale prototipo, in struttura prefabbricata, sarà quasi certamente a due piani e ad una campata nelle due direzioni nel piano. L'eccitazione dinamica prevista sarà fornita da una vibrodina, in grado di fornire una forza con andamento sinusoidale nel tempo e valore massimo pari a 20 kN. Allo scopo di ampliare le possibilità di utilizzo del prototipo, si intende realizzare lo stesso prevedendo una zattera di fondazione di massa opportuna e poggiate su elementi deformabili a taglio, al fine di poter prevedere anche di applicare la forza a livello della fondazione (simulando quindi una eccitazione alla base della struttura). Si intende anche prevedere la realizzazione di prove di rilascio, al fine di valutare le capacità di smorzamento del sistema.

Sono stati al momento presi contatti con la ditta Fip di Padova, che fornirà gli smorzatori, con la quale sono state discussi i criteri per il dimensionamento della struttura.

Si intende inoltre progettare il sistema in modo tale possa essere utilizzato anche da altre Unità Operative della Linea n. 7 per testare l'efficacia di altre metodologie di smorzamento delle azioni dinamiche (TMD, controventi dissipativi, etc.).

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Benzoni G. and Seible F. (2001). FIP TESIT Dampers. Caltrans SRMD Test Facility Report N. 2001/01, San Diego, CA.
 Benzoni G., Seible F. and Kyler M. R. (2003). TAYLOR RSR Dampers. Caltrans SRMD Test Facility Report N. 2003/02, Vol .1 e 2, San Diego, CA.
 Brown P., Aiken I. D. and Jafarzadeh F. J. (2001). Seismic Retrofit of the W. F. Bennett Federal Building. Modern Steel Construction, http://www.aisc.org/msc/0108_03_seismicretrofit.pdf.
 Ceccoli C., Trombetti T., Silvestri S. and Gasparini G. (2004). L'inserimento di smorzatori in strutture in c.a. per la mitigazione dell'azione sismica: un esempio applicativo. "Giornate AICAP 2004", Verona, 26-29 maggio 2004.
 Constantino M. C., Soong T. T. and Dargush G. F. (1998). Passive Energy Dissipation Systems for Structural Design and Retrofit. Monograph No. 1, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York.
 Hart G. C. and Wong K. (2000). Structural Dynamics for Structural Engineers. John Wiley & Sons, New York.
 Infanti S., Castellano M. G. and Benzoni G. (2002). Non-Linear Viscous Dampers: Testing and Recent Applications. ATC17-2 on Response Modification Technologies for Performance-Based Seismic Design.

- OpenSees. "OpenSees – Open System for Earthquake Engineering Simulation". Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley (USA), <http://opensees.berkeley.edu>.
- Ordinanza n. 3274 (2003). Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per la costruzione in zona sismica (in Italian).
- Park S. W. (2001). Analytical modelling of viscoelastic dampers for structural and vibration control. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 38, pp 8065-8092.
- Makris N. and Constantinou M. C. (1991). Fractional-Derivate Maxwell model for viscous dampers. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 117, No.9, pp.2708-2724.
- SeismoSoft. (2005). "SeismoStruct – A computer program for static and dynamic non-linear analysis of framed structures". <http://www.seismosoft.com>.
- Singh M. P., Verma N. P. and Moreschi L. M. (2003). Seismic analysis and design with Maxwell dampers. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 129, No. 3, pp. 273-282.
- Silvestri S., Trombetti T. and Ceccoli C. (2003). Inserting the Mass Proportional Damping (MPD) system in a concrete shear-type structure. *Structural Engineering and Mechanics*, Vol.16, pp. 177-193.
- Silvestri S., Trombetti T. and Ceccoli C. (2004). Optimal insertion of viscous dampers into shear-type structures: seismic performances and applicability of the MPD system. 13WCEE, Vancouver, B.C., Canada, 1-6 Agosto 2004, Paper No. 477.
- Singh M. P. and Moreschi L. M. (2002). Optimal placement of dampers for passive response control. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, No. 4, pp 955-976.
- Soong T. T. and Dargush G. F. (1997). *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*. John Wiley & Sons, Baffins Lane, Chichester, West Sussex PO19 1UD, England.
- Takewaki I. (1997). Optimal damper placement for minimum transfer functions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 26, pp 1113-1124.
- Takewaki I. (2000). An approach to stiffness-damping simultaneous optimisation. *CNAME*, Vol. 189, pp 641-650.
- Taylor D. P. (1999). Buildings: Design for Damping. Proceedings of the Boston Society of Civil Engineers, BSCES Fall 1999 Lecture Series, "Dynamics for Structures."
- Taylor D. P. and Constantinou M. C. (2002a). Fluid Dampers for Applications of Seismic Energy Dissipation and Seismic Isolation. Technical Report, Taylor Devices Inc., www.taylordevices.com, www.shockandvibration.com, www.seismicdamper.com.
- Taylor D. P. and Constantinou M. C. (2002b). Development and Testing of an Improved Fluid Damper Configuration for Structures having High Rigidity. Technical Report, Taylor Devices Inc., www.taylordevices.com, www.shockandvibration.com, www.seismicdamper.com.
- Trombetti T., Silvestri S., Ceccoli C. and Greco G. (2003). Effects of Taking into Consideration Realistic Force-Velocity Relationship of Viscous Dampers in the Optimisation of Damper Systems in Shear-Type Structures. ISEC 02 – Roma, 23-26 Settembre 2003.
- Trombetti T. and Silvestri S. (2004). Added viscous dampers in shear-type structures: the effectiveness of mass proportional damping. *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 8, No. 2, pp 275-313.
- Trombetti T. and Silvestri S. (2005). On the modal damping ratios of shear-type structures equipped with Rayleigh damping systems. *Journal of Sound and Vibration*, in stampa.
- Wolfe R. W., Masry S. F. and Caffrey J. (2002). Some structural health monitoring approaches for nonlinear hydraulic dampers. *Journal of Structural Control*, Vol. 9, pp. 5-18.
- Zhang R.H. and Soong T. T. (1992). Seismic design of viscoelastic dampers for structural applications. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 5, pp 1375-1392.

11 Contributo dell'Unità di Ricerca c/o Univ. di Napoli "Parthenope" (E8_UNIPARTH - Resp.: Occhiuzzi)

Titolo specifico del programma svolto dall'Unità di Ricerca: Il controllo delle vibrazioni di natura sismica mediante dissipatori semiattivi.

11.1 Introduzione

L'idea alla base dei sistemi di controllo con dissipatori semi-attivi consiste essenzialmente nel tentativo di migliorare i sistemi passivi di dissipazione mediante l'adozione di dispositivi capaci di variare in tempi rapidi o rapidissimi le proprie caratteristiche meccaniche in modo da ottimizzare le proprie capacità di riduzione della risposta strutturale.

La progettazione di un sistema di controllo passivo, infatti, prevede che siano fissate le condizioni operative al contorno sulla scorta delle quali viene selezionato il dispositivo di dissipazione. La struttura così controllata, pertanto, si comporterà come previsto in progetto fintanto che le condizioni operative ricalchino le ipotesi di progetto. I dispositivi semi-attivi, sfruttando la possibilità di variare i propri parametri meccanici in base ad una serie di regole predeterminate dette algoritmi di controllo, possono adattare il proprio comportamento alle condizioni operative di funzionamento. Nella maggior parte dei casi, i dissipatori semi-attivi rappresentano una versione evoluta di quelli passivi, da cui sono adattati, e le regole di variazione dei parametri di funzionamento sono basate sulla lettura, istante per istante, dei parametri che misurano la risposta strutturale. In altri termini, in base ai valori istantanei di spostamento, velocità e accelerazione associate ai gradi di libertà strutturale attivi. I dispositivi semi-attivi sono in grado di indurre modifiche temporanee ai valori di smorzamento strutturale e/o di rigidità in grado, ad esempio, di ottimizzare l'estrazione di energia o di eliminare le risonanze.

In linea di principio, pertanto, un sistema di controllo semi-attivo può venire classificato come un sistema passivo capace di "auto-ottimizzare" i propri parametri meccanici (smart device); tuttavia, poiché i dispositivi

semi-attivi derivano da quelli passivi, ne mantengono le caratteristiche generali di affidabilità pur consentendo la versatilità e l'adattabilità dei sistemi di controllo completamente attivi. A differenza di questi ultimi, però, richiedono per il funzionamento energie e potenze di vari ordini di grandezza inferiori, in modo da non dipendere dall'efficienza delle grandi life-line di distribuzione energetica, spesso compromessa durante gli eventi sismici di significativa entità.

11.2 Disamina critica delle applicazioni esistenti di sistemi di controllo con dissipatori

I sistemi di controllo semi-attivo, si è detto, possono venire riguardati come versioni evolute di quelli passivi. Nel caso specifico di sistemi di controllo strutturale basati su dissipatori, tuttavia, già l'impiego di dispositivi passivi risulta allo stato relativamente limitato e circoscritto da una serie di difficoltà operative. Per quanto concerne gli edifici si osserva che:

- per ottenere una efficace dissipazione energetica, sono richiesti valori significativamente elevati di spostamento o velocità dei gradi di libertà strutturale e, quindi, strutture relativamente flessibili;
- al di là dei costi iniziali di progetto, realizzazione dei dispositivi e montaggio nell'organismo strutturale, si introduce la necessità di effettuare una manutenzione programmata dei dispositivi medesimi, tema che nel campo delle costruzioni ordinarie sta appena muovendo i primi passi;
- l'installazione dei dispositivi, usualmente nei campi definiti da travi e solai degli edifici intelaiati, comporta una serie di limitazioni estetico-funzionali non sempre bene accette dai fruitori e dagli utenti.

In [Soong e Spencer 2002] è riportata una descrizione delle principali applicazioni in Giappone e negli Stati Uniti di sistemi di controllo strutturale basati su dissipatori passivi. Tali sistemi vengono classificati in smorzatori plastici metallici, smorzatori ad attrito, masse accordate, smorzatori viscoelastici e smorzatori a fluido viscoso. Solo gli ultimi due tipi risultano di interesse ai fini della presente ricerca, in quanto suscettibili di evoluzione in configurazione semi-attiva.

Per quanto concerne i dissipatori viscoelastici, nel lavoro citato vengono elencate 4 distinte applicazioni, delle quali la più significativa è rappresentata dall'adeguamento antisismico del Santa Clara County building (California), edificio a struttura intelaiata in acciaio di 13 piani. In Italia, una interessante applicazione è costituita dall'adeguamento antisismico della scuola Gentile Fermi di Fabriano, descritta in [Antonucci et al. 2001]. Per quanto concerne i dissipatori a fluido viscoso, lo stato dell'arte prima citato riporta un ampio numero di applicazioni. Fra queste, risulta significativo l'utilizzo di dissipatori viscosi congiuntamente al sistema di isolamento alla base relativo al complesso di 5 edifici del San Bernardino County Medical Center (California), descritto in [Constantinou e Symans 1993].

In ogni caso, il numero complessivo di applicazioni agli edifici di sistemi di controllo passivo basati su dispositivi viscosi o viscoelastici risulta modesto rispetto a quello, misurato in migliaia, delle applicazioni di sistemi di isolamento alla base. Probabilmente, oltre alle problematiche prima descritte, l'applicazione di sistemi di controllo con dispositivi viscosi o viscoelastici viene frenata anche dalle potenzialità attuali di tali sistemi in termini di riduzione della risposta strutturale: l'evoluzione alla configurazione semi-attiva, permettendo un significativo, anche se allo stato teorico, aumento delle prestazioni, potrebbe risultare determinante nel consentire una maggiore diffusione delle applicazioni.

Diversamente da quanto avviene per gli edifici, nel caso dei ponti stradali l'impiego di dissipatori viscosi quali elementi di accoppiamento controllato tra impalcati e sottostrutture è in rapido sviluppo ed il numero di applicazioni risulta in crescente aumento. Soprattutto nel caso di infrastrutture di nuova costruzione, ma anche nei casi di adeguamento antisismico, l'installazione di tali dispositivi non comporta effetti collaterali di significativa importanza: inoltre i costi risultano generalmente di modesta entità se rapportati all'onere economico globale, e le questioni legate alla manutenzione programmata dei dispositivi risultano in molti casi già nei programmi di molti enti gestori. Anche in questo caso, comunque, l'evoluzione alla configurazione semi-attiva può consentire nuovi, ulteriori sviluppi alla diffusione dell'impiego di dissipatori di energia quali strumenti di protezione sismica del costruito.

Trattandosi di una tecnologia introdotta molto più recentemente, le applicazioni di sistemi di controllo basate su dispositivi semi-attivi risultano in numero ancora molto modesto. La prima applicazione conosciuta è quella relativa al Kabori Research Complex in Giappone, documentata in [Kabori et al. 1993]. In questo caso, un dispositivo semi-attivo idraulico viene impiegato per accoppiare e disaccoppiare i controventi di un edificio metallico alla struttura intelaiata di cui fanno parte. Non si tratta, pertanto di un sistema di controllo propriamente dissipativo e la corrispondente tecnologia non è più stata sviluppata dai suoi ideatori: rimane comunque il primo esempio applicativo di sistema di controllo semi-attivo su scala reale. Successivamente, gran parte della ricerca si è orientata verso lo sviluppo di dissipatori viscosi con costante di dissipazione variabile mediante valvole elettromeccaniche capaci di modificare in tempi ridotti le dimensioni dell'orificio in cui scorre il fluido viscoso. In [Patten et al. 1999] viene mostrata la prima applicazione a scala reale di un sistema di questo tipo per la riduzione della risposta strutturale indotta dal traffico veicolare su un ponte stradale. Il sistema di controllo installato nel Kajima Shizuoka building, descritto in [Kurata et al. 1999],

basato su di smorzatori semi-attivi a coefficienti variabili, ha poi aperto la strada ad ulteriori applicazioni di tale tecnologia su edifici di nuova costruzione in Giappone.

Sistemi di controllo semi-attivo basati su dissipatori viscosi sono stati studiati anche in Italia, sia teoricamente che sperimentalmente [Serino and Occhiuzzi 2003, Occhiuzzi and Serino 2003]. I principali risultati delle ricerche confermano da un lato le capacità dei sistemi semi-attivi di offrire prestazioni indipendenti dalle condizioni al contorno (in particolare dall'input sismico), ma dall'altro confermano che le potenzialità di tali sistemi sono solo parzialmente riscontrabili nei test sperimentali dovuti ai ritardi nella variazione delle caratteristiche meccaniche dei dispositivi dovuti ai vari elementi della catena di controllo (acquisizione-elaborazione-comando) ed in particolare, nel caso in esame, ai tempi di attivazione delle elettrovalvole di chiusura degli orifizi, che pur misurati in millisecondi risultano eccessivi rispetto ai tempi teorici ottimali.

Per questo motivo, le ricerche più recenti sono orientate allo sviluppo di dispositivi di controllo semi-attivo privi di organi meccanici. Fra questi, i dissipatori basati su fluidi magnetoreologici (MR) risultano essere quelli con maggiori possibilità di ottenere un'effettiva diffusione nelle applicazioni. Nei dissipatori basati su fluidi magnetoreologici, la variazione dei parametri meccanici viene ottenuta modificando l'entità del campo magnetico nel quale il fluido è immerso: in questo modo, i tempi di risposta del sistema di controllo si riducono significativamente, fino ad essere contenuti nei 10 ms per l'intera catena di controllo.

Una sintesi delle conoscenze attuali sui sistemi di controllo semi-attivo basati su dissipatori magnetoreologici è contenuta in [Jung et al. 2004]. Nel lavoro sono anche descritte le uniche due applicazioni conosciute a scala piena: il ponte strallato Dongting Lake Bridge in Cina [Chen et al. 2004] e l'edificio Bihon-Kagaku-Miraikan in Giappone [Spencer and Nagarajaiah 2003], che rappresentano i prototipi assoluti nelle rispettive categorie di sistemi di controllo semi-attivi basati su fluidi magnetoreologici.

Anche su questo fronte, la ricerca scientifica in Italia è attiva: sono stati studiati sia il comportamento fisico-meccanico degli smorzatori semi-attivi basati su fluidi magnetoreologici, con particolare riferimento ai ritardi di funzionamento in configurazione semiattiva [Occhiuzzi et al. 2003] che il comportamento globale di modelli strutturali equipaggiati con tali smorzatori. Le analisi su tavola vibrante hanno permesso di valutare l'efficacia dei sistemi di controllo esaminati [Renzi and Serino 2004], di valutare l'efficienza di vari algoritmi di controllo e di verificare la sostanziale indipendenza della riduzione della risposta strutturale dal tipo di input sismico preso in considerazione [Occhiuzzi and Spizzuoco 2005].

I principali temi che necessitano di ulteriore approfondimento risultano essere la definizione di algoritmi di controllo più efficienti, la realizzazione di apparati elettronici dedicati e, soprattutto, le metodologie di progettazione delle proprietà fisico meccaniche dell'intero sistema di controllo rispetto alle corrispondenti caratteristiche della struttura da controllare. Infine, una volta ottimizzata la progettazione dei sistemi semi-attivi, resta da definire l'incremento teorico ed effettivo di prestazioni conseguibile rispetto agli omologhi sistemi passivi.

11.3 Attività previste nel secondo semestre

Nel corso del secondo semestre di attività, verranno analizzate le metodologie di progettazione e disposizione dei controventi dissipatori passivi disponibili in letteratura. Sulla scorta di tali analisi verranno definiti analoghi criteri di progettazione e disposizione dei controventi semi-attivi.

Per quanto concerne questi ultimi, si procederà alla definizione di modelli analitici di chiaro significato fisico, ma contestualmente, di adeguata semplicità per consentirne l'inclusione nell'analisi strutturale dell'organismo strutturale che li ospita.

Verranno inoltre esaminati i principali algoritmi di controllo proposti in letteratura per i sistemi semi-attivi con lo scopo di:

- valutarne le caratteristiche principali e, se presenti, le differenti efficaci nei riguardi della risposta strutturale sotto azioni sismiche;
- interpretarne gli elementi critici, al fine di proporre algoritmi di controllo innovativi;
- analizzare la risposta strutturale corrispondente all'impiego di differenti algoritmi al fine di evidenziare la possibile esistenza di un limite fisico nelle prestazioni della presente classe di sistemi di controllo.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Antonucci R., Balducci F., Castellano M. G., Ahmadi H., Goodchild I. and Fuller K. (2001). Viscoelastic dampers for seismic protection of buildings: an application to an existing building. Proc. of the 5th World Congress on Joints, Bearings and Seismic Systems for Concrete Structures, Rome, Italy.
- Chen Z. Q., Wang X. Y., Ko J. M., Ni Y. Q., Spencer B. F., Yang G. and Hu J. H. (2004). MR damping system for mitigating wind-rain induced vibration on Dongting Lake Cable-Stayed Bridge. *Wind and Structures*, 7(5).
- Constantinou M. C. and Symans M. D. (1993). Experimental study of seismic response of buildings with supplemental fluid dampers. *J Struct Design Tall Buildings*, 2, 93–132.
- Jung H. J., Spencer B. F., Ni Y. Q. and Lee I. W. (2004). State-of-the-art of semiactive control systems using MR fluid dampers in civil engineering applications. *Structural Engineering and Mechanics*, 17, 493-526.

- Kobori T., Takahashi M., Nasu T., Niwa N. and Ogasawa K. (1993). Seismic Response of Controlled Structure with Active Variable Stiffness System. *Earthquake Eng. and Structural Dynamics*, 22, 925-941.
- Kurata N., Kobori T., Takahashi M., Niwa N. and Midorikawa H. (1999). Actual Seismic Response Controlled Building with Semi-active Damper System. *Earthquake Eng. and Structural Dynamics*, 28, 1427-1447.
- Occhiuzzi A. and Serino G. (2003). A semi-active oleodynamic damper for earthquake control - Part 2: Evaluation of performance through shaking table tests. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1, 275-302.
- Occhiuzzi A., Spizzuoco M. and Serino G. (2003). Experimental analysis of magnetorheological dampers for structural control. *Smart Materials and Structures*, 12, 703-711.
- Occhiuzzi A. and Spizzuoco M. (2005). Experimental analysis of a semi-actively controlled steel building. *Structural Engineering and Mechanics*, 19.
- Patten W., Sun J., Li G., Kuehn J. and Song G. (1999). Field test of an intelligent stiffener for bridges at the I-35 Walnut Creek Bridge. *Earthquake Engng Struct Dyn*, 28, 109–26.
- Renzi E. and Serino G. (2004). Testing and modelling a semi-actively controlled steel frame structure equipped with MR dampers. *Structural Control and Health Monitoring*, 11, 189–221.
- Serino G. and Occhiuzzi A. (2003). A semi-active oleodynamic damper for earthquake control - Part 1: Design, manufacturing and experimental analysis of the device. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1, 241-273.
- Soong T. T., Spencer B. F. (2002). Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice. *Engineering Structures*, 24, 243–259.
- Spencer B. F. and Nagarajaiah S. (2003). State of the Art of Structural Control. *J. Struct. Engrg.*, 129, 845-856.

12 Contributo dell'Unità di Ricerca c/o Univ. de L'Aquila (E89_UNIAQ - Resp.: Gattulli)

Sistemi integrati di controllo ed auto-diagnosi in dissipatori sismici semi-attivi.

12.1 Introduzione

Nella progettazione di nuove strutture o nell'adeguamento di strutture esistenti in zona sismica, è correntemente presa in considerazione l'opportunità di dotare il sistema strutturale di dispositivi di protezione o di miglioramento delle capacità dissipative proprie, al fine di migliorarne la risposta alle azioni dinamiche.

E' comunemente riconosciuto che i diversi approcci al problema sono riconducibili a tre principali metodiche:

- Isolamento alla base
- Sistemi passivi
- Sistemi attivi\ibridi\semi-attivi

Le tecnologie associate ai tre diversi approcci si trovano ad un diverso livello di sviluppo e comunque con numerose applicazioni in strutture in servizio. La comunità scientifica del settore ha ormai da circa 3-4 decenni sviluppato numerosissimi studi, ricerche ed applicazioni. Periodicamente sono stati quindi pubblicati sia libri che articoli con il preciso scopo di riassumere i risultati acquisiti in specifici ambiti o a largo spettro, in quello che comunemente è indicato come tema del "controllo strutturale". Gli stati dell'arte disponibili, a cura di autori di grande rilievo, sono ampiamente esaustivi dei diversi aspetti coinvolti in questa area tematica [Yao 1972, Soong 1990, Housner 1997, Spencer and Sain 1997, Soong and Dargush 1997, Fulin and Spencer 1999, Symans and Constantinou 1999, Naeim and Kelly 1999, Spencer and Soong 2002, Spencer and Nagarajaiah 2003, Chu et al. 2005, Casciati et al. 2006]. Nondimeno, di seguito, si vogliono evidenziare alcuni peculiari aspetti, riguardanti la sola tecnologia del controllo semi-attivo, presenti in letteratura, utili allo sviluppo delle finalità del progetto Reluis. A tal fine si esamineranno in questo specifico settore le tecnologie correnti ed in corso di sviluppo, le metodologie disponibili di progettazione e calcolo ed infine le peculiarità delle realizzazioni di sistemi strutturali con controllo semi-attivo attualmente in servizio.

12.2 Tecnologie correnti ed in corso di sviluppo

Le strategie di controllo strutturale basate sull'utilizzo di sistemi semi-attivi sono nate con il fine di utilizzare al meglio sia le caratteristiche dei sistemi passivi che quelle dei sistemi attivi, prendendo il meglio dai due approcci. In particolare, recentemente, è stata rivolta una notevole attenzione ad i sistemi semi-attivi, in quanto gli stessi offrono l'adattabilità dei sistemi di controllo attivi senza richiedere il consumo di energia associato al funzionamento di quest'ultimi. Infatti, molti sistemi semi-attivi possono operare con una potenza erogata da una semplice batteria, la cui disponibilità può ritenersi sufficientemente affidabile anche durante gli eventi sismici, quando la richiesta di maggior energia dalla rete sarebbe difficilmente esaudita. Inoltre, a causa della limitata erogazione di energia esterna, i sistemi semi-attivi non hanno le potenzialità di instabilizzare il sistema strutturale (nel senso dell'energia, cioè non è possibile prelevare energia dall'esterno e utilizzarla per sollecitare il sistema provocando una risposta maggiore che nel caso non controllato). Numerosi studi hanno indicato che se un sistema semi-attivo è opportunamente implementato, può operare decisamente meglio di un sistema passivo e possiede tutte le potenzialità di raggiungere le prestazioni di un sistema completamente attivo, quindi riesce ad ottenere una significativa riduzione della risposta, durante delle ben diversificate condizioni di carico dinamico.

La tecnologia del controllo semi-attivo è stata quindi recentemente sufficientemente sviluppata, puntando principalmente allo sviluppo di dissipatori semi-attivi con diversi meccanismi di funzionamento quali:

- dissipatori fluido-viscosi con controllo di orifici attraverso valvole elettromeccaniche (SVF),
- dissipatori a fluido controllabile elettro-reologico (ER),
- dissipatori a fluido controllabile magneto-reologico (MR),
- dissipatori ad attrito variabile.

Inoltre sono state proposte numerose soluzioni tecnologiche in cui, dissipatori semi-attivi sono stati accoppiati con altri sistemi di controllo passivi per dar luogo a sistemi ibridi:

- smorzatori a massa accordata semi-attivi,
- isolatori e sistemi di isolamento alla base semi-attivi.

Sono illustrati brevemente di seguito, le principali caratteristiche di funzionamento dei dispositivi menzionati, per poi delineare le peculiari proprietà della tecnologia attualmente disponibile.

Una delle possibilità per avere un dispositivo con caratteristiche di smorzamento variabili è quella di utilizzare una valvola elettromeccanica con orifici controllati, al fine di alterare la resistenza del flusso in uno smorzatore idraulico convenzionale. Una delle prime proposte di tale metodologia è stata avanzata per migliorare le prestazioni di un sistema a massa accordata [Hrovat et al. 1983] poi ulteriori applicazioni sono state indicate per controllare le oscillazioni dei ponti indotte da sisma [Feng and Shinozuka 1990, Kawashima and Unjoh 1993, Kawashima et al. 1992]. Successivamente dispositivi di simili caratteristiche venivano modellati e sperimentati al NCEER at Buffalo [Symans et al. 1994, Symans and Constantinou 1997], e la tecnologia seppur molto innovativa trovava, dopo alcuni studi iniziali [Sack and Pattern 1994, Pattern et al. 1994], una piena realizzazione su una struttura al vero, la prima in USA nel settore del controllo attivo e semi-attivo [Pattern et al. 1999], seppur per rispondere alle sollecitazioni dinamiche di normale servizio (traffico veicolare) piuttosto che a quelle dovute al sisma. L'efficacia del dispositivo con controllo del flusso di fluido viscoso per applicazioni in ingegneria sismica è stata successivamente confermata con una serie di simulazioni ed esperimenti in prototipi a differente scala [Kurata et al. 1994, Symans and Constantinou 1997, Kurata et al. 1999].

I dispositivi presentati realizzano le proprie attitudini di adattabilità attraverso valvole elettromeccaniche opportunamente controllate. Tali componenti potrebbero diventare cruciali in termini di affidabilità e di manutenzione necessaria. Il superamento di detta limitazione è ottenibile attraverso l'introduzione di una nuova classe di dispositivi semi-attivi che utilizza particolari fluidi viscosi che posseggono caratteristiche di controllabilità. Questo permette di progettare dispositivi estremamente semplici in cui l'unica parte mobile è il pistone. Due fluidi viscosi si contendono le migliori caratteristiche di controllabilità: fluidi elettroreologici (ER) e fluidi magnetoreologici (MR). Le caratteristiche essenziali di questi fluidi sono la loro abilità nel trasformare in millisecondi reversibilmente il proprio comportamento da fluido viscoso lineare a semi-solido con una soglia di plasticizzazione controllabile quando sono sottoposti ad un campo elettrico (ER) o magnetico (MR). Sebbene la scoperta di entrambi i fluidi ER e MR è databile agli anni 40' [Winslow 1947, Rabinow 1948, Winslow 1949] la ricerca dapprima si è concentrata sui fluidi ER. Infatti, un numero cospicuo di smorzatori con fluido ER sono stati sviluppati, modellati e sperimentati per applicazioni in ingegneria civile [Masri et al. 1995, Gavin et al. 1996a, 1996b, Gordaninejad and Bindu 1995, Burton et al. 1995, McClamroch and Gavin 1995]. Più recentemente sono stati proposti fluidi MR come valida alternativa ai fluidi ER, per un loro utilizzo in dissipatori [Carlson 1994, Carlson and Weiss 1994, Carlson et al. 1995]. I fluidi MR posseggono delle intrinseche proprietà per fornire una semplice e robusta interfaccia fra un circuito elettronico di controllo e i componenti meccanici. Il maggior interesse nei fluidi MR può essere giustificato con il bisogno di una affidabile azione di modifica delle proprie caratteristiche, necessaria per attuare le strategie dei sistemi di controllo semi-attivo [Crosby et al. 1973, Karnopp and Crosby 1974, Ivers and Miller 1994]. Un tipico fluido magnetoreologico consiste del 20-40% di un volume relativamente puro, di particelle soffici di metallo, e.g. acciaio al carbonio, sospese in un liquido di supporto come un olio minerale, sintetico, acqua o glicerina. I fluidi MR composti di particelle di acciaio mostrano una soglia di plasticizzazione di 50-100 kPa per un campo magnetico di 150–250 kA/m (~2–3 kOe). I fluidi MR non sono particolarmente sensibili ai contaminanti o alle impurità associate al loro processo di produzione o al loro utilizzo. Come fluidi controllabili, il principale vantaggio di un fluido MR è legato al raggiungimento di un controllabile elevato sforzo di plasticizzazione. Tipicamente, il massimo sforzo di plasticizzazione di un fluido MR è di un ordine di grandezza maggiore del migliore fluido ER, mentre la viscosità è paragonabile. Questa caratteristica ha una diretta corrispondenza con le dimensioni dei dispositivi e con il loro comportamento dinamico [Spencer et al. 1996, Spencer et al. 1997, Occhiuzzi et al. 2003], infatti per avere dispositivi di ugual caratteristiche, il fluido attivo necessario per un dispositivo MR è due ordini di grandezza più piccolo di un dispositivo ER. Dal punto di vista energetico, l'energia totale necessaria per un normale funzionamento del dispositivo è paragonabile nei due casi [Spencer et al. 1996, Spencer et al. 1997a, Occhiuzzi et al. 2003], anche se i dispositivi MR possono essere pilotati a bassa tensione. Infine i dispositivi MR sono insensibili alla temperatura e possono operare in condizioni invariate in un intervallo di temperatura da -40 a 150°C.

Sono stati proposti differenti dispositivi semi-attivi che utilizzano le forze generate dall'attrito per dissipare energia cinetica in un sistema strutturale. Un dispositivo ad attrito variabile consiste in una connessione ad attrito regolabile che è rigidamente connessa ad un controvento [Akbar and Aktan 1990, Akbar and Aktan 1991, Kannan et al. 1995]. La forza di compressione sulla interfaccia è controllata in modo da permettere un rilascio per una determinata quantità. Le caratteristiche di dissipazione del dispositivo sono state evidenziate attraverso una serie di studi analitico-numeriche [Cherry 1994, Dowdell and Cherry 1994a, 1994b].

Tutti i suddetti dispositivi sono stati inseriti all'interno di schemi passivi di protezione antisismica, come nel caso dell'isolamento alla base, per migliorare le prestazioni complessive e l'adattabilità del sistema a forzanti con diverse caratteristiche in frequenza [Feng and Shinozuka 1990, Kawashima et al. 1993, Nagarajaiah 1994, Makris 1997, Kurata et al. 1999, Niwa et al. 1999]. In particolare, molti studi sono stati condotti con l'idea di limitare gli spostamenti degli isolatori senza aumentare sollecitazioni e spostamenti nella struttura, anche nel caso di ponti isolati [Symans and Kelly 1999]. Per ottenere tale obiettivo si è operato utilizzando isolatori a basso smorzamento ed introducendo alla base smorzatori supplementari. L'aumento di smorzamento alla base in genere è accompagnato da elevate accelerazioni nella struttura, così recentemente sono state introdotte delle tecniche sofisticate di introduzione di tale smorzamento aggiuntivo. Infatti è stato mostrato come l'aggiunta ad un sistema isolato con isolatori in gomma e piombo di uno smorzatore semiattivo a fluido MR, possa, sfruttando la natura sua adattativa, migliorare sia la riduzione degli spostamenti della base sia ridurre le accelerazioni della struttura [Ramallo et al. 2002]. Simili risultati sono raggiungibili con sistemi a rigidità variabile [Narashiman and Nagarajaiah 2005].

L'utilizzo di dissipatori semi-attivi per migliorare le prestazioni di smorzatori a massa accordata (TMD) viene fatta risalire ad una delle prime proposte di introduzione di tali dispositivi [Hrovat et al. 1983]. Sono state immediatamente individuate e descritte le migliori capacità prestazionali di TMD semi-attivi, anche in presenza di semplici algoritmi di controllo, attraverso l'utilizzo di soluzioni perturbative per la descrizione della risposta [Abe 1996]. Recentemente, una estesa campagna di analisi numeriche ha individuato i parametri ottimali di un TMD semi-attivo con dissipatore MR, evidenziando le migliori prestazioni rispetto ad un TMD passivo anche in presenza di forzanti sismiche [Aldemir 2003]. Un dispositivo di simili caratteristiche è stato progettato per la riduzione delle oscillazioni di una passerella pedonale [Occhiuzzi et al. 2002].

12.3 Metodologie di progettazione e calcolo

Le tecniche di controllo semi-attivo sono fra le più recenti proposte nel panorama delle metodologie di riduzione della risposta sismica. Di conseguenza non esiste una consolidata procedura di progettazione dei dispositivi, inoltre la stessa progettazione del sistema complessivo non può prescindere da una corretta selezione dell'algoritmo di controllo e della sua esatta implementazione. Solo attraverso questa visione complessiva del problema si può riuscire ad ottenere le acclerate prestazione da questi dispositivi. A tal fine sono stati quindi condotti studi analitici e numerici atti a formulare corretti modelli dei dispositivi ed a progettare e verificare le prestazioni di algoritmi di controllo opportunamente progettati. Tali studi sono stati suffragati attraverso la sperimentazione delle prestazioni ipotizzate sia in modelli in scala, sia in modelli in scala reale. Di seguito vengono sintetizzati i risultati raggiunti nel progetto dei sistemi di controllo semi-attivi.

A) *Studi analitici e numerici ed algoritmi di controllo*

Molti studi numerici ed analitici sono stati sviluppati al fine di formulare e validare algoritmi di controllo in grado di ottenere le migliori prestazioni possibili sia dai dispositivi che dall'intero sistema nei quali gli stessi sono installati. Il problema di controllo è in generale assai complicato sia in ragione della ricerca di prestazioni di elevato livello sia in ragione della intrinseca natura nonlineare degli smorzatori semi-attivi.

Di conseguenza differenti strategie di controllo nonlineari sono state sviluppate e proposte attraverso studi numerici di validazione. In particolare sono stati proposti algoritmi di controllo di tipo bang-bang [Gavin et al. 1996a, 1996b, Jansen and Dyke 2000], clipped-optimal [Dyke et al. 1998, Dyke et al. 2001], bi-state [Sack and Pattern 1994, Pattern et al. 1994, Pattern et al. 1999], fuzzy [Nagarajaiah 1994, Symans and Kelly 1999, Xu et al. 2003], adaptive nonlinear [Corona et al. 2004, Bin and Liang 2002, Roberti and Jezequel 1995, Luo et al. 2001]. Le prestazioni di molti di questi algoritmi sono state paragonate su uno stesso sistema sperimentale preso a campione [Jansen and Dyke 2000].

B) *Prototipi sperimentali in scala*

I primi esperimenti, seppur in scala, di dispositivi semi-attivi fluido viscosi con valvole controllabili (SVF – forza massima 8.9 kN; potenza media richiesta 55 W) sono stati condotti al NCEER at Buffalo, per un edificio in acciaio a tre piani in scala 1:4 [Symans and Constantinou 1997] non mostrando particolari benefici dall'utilizzo di dispositivi semi-attivi rispetto al funzionamento puramente passivo. Differentemente un esperimento realizzato su un modello in scala 1:10 di un telaio in acciaio a tre piani (massa 227 kg) presso il laboratorio di Notre Dame University, in cui è stato installato uno smorzatore MR semi-attivo commerciale (Lord SD-1000 linear MR fluid camper), ha permesso di

ottenere ottime prestazioni, se implementato con un controllore in retroazione da accelerometri posizionati ai tre piani [Dyke et al. 1996, Dyke et al. 1998]. Ulteriori investigazioni sono state condotte su un modello sperimentale di telaio leggero (massa 147 kg) a sei piani [Dyke et al. 2001]. Recentemente sono stati condotti, nell'ambito di un progetto europeo, degli esperimenti su un modello di telaio in grande scala (circa 1:3, massa 22.72 ton) equipaggiato con due smorzatori MR semi-attivi (forza massima 50 kN) mostrando un chiaro incremento delle prestazioni del sistema quando gli smorzatori sono guidati da un sistema di controllo collocato [Renzi and Serino 2004].

C) *Prototipi sperimentali al vero*

Al fine di verificare i risultati ottenuti in scala ridotta nel caso di applicazioni al vero sono state realizzate una serie di campagne sperimentali per sistemi di dimensioni paragonabili a quelle in uso in ingegneria civile. A tal fine è stato progettato e realizzato uno smorzatore MR semi-attivo con una forza massima di smorzamento di 200 kN [Spencer et al. 1997b, Yang et al. 2002]. Lo smorzatore è molto semplice in geometria, in quanto la parte esterna del cilindro contiene il circuito magnetico; il diametro interno è di 20.3 cm e il sistema possiede una corsa di ± 8 cm, la lunghezza dello smorzatore è di circa 1m con una massa di 250 kg; lo smorzatore contiene approssimativamente 5 litri di fluido MR. Le caratteristiche dinamiche sperimentate sono state superiori alle aspettative lasciando ampio margine di applicabilità nel campo dell'ingegneria sismica.

12.4 Strutture e realizzazioni

Anche se concepito come un dispositivo a rigidità variabile, uno smorzatore con un orificio variabile è stato utilizzato per realizzare un sistema semi-attivo a rigidità variabile (SAVS) installato al Kabori Research Complex [Kabori et al. 1993, Kamagata and Kabori 1994] in entrambi i telai di testata ad ogni piano. Tutti i risultati sia analitici che sperimentali mostrano efficaci prestazioni nella riduzione della risposta al sisma. Più recentemente, un sistema a smorzatori semi-attivi è stato installato al Kajima Shizuoka Building. I smorzatori semi-attivi idraulici sono stati installati all'interno dei muri perimetrali in entrambi i lati corti dell'edificio a pianta rettangolare, l'obiettivo dell'intervento è quello di realizzare un affidabile centro di accoglienza strategico per situazioni post-sisma [Kabori 1998, Kurata et al. 1999]. Ogni smorzatore è composto da un valvola a controllo di flusso, una valvola di sicurezza ed un accumulatore e può sviluppare una forza massima di 1000 kN.

Recentemente è stata presentata una sintetica descrizione dei risultati ottenuti in termini di applicazioni al vero della tecnologia dei semi-attivi [Liu et al.]. Si evidenzia come in nuovissimi edifici in Giappone sono stati installati circa 800 "smart dampers". Nel 2001, è stato realizzato il primo edificio, il Nihon-Kagaku-Miraikan, the Tokyo National Museum of Emerging Science and Innovation, con un sistema semi-attivo di recentissima ideazione con due smorzatori MR da 30 ton, installati al 3° ed al 5° piano. Gli smorzatori sono stati costruiti da Sanwa Tekki usando il fluido MR della Lord Corporation. Anche se concepiti per ridurre principalmente le oscillazioni indotte dal vento, è importante menzionare la prima applicazione al vero di smorzatori MR in un ponte strallato, il Dongting Lake Bridge in Hunan, China, dove un consorzio di università (Hunan University, University of Illinois and Hong-Kong, Polytechnic University), hanno reso possibile l'installazione di due smorzatori MR trasversali per ogni cavo, mitigando gli effetti delle oscillazioni di tali elementi sia per la fatica che per il corretto funzionamento in servizio.

12.5 Attività previste nel secondo semestre

L'UR di L'Aquila ha completato le attività del I semestre che in accordo con il progetto presentato dalla stessa UR constavano dell'analisi della letteratura tecnica e scientifica riguardante la tecnologia del controllo semi-attivo con particolare riguardo ad: (A) le implementazioni proposte o realizzate (in edifici, ponti, strutture esistenti e monumentali), (B) la capacità a rispondere a diverse azioni che inducono vibrazioni, (C) gli algoritmi di controllo utilizzati ed infine le caratteristiche di affidabilità raggiunte.

Nel II semestre del primo anno in accordo con la proposta progettuale, fase (D) saranno delineate le caratteristiche di sistemi con controllo semi-attivo per il loro utilizzo bivalente in operational conditions ed in seismic conditions e definita la sensibilità delle prestazioni del dispositivo al variare degli algoritmi di controllo. Tale fase sarà caratterizzata dallo studio e dalla messa a punto di strumenti analitici e numerici per la valutazione dell'efficacia di sistemi semi-attivi nella protezione dalle vibrazioni dei seguenti sistemi strutturali: cavi in strutture strallate o sospese, in accoppiamento con sistemi di isolamento alla base per la protezione di strutture leggere (ad esempio beni artistici di particolare valore; statue, vasi etc), in accoppiamento con TMD per la protezione dalle oscillazioni di torri e campanili.

Infine, si prevede il progetto e l'esecuzione di una campagna sperimentale in laboratorio (presso il DISAT dell'Univ. de L'Aquila) delle proprietà dinamiche di un dissipatori semi-attivi, eventualmente accoppiati con un componente strutturale quale un prototipo in scala ridotta di strallo, fase (E).

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Abe M. (1996). Semi-active tuned mass dampers for seismic protection of civil structures. *Earthquake Eng. Struct. Dyn.* 25, 743–749.
- Akbay Z. and Aktan H. M. (1990). Intelligent energy dissipation devices. *Proc. Fourth U.S. National Conf. on Earthquake Engrg.*, 3, 427–435.
- Akbay Z. and Aktan H. M. (1991). Actively regulated friction slip devices. *Proc. 6th Canadian Conf. on Earthquake Engrg.*, 367–374.
- Aldemir U. (2003). Optimal control of structures with semiactive-tuned mass damper. *J. of Sound and Vibration* 266, 847–887.
- Burton S. A., Makris N., Konstantopoulos I. and Antsaklis P. J. (1995). Modeling the response of ER damper: phenomenology and emulation. *J. Engrg. Mech., ASCE*, 122 (9), 897–906.
- Casciati F., Magonette G. and Marazzi F. (2006). *Technology of semi-active devices and application in vibration mitigation*. Wiley.
- Carlson J. D. (1994). The promise of controllable fluids,” *Proc. of Actuator 94* (H. Borgmann and K. Lenz, Eds.), AXON Technologie Consult GmbH, pp. 266–270.
- Carlson J. D. and Weiss K. D. (1994). A growing attraction to magnetic fluids. *Machine Design*, 61–64.
- Carlson J. D., Catanzarite D. M. and St. Clair K. A. (1995). Commercial magneto-rheological fluid devices. *Proc. 5th Int. Conf. on ER Fluids, MR Fluids and Associated Technology*, U. Sheffield, UK.
- Cherry S. (1994). Research on friction damping at the university of British Columbia,” *Proc. Int. Workshop on Struct. Control*, USC Publication Number CE-9311, pp. 84–91.
- Chu S. Y., Soong T. T. and Reinhorn A. M. (2005). *Active, hybrid, and semi-active structural control*. London Wiley.
- Corona D., Giua A. and Seatzu C. (2004). Optimal control of hybrid automata: design of a semi-active suspension. *Control Engineering Practice* 12, 1305–1318.
- Crosby M. J., Harwood R. A. and Karnopp D. (1973). Vibration control using semi-active force generators. *Trans. of ASME*, 73-DET-122.
- Dowdell D. J. and Cherry S. (1994). Semi-active friction dampers for seismic response control of structures. *Proc. Fifth US National Conf. on Earthquake Engrg.*, vol. 1, pp. 819–828.
- Dowdell D. J. and Cherry S. (1994). Structural control using semi-active friction dampers. *Proc. 1st World Conf. on Struct. Control*, Los Angeles, California, pp. FA1:59–68, August.
- Dyke S. J., Spencer Jr. B. F., Sain M. K. and Carlson J. D. (1996). Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction. *Smart Material Structure* 5, 565–575.
- Dyke S. J., Spencer Jr. B. F., Sain M. K. and Carlson J. D. (1998). An experimental study of MR dampers for seismic protection. *Smart Material Structure* 7, 693–703.
- Feng Q. and Shinozuka M. (1990). Use of a variable damper for hybrid control of bridge response under earthquake. *Proc. U.S. National Workshop on Struct. Control Research*. USC Publication no. CE-9013.
- Fulin Zhou and Spencer B. F. (1999). *A new advance in seismic isolation, energy dissipation and control of structures*, China Scientific Book Services.
- Gavin H. P., Hanson R. D., Filisko F. E. (1996a). Electrorheological dampers, part I: analysis and design. *J. Appl. Mech., ASME*, 63(3), 669–675.
- Gavin H. P., Hanson R. D. and Filisko F. E. (1996b). Electrorheological dampers, part II: testing and modeling. *J. Appl. Mech., ASME*, 63 (3), 676–682.
- Gordaninejad F. and Bindu R. (1995). The effect of scale factor on the performance of ERF dampers. *Proc. 5th Int. Conf. on ERF, MR Suspensions and Associated Tech.*, Sheffield, England, 318–326.
- Housner G. W. et al. (1997). *Structural control: past present and future*. *J. Engrg. Mech., ASCE*, September.
- Hrovat D., Barak P. and Rabins M. (1983). Semi-active versus passive or active tuned mass dampers for structural control. *J. Engrg. Mech.*, 109 (3) 691–705.
- Kamagata S. and Kobori T. (1994). Autonomous adaptive control of active variable stiffness systems for seismic ground motion. In: *Proc. 1st World Conf. on Struct. Control*, Pasadena, CA; vol. TA4, p. 33–42.
- Kannan S., Uras H. M. and Aktan H. M. (1995). Active control of building seismic response by energy dissipation,” *Earthquake Engrg. and Struct. Dyn.*, 24 (5), 747–759.
- Karnopp D. and Crosby M. J. (1974). System for controlling the transmission of energy between spaced members. *U.S. Pat.* 3,807,678.
- Kawashima K. and Unjoh S. (1993). Variable dampers and variable stiffness for seismic control of bridges. *Proc. Int. Workshop on Struct. Control*, Honolulu, Hawaii, pp. 283–297.
- Kawashima K., Unjoh S. and Shimizu K. (1992). Experiments on dynamics characteristics of variable damper. *Proc. Japan Nat. Symp. on Struct. Resp. Control*, Tokyo, Japan, p.121.
- Kobori T., Takahashi M., Nasu T., Niwa N. and Ogasawara K. (1993). Seismic response controlled structure with active variable stiffness system. *Earthquake Engng Struct Dyn.* 22, 25–41.
- Kobori T. (1998). Mission and perspective towards future structural control research. *Proc. of 2nd World Conf. in Struct. Control*, Kyoto, Japan; vol. 1, 25–34.
- Kurata N., Kobori T., Takahashi M., Niwa N. and Midorikawa H. (1994). Shaking table experiment of active variable damping system. *Proc. 1st World Conf. on Struct. Control*, Los Angeles, California, pp. FA4:3–12, August.
- Kurata N., Kobori T., Takahashi M., Niwa N. and Midorikawa H. (1999). Actual seismic response controlled building with semi-active damper system. *Earthquake Engng Struct Dyn* 28(1), 1427–48.
- Ivers D. E. and Miller L. R. (1994). *Semi-Active suspension technology: an evolutionary view*. Lord Corporation Publication #LL-6005.
- Jansen L. M. and Dyke S. J. (2000). Semi-active control strategies for MR dampers: a comparative study. *ASCE J. of Eng. Mech.*, 126 (8), 795–803.
- Jiang Bin and Wang Jian Liang (2002). Actuator fault diagnosis for a class of bilinear system with uncertainty. *J. of the Franklin Institute*, 339, 361–374.
- Liu S.C., Tomizuka G. and Ulsoy G. *Strategic issues in sensors and smart structures*. *Structural Control and Health Monitoring*, in press.
- Luo N., Rodellar J., Vehi J. and De la Sen M. (2001). Composite semi-active control of a class of seismically excited structures. *J. of the Franklin Institute* 338, 225–240.
- Makris N. (1997). Rigidity-plasticity-viscosity: Can electrorheological dampers protect base isolated structures from near-source ground motions? *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 26, 571–591.
- Masri S. F., Kumar R. and Ehtgott R. C. (1995). Modeling and control of an electrorheological device for structural control applications. *Smart Materials and Structures* 4 A121–A131.
- McClamroch N. H. and Gavin H. P. (1995). Closed loop structural control using electrorheological dampers,” *Proc. American Control Conf.*, Seattle, Washington, pp. 4173–4177.
- Naeim Farzad and Kelly James M. (1999). *Design of seismic isolated structures*. London Wiley.

- Nagarajaiah S. (1994). 'Fuzzy controller for structures with hybrid isolation system.' Proc., 1st World Conf. on Structural Control, Los Angeles, TA2, 67–76.
- Narasimhan S. and Nagarajaiah S. (2005). A STFT semiactive controller for base isolated buildings with variable stiffness isolation system. *Engineering structures* 27, 514-523.
- Niwa N., Kobori T., Takahashi M., Matsunaga Y., Kurata N. and Mizuno T. (1999). Application of semi-active damper system to an actual building. Proc., 2nd World Conf. on Structural Control, Kyoto, Japan, Vol. 1, 815–824.
- Occhiuzzi A., Spizzuoco M. and Serino G. (2002). Semi active MR dampers in TMD's for vibration of footbridges - Numerical modelling and control algorithm (Part. 1). Proc. of Footbridge 2002, Paris, 20-22.Sept..
- Occhiuzzi A., Spizzuocco M. and Serino G. (2003). Experimental analysis of magnetorheological dampers for structural control. *Smart Mater. Struct.* 12 703-71.
- Patten W. N., He Q., Kuo C. C., Liu L. and Sack R. L. (1994). Suppression of Vehicle-Induced Bridge Vibration via a Semiactive Structural Controller. Proc. 1st World Conf. on Struct. Control, Los Angeles, California, pp. FA1:30–38, August.
- Patten W., Sun J., Li G., Kuehn J. and Song G. (1999). Field test of an intelligent stiffener for bridges at the I-35 Walnut Creek Bridge. *Earthquake Engng Struct Dyn* 28(2) 109–26.
- Rabinow J. (1948). The magnetic fluid clutch. *AIEE Transactions*, 67, 1308–1315.
- Ramallo J. C., Johnson E. A. and Spencer B. F. Jr. (2002). "Smart" base isolation systems. *J. of Eng. Mech.* 10, 1088-1100.
- Renzi E. and Serino G. (2004). Testing and modelling a semi-actively controlled steel frame structure equipped with MR dampers. *Structural Control and Health Monitoring*, (11), 189-221.
- Roberti V. and Jezequel I. L. (1995). Adaptive semiactive isolation of seismic buildings. *Smart Material Structures*, 4, A32-A40.
- Sack R. L. and Patten W. (1994). Semiactive hydraulic structural control. Proc. Int. Workshop on Struct. Control, USC Publication Number CE-9311, pp. 417-431.
- Spencer B. F., Dyke S. J., Sain M. K. and Carlson J. D. (1996). Idealized model of a magnetorheological damper. Proc. 12th Conf. on Analysis and Computation, ASCE, Chicago, Illinois, April 15–18, pp. 361–370.
- Spencer B. F. Jr. and Sain M. K. (1997). Controlling buildings: a new frontier in feedback. Special Issue of the *IEEE Control Systems Magazine* on Emerging Technology 17(6) 19-35.
- Spencer B. F., Dyke S. J., Sain M. K. and Carlson J. D. (1997). Phenomenological model of a magnetorheological damper. *J. Engrg. Mech., ASCE*, 123 (3), 230–238.
- Spencer B. F., Carlson J. D., Sain M. K. and Yang G. (1997). On the current status of magnetorheological dampers: seismic protection of full-scale structures," Proc. American Control Conf., Albuquerque, New Mexico, pp. 458–462.
- Spencer B. F. and Soong T. T. (2002). Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice. *Engineering Structures* 24 243-259.
- Spencer B. and Nagarajaiah S. (2003). State of the art of structural control. *J. of Struct. Eng., ASCE*, 129(7), 845-856.
- Soong T. T. (1990). Active structural control: theory and practice. Longman Scientific and Technical, Essex, England.
- Soong T. T. and Dargush G. F. (1997). Passive energy dissipation systems in structural engineering. London Wiley.
- Symans M. D., Constantinou M. C., Taylor D. P. and Garjost K. D. (1994). Semi-active fluid viscous dampers for seismic response control. Proc. 1st World Conf. on Struct. Control, Los Angeles, California, pp. FA4:3–12, August.
- Symans M. D. and Constantinou M. C. (1997). Seismic testing of a building with semi-active fluid damper control systems," *Earthquake Engrg. and Struct. Dyn.*, 26 (7), 759-777.
- Symans M. D. and Constantinou M. C. (1999). Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review. *Engineering Structures* 21(6) 469-487.
- Symans M. D. and Kelly S. W. (1999). Fuzzy logic control of bridge structures using intelligent semi-active seismic isolation systems. *Earthquake Engrg. and Struct. Dyn.*, 28, 37-60.
- Winslow W. M. (1947). Method and means for translating electrical impulses into mechanical force. US Patent no. 2,417,850.
- Winslow W. M. (1949). Induced fibrillation of suspensions. *J. Applied Physics*, 20, 1137–1140.
- Yang G., Spencer B. F. Jr., Sain M. K. and Carlson J. D. (2002). Large-scale MR fluid dampers: modeling, and dynamic performance considerations. *Engineering structures*, 30(3), 309-323.
- Yao J. T. P. (1972). Concept of structural control. *ASCE J. Struct. Div.*, 98 1567–1574.
- Yi F., Dyke S. J., Caceido J. M. and Carlson D. (2001). Experimental verification of multi-input seismic control strategies for smart dampers. *ASCE J. of Eng. Mech.*, 127 (11), 1152-1164.
- Zhao-Dong Xu, Ya-Peng Shen and Ying-Quing Guo (2003). Semi-active control of structures incorporated with magnetorheological dampers using neural networks. *Smart Mater. Struct.*, 12, 80-87.