

## SISTEMI DI PROTEZIONE SISMICA PER LA SICUREZZA DELLE COSTRUZIONI \*

Maria Gabriella CASTELLANO \*\*, Samuele INFANTI \*\*\*

\* Pubblicato in: Atti Convegno Internazionale "Bioarchitettura e ingegneria ambientale – Progetti di sviluppo e mobilità sostenibile sul territorio", Pistoia 3-5 ottobre 2007

\*\* Civil Engineer, Ph.D. Structural Engineering; Senior Research Engineer, FIP Industriale S.p.A.

\*\*\* Structural Engineer, Research & Development Department and Testing Laboratory Manager, FIP Industriale S.p.A.

### ABSTRACT

La protezione dagli effetti del terremoto è essenziale per la sicurezza delle costruzioni, in un paese ad alto rischio sismico come l'Italia, in cui nel XX secolo i terremoti hanno causato 120.000 vittime, e negli ultimi 25 anni sono stati spesi circa 75 miliardi di euro per il ripristino e la ricostruzione post-sisma. Negli ultimi decenni all'approccio tradizionale alla protezione sismica, basato sul garantire alle strutture un'elevata duttilità che consenta loro di danneggiarsi in modo diffuso senza crollare, si sono affiancate le tecniche innovative dell'isolamento sismico e della dissipazione di energia. Queste sono tecniche sviluppatesi alla fine degli anni Settanta, ed ormai utilizzate in tutto il mondo per la protezione sismica di migliaia di strutture, grazie allo sviluppo di dispositivi antisismici sempre più affidabili che consentono di implementarle.

Per isolamento sismico o isolamento alla base di un edificio si intende l'inserimento tra la struttura e le sue fondazioni di opportuni dispositivi molto flessibili orizzontalmente, detti isolatori, che consentono di aumentare il periodo proprio di vibrare della struttura e di conseguenza ridurre le accelerazioni ad essa trasmesse dal moto del terreno. Ne consegue la possibilità di evitare non solo il collasso delle strutture (che è l'obiettivo di qualsiasi tipo di progettazione antisismica), ma anche qualsiasi danno sia agli elementi strutturali e non strutturali, che al contenuto degli edifici. Quest'ultimo aspetto è importantissimo per gli edifici che devono rimanere operativi dopo un violento terremoto, ad esempio gli ospedali o i centri per la gestione dell'emergenza (centri di protezione civile, caserme, ecc.), o per gli impianti industriali altamente pericolosi (centrali nucleari, impianti chimici, ecc.) oppure per tutti quegli edifici il cui contenuto ha un valore molto superiore a quello degli edifici stessi (musei, banche, centri di calcolo, ecc.).

Per quello che concerne i sistemi di isolamento per ponti o viadotti, dove il piano di isolamento si colloca tra l'impalcato e le pile, la soluzione più efficace è quella che coniuga al sistema di isolamento un elevato grado di dissipazione consentendo così la riduzione sia delle forze sismiche che degli spostamenti dell'impalcato e la conseguente minimizzazione dei costi di costruzione, oltre ad evitare il danneggiamento della struttura e quindi a mantenere la funzionalità delle infrastrutture. Per questo vengono utilizzati sistemi con un elevato grado di dissipazione (più del 30% di smorzamento viscoso equivalente), in particolare dispositivi con un comportamento altamente non lineare, ad esempio elasto-plastico o viscoso non lineare.

I dispositivi dissipatori di energia, oltre ad essere utilizzati come componenti del sistema di isolamento insieme ai dispositivi isolatori, in particolare nei ponti, possono essere utilizzati anche in assenza di isolamento, inserendoli dovunque il sisma induca spostamenti significativi tra differenti elementi strutturali. Un tipico esempio di utilizzo della tecnica della dissipazione di energia indipendentemente dall'isolamento sismico è quello dei "controventi dissipativi", ovvero controventi dotati di dispositivi dissipatori, che vengono utilizzati negli edifici intelaiati, sfruttandone gli spostamenti d'interpiano per dissipare una porzione significativa dell'energia introdotta dal sisma nella struttura. In tal modo si riduce la richiesta di duttilità (ossia la necessità di dissipare energia) negli elementi strutturali, riducendo così sensibilmente i danni indotti in essi dal sisma. Ciò è particolarmente utile nell'adeguamento sismico di strutture progettate senza nessuna attenzione alla duttilità.

I dispositivi antisismici italiani sono stati utilizzati in tutto il mondo. Tra le applicazioni recenti all'estero, sono sicuramente da citare l'isolamento alla base dell'Ospedale "da Luz" di Lisbona in Portogallo, e della Caserma dei Vigili del Fuoco di Basilea in Svizzera (adeguamento sismico), così come l'uso di dissipatori viscosi nel grattacielo più alto del mondo, il Taipei 101 a Taiwan, nelle Saint Francis Tower nelle Filippine, e – in dimensioni mai costruite precedentemente – nel ponte di Rion-Antirion in Grecia, situato in una zona ad altissima sismicità.

L'inserimento nella nuova normativa sismica (Ordinanza P.C.M. 3274 del 20/3/2003 e successive) di specifiche regole di progettazione per edifici e ponti isolati sta favorendo anche in Italia un notevole sviluppo delle applicazioni di queste tecnologie. Ad esempio, sono state recentemente protette con isolamento sismico le scuole di Bojano e di San Giuliano di Puglia, la Facoltà di Lettere a L'Aquila, l'Ospedale Gervasutta di Udine, l'Ospedale del Mare di Napoli. Il Liceo Classico Perticari di Senigallia, l'ITIS Porro di Pinerolo, e la scuola elementare di via dei Cappuccini a Ramacca sono invece alcuni esempi di scuole adeguate sismicamente con dissipatori isteretici assiali ad instabilità impedita (Buckling-Restrained Axial Dampers - BRAD), dissipatori appositamente sviluppati per essere utilizzati nei controventi dissipativi.

In questa presentazione si descrivono le principali tipologie di dispositivi antisismici per ponti ed edifici, con riferimento alle applicazioni recenti più rilevanti.

## INTRODUZIONE

Il controllo passivo della risposta strutturale attraverso l'utilizzo dei sistemi di isolamento e/o di dissipazione dell'energia è divenuto negli ultimi venticinque anni una tecnica consolidata per ridurre gli effetti degli eventi sismici sulle strutture civili, in alternativa al consueto approccio all'ingegneria sismica, basato sul *capacity design* o *gerarchia delle resistenze*.

La tecnica dell'isolamento sismico si basa principalmente sull'introduzione, per gli edifici solitamente tra le fondazioni ed il primo solaio, e per i ponti alla sommità delle pile e sulle spalle, di particolari apparecchi denominati isolatori che, grazie alla loro modesta rigidità orizzontale, disaccoppiano il moto della struttura da quello del terreno: le caratteristiche dinamiche della struttura vengono modificate così da spostare il periodo fondamentale (aumentandolo) in un campo di periodi lontani da quelli propri del sisma. In altre parole, la tecnica di isolamento sismico riduce l'energia che il sisma trasmette alle strutture. Ciò permette una sensibile riduzione delle accelerazioni orizzontali sulla struttura, e quindi delle forze orizzontali; per gli edifici, risultano anche sensibilmente ridotte le amplificazioni delle accelerazioni ai vari piani, e gli spostamenti di interpiano, in quanto l'edificio si comporta sostanzialmente come un corpo rigido al di sopra del piano di isolamento. In questo modo il comportamento degli elementi strutturali può rimanere in fase elastica anche durante terremoti di elevata intensità (che provocherebbero notevoli danni nelle strutture convenzionali, progettate per evitare il collasso ma non i danni allo stato limite ultimo - SLU). Inoltre, la funzionalità delle strutture dotate di sistemi di isolamento è pienamente garantita, grazie alla completa assenza di danni agli elementi non strutturali e agli impianti. Tutto ciò rende la tecnica dell'isolamento sismico insostituibile per le strutture che devono rimanere perfettamente integre e funzionanti anche dopo un sisma violento, come ospedali, centri di protezione civile, ecc. [Dolce et al, 2006].

I notevoli spostamenti che nascono a livello del sistema di isolamento, soprattutto per alcune tipologie di terreni, possono essere eventualmente ridotti aumentando le capacità del sistema di isolamento di dissipare energia.

Le applicazioni dell'isolamento sismico con tecnologie simili a quelle attualmente utilizzate iniziarono negli anni settanta, in particolare in Nuova Zelanda (sia nei ponti che negli edifici), in Italia (soprattutto nei ponti), negli Stati Uniti (specialmente negli edifici). La prima applicazione in Italia fu l'isolamento sismico del Viadotto Somplago sull'Autostrada Udine-Carnia, nella seconda metà degli anni Settanta. Una delle due vie di corsa del viadotto era già completata quando avvenne il terremoto del Friuli del 1976, ed il suo ottimo comportamento nonostante l'estrema vicinanza all'epicentro fece sì che si moltiplicassero le ricerche su nuovi dispositivi di protezione sismica. Ne seguirono numerose applicazioni, che portarono l'Italia ad essere alla fine degli anni Ottanta leader mondiale per il numero di ponti e viadotti protetti con sistemi di isolamento e/o dissipazione di energia.

Osservazioni e misurazioni *in situ* durante recenti eventi sismici catastrofici (Northridge, California, 1994; Kobe, Giappone, 1995; Turchia, 1999) hanno confermato l'efficacia di queste tecniche, precedentemente dimostrata da numerose ricerche teoriche e sperimentali. A seguito del terremoto di Kobe le applicazioni dell'isolamento in Giappone hanno avuto una vasta e rapida espansione: ad esempio, prima del sisma gli edifici dotati di isolamento alla base erano circa 80, mentre tra il 1995 e il 1999 sono stati realizzati più di 700 edifici isolati.

Per quello che concerne i sistemi di isolamento per ponti o viadotti, la soluzione più efficace è quella che coniuga al sistema di isolamento (ossia aumento del periodo proprio) un elevato grado di dissipazione, e consente quindi di ridurre sia le forze sismiche che gli spostamenti dell'impalcato, minimizzando così i costi. Per questo sono stati progettati sistemi con un elevato grado di dissipazione (più del 30 % di smorzamento viscoso equivalente), in particolare dispositivi con un comportamento altamente non lineare, ad esempio elasto-plastico o viscoso non lineare.

I dispositivi dissipatori di energia, mentre nei ponti sono utilizzati come componenti di un sistema di isolamento, negli edifici possono essere utilizzati anche in assenza di isolamento, inserendoli dovunque il sisma induca spostamenti significativi tra differenti elementi strutturali. L'esempio più tipico è quello dell'utilizzo dei dissipatori per realizzare i cosiddetti "controventi dissipativi", che sfruttano gli spostamenti d'interpiano di una struttura intelaiata – in c.a., c.a.p. o acciaio – per dissipare energia. La dissipazione di energia in dispositivi progettati a questo scopo (i dissipatori) riduce la richiesta di duttilità (ossia la necessità di dissipare energia) negli elementi strutturali, riducendo così sensibilmente i danni indotti dal sisma sugli elementi strutturali. Ciò è particolarmente importante nell'adeguamento sismico di strutture progettate senza nessuna attenzione alla duttilità. Inoltre i controventi contribuiscono a stabilizzare la struttura allontanando il pericolo di meccanismi di collasso.

L'irrigidimento offerto dai controventi dissipativi risolve anche il problema dell'elevata deformabilità di molte strutture intelaiate esistenti, e del conseguente danneggiamento delle tamponature anche a fronte di terremoti di modesta intensità (corrispondenti allo stato limite di danno). Allo stesso tempo tuttavia i controventi dissipativi non presentano gli svantaggi associati all'utilizzo di controventi metallici tradizionali, che comportano un aumento del periodo proprio dell'edificio e di conseguenza dell'energia trasmessa dal sisma alla struttura.

Nel prosieguo saranno presentati i sistemi di isolamento e dissipazione più utilizzati in Italia, con alcuni esempi di utilizzo sia negli edifici che nei ponti.

## ISOLATORI ELASTOMERICI

Gli isolatori elastomerici sono dispositivi d'appoggio in elastomero armato, cioè costituiti da strati alterni di acciaio e di elastomero collegati mediante vulcanizzazione. La presenza degli strati di acciaio garantisce un'elevata rigidità verticale, senza tuttavia modificare la rigidità orizzontale, che è legata solo alle caratteristiche geometriche e meccaniche dell'elastomero, ed è sufficientemente bassa per garantire il desiderato aumento del periodo proprio della struttura. Solitamente si utilizzano mescole elastomeriche ad alto smorzamento, ossia capaci di garantire un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente  $\alpha$  tra il 10 ed il 15 %. Possono essere utilizzate anche mescole elastomeriche a basso smorzamento ( $\alpha \approx 5$  %) qualora gli isolatori siano impiegati in associazione a dispositivi dissipatori, cosicché il

sistema d'isolamento nel suo insieme abbia sufficienti capacità dissipative. La Figura 1 mostra lo spaccato ed il tipico legame costitutivo di un isolatore elastomerico ad alto smorzamento.

Gli isolatori elastomerici, da soli o in combinazione con gli isolatori elastomerici con nucleo in piombo descritti nel paragrafo successivo, sono la tipologia di isolatori più utilizzata nel mondo per l'isolamento alla base di edifici. Talora sono utilizzati anche in combinazione con isolatori a scorrimento, ossia semplici apparecchi di appoggio multidirezionali con superficie di scorrimento a basso attrito. Questa combinazione è utile per raggiungere periodi della struttura isolata molto alti, che sarebbe difficile o troppo costoso raggiungere con i soli isolatori elastomerici, soprattutto nel caso di edifici con massa relativamente bassa (ad esempio edifici con pochi piani).

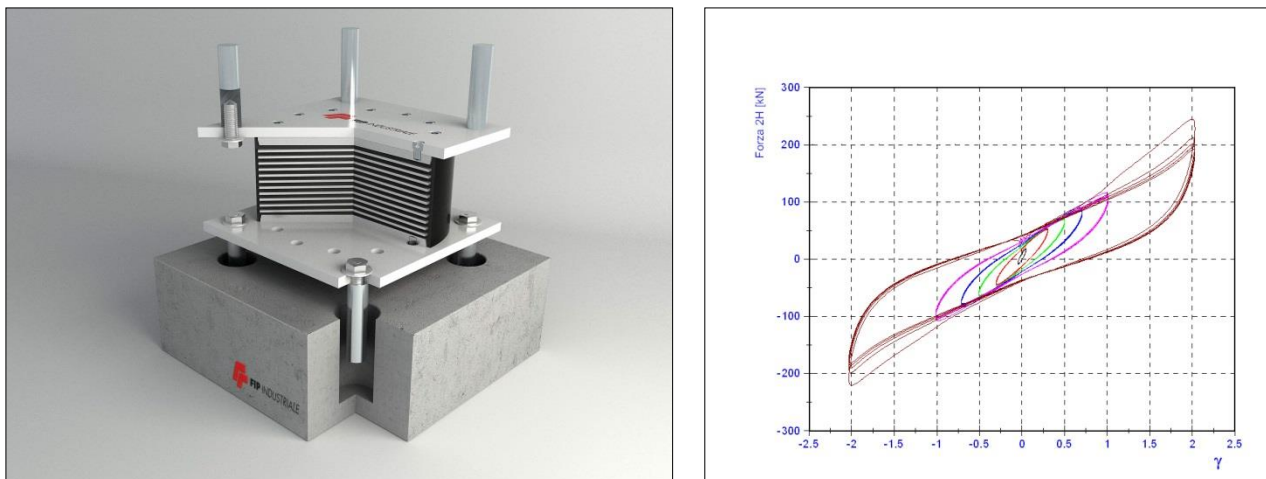


Figura 1: Spaccato di isolatore elastomerico ad alto smorzamento e tipici cicli d'isteresi ottenuti in una prova di qualificazione dinamica ad ampiezza crescente

Nei paragrafi seguenti sono descritti alcuni esempi di ospedali europei isolati alla base. Si noti che, nonostante l'uso dell'isolamento sismico sia insostituibile per garantire la funzionalità degli edifici strategici anche a fronte di un sisma di forte intensità, in Italia ed in Europa l'applicazione dell'isolamento sismico a strutture ospedaliere di grandi dimensioni, è molto più recente che in Giappone o negli USA.

#### L'ospedale "Da Luz" di Lisbona

Si tratta di un complesso ospedaliero privato, costituito da due strutture indipendenti, una destinata ad ospedale vero e proprio, e l'altra ad appartamenti per anziani, entrambe in c.a. [Guerreiro *et al.*, 2005; Prazeres Ferreira, 2006]. L'ospedale ha una base quasi quadrata, di 110m x 110m, di 6 piani, con due blocchi rettangolari di 3 piani (23m x 100m) disposti alle due estremità della base. Gli isolatori sono installati al di sotto del livello -1, con qualche eccezione locale (ad esempio in corrispondenza degli ascensori). I 195 isolatori sono di 3 diverse tipologie, di diametro compreso tra 400 e 900 mm, e con due tipi di miscela elastomerica diversi (modulo di taglio  $G=0,8$  MPa, smorzamento  $\alpha=10$  %, e  $G=1,4$  MPa,  $\alpha=15$  %). L'edificio adibito a residenza per anziani ha una base rettangolare (55m x 17,5m) di 4 piani, con due blocchi rettangolari di 3 piani sui lati corti della base. In questo edificio gli isolatori sono disposti subito sopra le fondazioni. I 120 isolatori anche in questo caso hanno diametro compreso tra 400 e 900 mm, ma sono tutti realizzati con la miscela più dura ( $G=1,4$  MPa,  $\alpha=15$  %). Per entrambe le strutture il periodo proprio è circa 2,5 s. Lo spostamento orizzontale di progetto degli isolatori è risultato essere pari a 180 mm (incluso il coefficiente "di affidabilità" pari ad 1,2 prescritto dall'Eurocodice 8). L'edificio, inaugurato il 6 novembre 2006, è il primo isolato sismicamente in Portogallo.

#### L'ospedale del Mare di Napoli

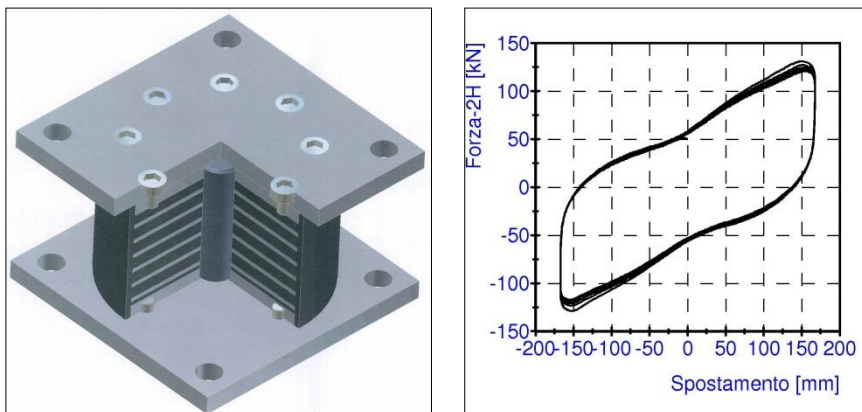
L'Ospedale del Mare è situato a Ponticelli, nella zona periferica orientale di Napoli. Si tratta di un ospedale di notevoli dimensioni, da 500 posti letto, con 15 sale operatorie e due sale parto.

La struttura è notevolmente irregolare sia in pianta che in elevazione: ci sono due corpi di fabbrica ad L, uno di 8 piani (altezza di 29 m) e l'altro di 3 piani (altezza di 13 m), disposti a formare un quadrato di 144 m di lato. Il sistema strutturale è quello del telaio spaziale in c.a.. La progettazione è stata eseguita sulla base della nuova normativa sismica (OPCM 3431). Il sito è caratterizzato da  $a_g=0,25$  g, suolo B; il coefficiente d'importanza è 1,4; per la sovrastruttura è stato assunto un coefficiente di struttura pari ad 1,5. I primi tre periodi della struttura isolata sono compresi tra 2,32 e 2,74 s, molto vicini al periodo obiettivo che era di 2,5 s. È stato stimato che l'uso dell'isolamento sismico ha consentito un risparmio del 40% sulle armature della sovrastruttura [Di Sarno *et al.*, 2006; Di Sarno *et al.*, 2007].

Il sistema di isolamento scelto consiste in 327 isolatori di tre diverse tipologie, di diametro compreso tra 600 mm ed 800 mm, con rigidità orizzontale compresa tra 1,51 e 4,89 kN/mm, e fattore di forma primario sempre superiore a 24. Le mescole elastomeriche utilizzate sono due, entrambe con smorzamento viscoso equivalente pari al 15 %: con  $G=0,8$  MPa per gli isolatori di diametro 600mm, con  $G=1,4$  MPa per gli isolatori più grandi. Lo spostamento di progetto è 204 mm, incluso il coefficiente "di affidabilità" pari ad 1,2 richiesto dall'OPCM 3431, in analogia all'Eurocodice 8, per la progettazione degli isolatori.

## ISOLATORI ELASTOMERICI CON NUCLEO IN PIOMBO

Gli isolatori elastomerici con nucleo in piombo sono analoghi agli isolatori elastomerici descritti in precedenza, ma hanno anche un nucleo centrale in piombo, la cui plasticizzazione durante gli spostamenti orizzontali indotti dal sisma aumenta le capacità dissipative degli isolatori e di conseguenza della struttura in cui sono installati.



Ne risulta un ciclo isteretico approssimativamente bilineare, mostrato in Figura 2, con uno smorzamento viscoso equivalente che può arrivare al 30 %. Ciò risulta utile per ridurre gli spostamenti, ad esempio nel caso di condizioni di sismicità e di tipo di suolo particolarmente sfavorevoli, oppure per aumentare la resistenza al vento.

Figura 2: Spaccato di un isolatore elastomerico con nucleo in piombo (LRB) e tipico diagramma isteretico ottenuto in una prova dinamica

Recentemente a tale tecnologia è stata affidata la protezione antisismica dell'Istituto Tecnico G. Lombardo Radice di Bojano (CB): in tal modo la struttura risulta integralmente protetta fino a terremoti di progetto aventi  $PGA=0.525g$  [Dusi, Mezzi, 2007]. Non si possono comunque dimenticare le applicazioni relative ai ponti dove trovano facile applicazione – come tutti gli isolatori elastomerici – particolarmente quando i carichi verticali non superano i 10000 kN.

## DISSIPATORI VISCOSI

Un dispositivo dissipatore viscoso è essenzialmente costituito da un cilindro riempito con fluido silconico e da un pistone che separa il cilindro in due camere, libero di muoversi in entrambi i versi. Gli spostamenti indotti dal sisma tra gli elementi strutturali a cui il dispositivo è connesso provocano la laminazione del fluido silconico attraverso un idoneo circuito idraulico che permette la dissipazione di energia. Ne risulta una legge caratteristica Forza – Velocità del tipo  $F=CV^a$  dove  $a$  dipende dalla tecnologia produttiva; per i dispositivi della FIP Industriale  $a \approx 0.15$ , ossia il comportamento è viscoso non lineare. Essendo l'esponente  $a$  vicino a 0, i dispositivi reagiscono con una forza pressoché costante in un ampio intervallo di velocità (Figura 3). La Figura 3 mostra anche che la tecnologia sviluppata è molto stabile nei confronti della temperatura, presentando variazioni molto contenute della reazione in un campo estremamente vasto di temperatura. La Figura 4 mostra un tipico diagramma d'isteresi ottenuto sperimentalmente.

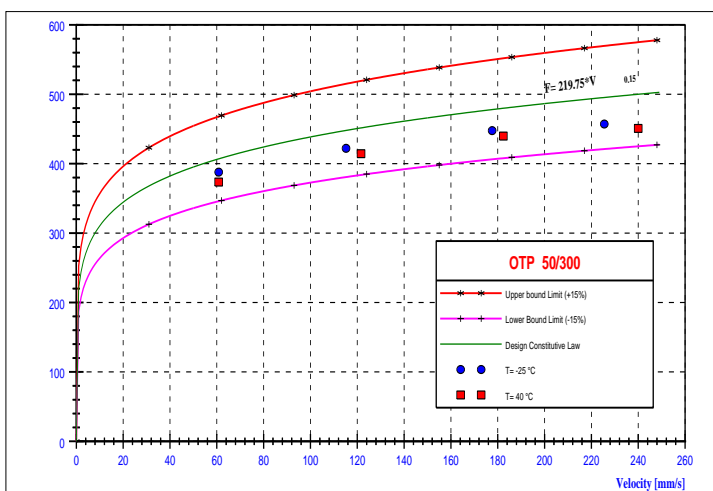


Figura 3: Diagramma forza-velocità di un dissipatore viscoso con risultati sperimentali alle temperature estreme ( $-25^\circ C$ ,  $+40^\circ C$ )

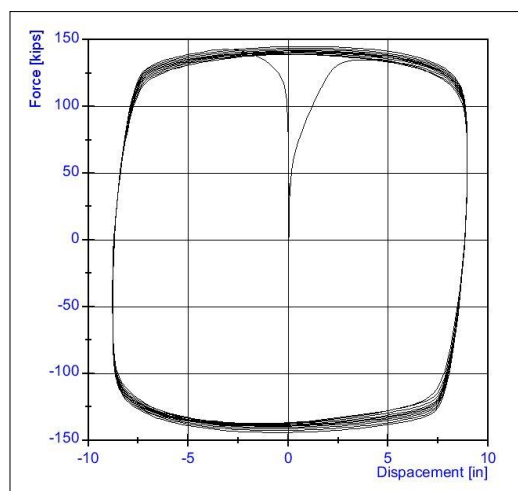


Figura 4 - Diagramma forza-spostamento di un dissipatore viscoso (spostamento imposto con legge sinusoidale)

Le prime applicazioni strutturali di questi dispositivi in Italia risalgono ai primi anni ottanta (viadotti dell'Autostrada Udine-Carnia). Da allora l'evoluzione ed il miglioramento tecnologico del prodotto hanno portato FIP Industriale ad ottenere nel 1996 la prequalificazione alla gara di fornitura per la protezione del Golden Gate Bridge (California, USA), nel 2000 l'inclusione nella lista dei fornitori prequalificati del Caltrans (California Department of Transportation), e a forniture prestigiose quali il ponte di Rion-Antirion in Grecia ed il grattacielo Taipei 101 nel 2004, brevemente descritte nei paragrafi successivi. Attualmente sono in fase di fornitura anche i dispositivi per le St. Francis Towers (due grattacieli gemelli nelle Filippine) e per l'edificio Cascade Park a Bucarest in Romania. In Italia, oltre che in numerosi ponti, i dissipatori viscosi sono stati installati nella chiesa "Dives in Misericordia", progettata da Richard Meier e costruita nel quartiere periferico di Tor Tre Teste in occasione del Giubileo del 2000.

### Il grattacielo Taipei 101, Taipei, Taiwan

Dal 2004 è l'edificio più alto del mondo, con i suoi 508 m. Inizialmente denominato Taipei Financial Center, attualmente è noto con il nome di Taipei 101, con riferimento ai suoi 101 piani fuori terra.

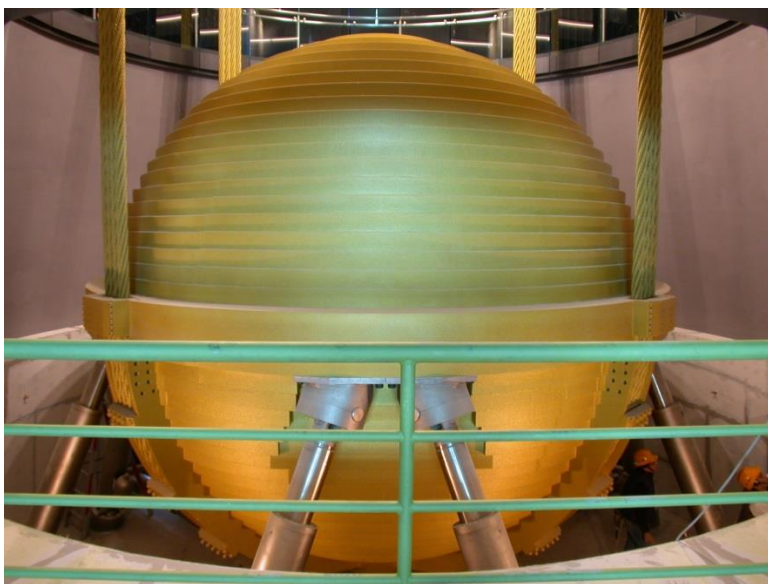


Figura 5: Smorzatore a massa accordata installato nel grattacielo Taipei 101 (immagine gentilmente fornita da Motioneering)

È dotato di uno smorzatore a massa accordata (Tuned Mass Damper-TMD), progettato e realizzato da Motioneering, capace di ridurre sensibilmente le oscillazioni indotte da forti venti (Taipei è spesso soggetta a tifoni) o dal terremoto. Il TMD, che è il più grande del mondo di tipo passivo, è realizzato da una massa di 660 tonnellate, sospesa mediante lunghi cavi, così da realizzare un pendolo la cui lunghezza è pari all'altezza di 5 piani, e da 8 dissipatori viscosi che collegano la massa alla struttura del piano sottostante (Figura 5).

La peculiarità di tali dissipatori è la capacità di reagire con leggi costitutive diverse agli spostamenti indotti dal sisma o dal vento, che hanno velocità diverse. La massa è stata realizzata con forma sferica, poiché il TMD risulta visibile dal ristorante panoramico. Il TMD ha già subito sia scosse di terremoto (marzo 2005) che molteplici tifoni con ricorrenza stagionale.

### Il Ponte Rion-Antirion

Il ponte Rion-Antirion, che attraversa l'omonimo stretto in Grecia, sorge in una regione soggetta a terremoti di forte intensità e a grandi movimenti tettonici delle faglie locali, sismicamente attive. L'impalcato di questo ponte strallato a più campate è continuo ed interamente sospeso (per una lunghezza totale di 2.252 metri) su quattro piloni. I viadotti d'accesso al corpo principale del ponte comprendono un impalcato continuo di 228 m costituito da travi prefabbricate in calcestruzzo collegate in soletta, dalla parte di Antirion, ed un impalcato di 990 m in struttura mista, dalla parte di Rion. Le strutture sono progettate per sopportare eventi sismici caratterizzati da un'accelerazione di picco al terreno di 0,48g (corrispondente ad un periodo di ritorno di 2.000 anni) e movimenti tettonici tra due pile adiacenti di 2 metri in qualsiasi direzione.

Il sistema di protezione sismica del corpo principale del ponte è costituito da dissipatori viscosi e ritegni fusibili disposti in parallelo, i quali collegano l'impalcato ai piloni, in direzione trasversale (Figura 6). I ritegni fusibili sono progettati per fungere da vincolo rigido sotto l'azione di forti venti, fino ad un valore prestabilito di forza (10.500 kN e 3.400 kN in funzione della posizione), leggermente superiore allo stato limite ultimo per i carichi da vento; sotto l'azione del terremoto di progetto, invece, sono concepiti per rompersi e lasciare i dissipatori viscosi (di capacità 3.500 kN, corsa  $\pm 1.750$  mm e  $\pm 2.600$  mm) liberi di dissipare l'energia trasmessa dal sisma alla struttura.

Le specifiche di progetto per i dispositivi antisismici (dissipatori viscosi e fusibili) erano estreme in termini di forza, velocità e corsa, e richiedevano dispositivi dotati di dimensioni e peso mai considerati in precedenza. Di conseguenza, per verificare la corrispondenza del comportamento effettivo con quello richiesto dal progetto, è stata effettuata un'estesa sperimentazione su prototipi di dimensioni reali presso l'Università di San Diego, in California (USA), ed il Laboratorio Prove di FIP Industriale [Infanti et al., 2004].

Anche i viadotti di accesso sono protetti, con un sistema di isolamento costituito da isolatori elastomerici e dissipatori viscosi installati sia in direzione longitudinale che in direzione trasversale.

La struttura, ormai operativa dall'estate del 2004, ha già subito alcune scosse. Durante la costruzione dell'opera, i dispositivi del viadotto di Antirion, ormai completato e quindi già isolato, sono stati "collaudati" positivamente sul campo da un terremoto caratterizzato da un'accelerazione di picco al suolo pari a 0.22g.



Figura 6 – Dissipatori viscosi e fusibile installati nel ponte Rion-Antirion in Grecia

### DISSIPATORI VISCOSI RICENTRANTI

I dissipatori viscosi ricentranti sono essenzialmente costituiti da un cilindro riempito con fluido siliconico, dentro il quale si muovono uno o due pistoni tuffanti, a seconda che il dispositivo sia a semplice o doppio effetto. I dissipatori viscosi ricentranti di FIP Industriale hanno un legame costitutivo del tipo (Figura 7):

$$(1) \quad F = F_0 + K \cdot x + C \cdot v^\alpha$$

dove:

$F_0$  è l'eventuale forza di precarica

$K \cdot x$  è la reazione elastica del dispositivo allo spostamento  $x$

$C$  è la costante di smorzamento

$v$  è la velocità con  $\alpha = 0.15$

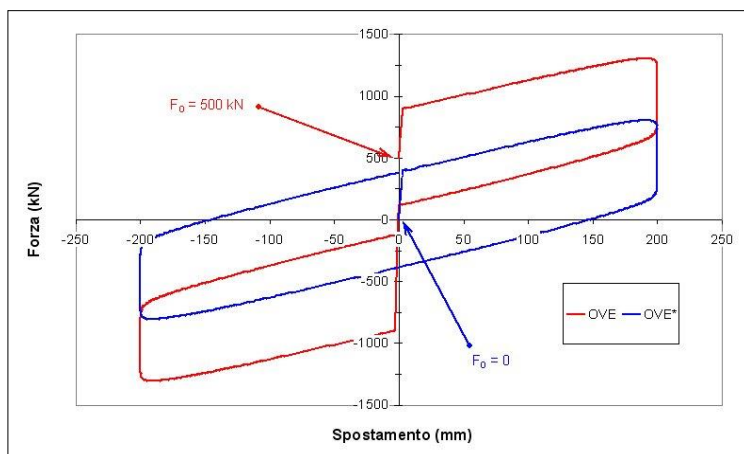


Figura 7: Cicli isteretici teorici di un dissipatore viscoso ricentrante con e senza forza di precarico

Si distinguono quindi dai dissipatori viscosi soprattutto per la presenza di una componente elastica della reazione, in parallelo con la componente viscosa; tale componente elastica favorisce il ricentraggio dinamico della struttura.

L'eventuale precarica impedisce ogni spostamento per forze applicate inferiori alla forza di precarica  $F_0$ . Ciò può essere utile per evitare spostamenti a fronte dei carichi orizzontali di servizio (ad es., in un ponte, frenate o vento).

### Ponte sul Rio Higuamo, Repubblica Dominicana

Un'applicazione significativa dei dispositivi dissipatori viscosi ricentranti è quella al ponte sul Rio Higuamo, situato in una zona altamente sismica. Lo schema statico dell'impalcato è a trave continua su più appoggi, senza un vero e proprio vincolo fisso: infatti il ponte è guidato longitudinalmente da ritegni trasversali in gomma/PTFE disposti sulle spalle e sui piloni centrali e longitudinalmente è tenuto centrato da dissipatori viscosi ricentranti longitudinali, opportunamente precompressi, che realizzano la protezione sismica della struttura. I dissipatori sono progettati per una forza massima di 4.500 kN, una forza di precarica di 1.515 kN, ed uno spostamento massimo di  $\pm 175$  mm [Colato, 2002].

### Duomo di Siena

I dissipatori viscosi ricentranti sono stati recentemente utilizzati nel Duomo di Siena, per la protezione del timpano della facciata dal ribaltamento che potrebbe essere indotto dal sisma. I dissipatori costituiscono il collegamento tra una nuova struttura metallica addossata al lato posteriore del timpano e la copertura. Nel caso di spostamenti relativi tra queste strutture indotti dal terremoto, i dissipatori dissipano energia, limitando quindi le forze trasmesse, e consentono di evitare spostamenti residui alla fine del terremoto grazie alle loro caratteristiche ricentranti.

## DISSIPATORI ISTERETICI IN ACCIAIO

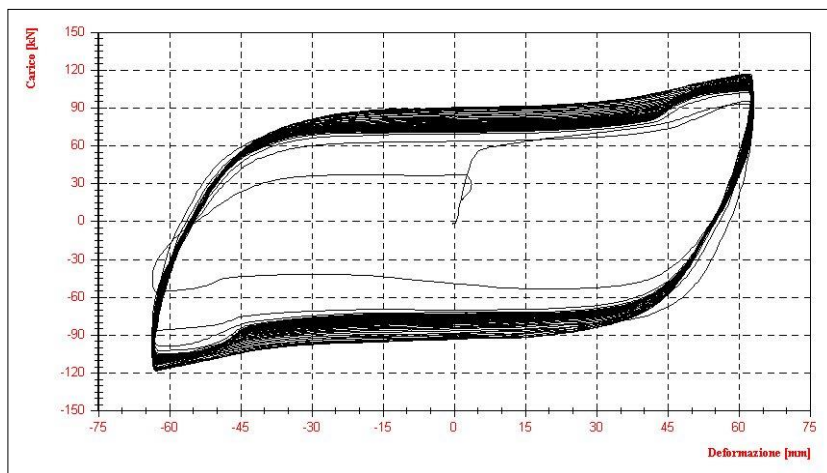


Figura 8:- Cicli isteretici sperimentali di un elemento dissipativo a piolo

I dissipatori isteretici in acciaio sono basati sulla plasticizzazione di elementi dissipativi di varia forma, che possono essere deformati secondo vari meccanismi prevalenti (flessione, taglio, torsione, trazione-compressione).

Gli elementi dissipativi isteretici più diffusi finora in Italia, ma adatti soprattutto per applicazioni nei ponti a causa della rigidità elastica relativamente bassa, sono quelli che lavorano prevalentemente a flessione, come gli elementi a piolo (Figura 8) o a falce di luna o a farfalla. Spesso sono utilizzati come componenti di isolatori a scorrimento in acciaio/PTFE.

Recentemente sono stati sviluppati dissipatori isteretici particolarmente adatti ad essere usati come controventi dissipativi, i dissipatori isteretici assiali ad instabilità impedita (*Buckling-Restrained Axial Dampers - BRAD*), nei quali la dissipazione avviene quando sono sottoposti a cicli alterni di trazione e compressione. Questi dispositivi sono costituiti da un nucleo interno in acciaio, una parte del quale è progettato per dissipare energia in campo plastico, da un tubo esterno in acciaio e da un riempimento in calcestruzzo, i quali evitano che il nucleo interno si instabilizzi quando soggetto a compressione in campo plastico.

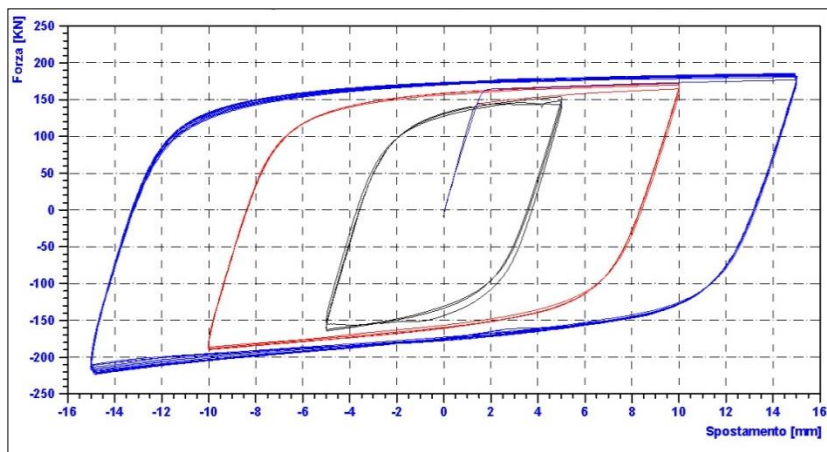


Figura 9: Diagramma forza-spostamento di un dissipatore isteretico assiale ad instabilità impedita

Tra il calcestruzzo ed il nucleo interno è interposto uno strato di speciale materiale distaccante, allo scopo di impedire la trasmissione di tensioni tangenziali tra i due componenti e permettere al nucleo interno di allungarsi o accorciarsi liberamente, dissipando energia. Tali dissipatori sono caratterizzati da un'elevata rigidità elastica, e possono quindi essere vantaggiosamente utilizzati anche nei casi in cui gli spostamenti massimi attesi sono molto piccoli, come avviene negli edifici intelaiati in c.a.

Il diagramma forza-spostamento (Figura 9) è ovviamente elastoplastico, con un'elevata efficienza dissipativa.

### **Ferrovia Caracas-Tuy Medio**

La linea ferroviaria Caracas – Tuy Medio, di 40 km complessivi, comprende 14,9 km di gallerie e 7,8 km di viadotto. Tutti i 26 viadotti sono isolati sismicamente, con più di 1100 isolatori sismici a scorrimento con dissipatori isteretici a fuso e spine a rottura, installati dal 1999 al 2003 [Baldo, Tomaselli, 2003].

La presenza all'interno degli isolatori di elementi sacrificali in acciaio, detti "spine a rottura", consente di ottenere in esercizio uno schema di vincolo convenzionale, impedendo il movimento degli elementi dissipativi a fronte delle azioni orizzontali di esercizio (frenate). In questo caso lo schema di vincolo è di campata isostatica con un'estremità fissa e l'opposta mobile. Quando, per effetto del sisma di progetto, i carichi orizzontali superano il valore di soglia imposto, le spine a rottura si tranciano, così da non costituire più una limitazione agli scorrimenti nella direzione precedentemente bloccata. A questo punto i dissipatori isteretici sono attivati per dissipare l'energia del sisma e controllare il movimento dell'impalcato nel piano.

Oltre alle usuali prove su tutte le tipologie di dissipatori ed elementi sacrificali, effettuate nel Laboratorio Prove di FIP Industriale, l'insieme dissipatore-spina a rottura è stato collaudato in scala 1:1 con prove su tavola vibrante presso i Laboratori dell'ENEL HYDRO (ex ISMES) di Bergamo [Castellano et al., 2001].

### **Il Santuario della Madonna delle Lacrime, Siracusa**

Progettato dagli architetti Michel Andrault e Pierre Parat e dal prof. Riccardo Morandi per le strutture, fu inaugurato nel 1994 da Giovanni Paolo II. E' costituito da una imponente copertura a cupola di forma tronco-conica a pianta circolare, con diametro di base di 71,40 m. La nuova normativa sismica (O.P.C.M. 3274 del 2003), che ha cambiato in modo sostanziale l'intensità delle azioni sismiche di progetto, ha suggerito un intervento di isolamento sismico della copertura [Serino et al., 2007]. Questo è stato realizzato introducendo, tra l'anello di base della cupola e i pilastri che la sorreggono, dei nuovi isolatori sismici a scorrimento con elementi dissipativi in acciaio, in sostituzione dei 22 dispositivi di appoggio preesistenti. Si tratta della prima applicazione ad un edificio di isolatori sismici di questo tipo, già installati in numerosi ponti e viadotti sia in Italia che all'estero.

La FIP Industriale, oltre a fornire gli isolatori, si è occupata anche della loro installazione, che ha richiesto il sollevamento della cupola (del peso di circa 22.000 tonnellate) mediante 114 martinetti azionati contemporaneamente, la sostituzione degli appoggi con i nuovi isolatori, e l'abbassamento della cupola mediante lo scarico contemporaneo di tutti i martinetti [Serino, Castellano, 2006].

### **Il nuovo Polo Didattico dell'Università di Ancona**

L'edificio è a pianta rettangolare di dimensioni 108,5m x 23,3m, con un piano interrato e due piani fuori terra. Per necessità di rapidità di costruzione si è optato per una struttura prefabbricata di c.a. per la parte adibita ad aule ed una d'acciaio per il corpo distributivo (larghezza 6,0 m). La struttura prefabbricata di c.a. è costituita da pilastri incastrati alla base, e travi tessute secondo il lato più lungo e incernierate ai pilastri. Tale tipologia costruttiva sarebbe esclusa dall'O.P.C.M. 3274, che prevede per le strutture prefabbricate a più piani di c.a. la continuità del nodo trave pilastro, per garantire una sufficiente duttilità. Per soddisfare lo spirito dell'Ordinanza, cioè rendere duttile la struttura ed aumentarne l'iperstaticità, il progettista strutturale, Prof. Ing. Rodolfo Antonucci, ha introdotto 43 controventi dissipativi a comportamento isteretico, costituiti da tubolari metallici, disposti a V o V rovescia, ciascuno munito all'estremità di un dissipatore ad instabilità impedita [Antonucci et al., 2006]. Si tratta della prima applicazione in Italia ed in Europa di controventi dissipativi di questa tipologia.

## **DISSIPATORI VISCOELASTICI ELASTOMERICI**

I dissipatori viscoelastici elastomerici sono dispositivi costituiti da uno o più strati in elastomero naturale o sintetico, ciascuno dei quali è vulcanizzato a due piastre in acciaio, attraverso le quali avviene il collegamento agli elementi strutturali.

La dissipazione dell'energia sismica avviene mediante la deformazione a taglio dell'elastomero, indotta dallo spostamento d'interpiano del telaio. L'elastomero è ad alto smorzamento, solitamente con coefficiente di smorzamento viscoso equivalente del 20%, e ne risulta quindi un legame costitutivo modellabile come viscoelastico.

La prima installazione in Europa di dissipatori viscoelastici elastomerici per la protezione sismica di un edificio è stata in Italia, nell'adeguamento sismico della scuola media Gentile-Fermi di Fabriano, resa inagibile dal terremoto Umbria-Marche del 1997 [Antonucci et al., 2001a; Antonucci et al., 2001b;].

## **DISPOSITIVI IN LEGA A MEMORIA DI FORMA**

I dispositivi in lega a memoria di forma sono dispositivi assiali di vincolo, utilizzati soprattutto in edifici storici e monumentali come tiranti per il collegamento tra gli orizzontamenti e le pareti, in sostituzione dei tradizionali tiranti in acciaio o in serie con essi, al fine di evitare il collasso per ribaltamento delle pareti fuori dal loro piano a causa delle azioni orizzontali indotte dal sisma.

Essi sono caratterizzati da una curva forza-spostamento con uno o più "plateaux", ovvero tratti in cui la forza rimane pressoché costante all'aumentare dello spostamento (Figura 10). Ciò consente ai dispositivi di limitare sensibilmente il carico massimo trasmesso alla struttura a cui sono connessi.



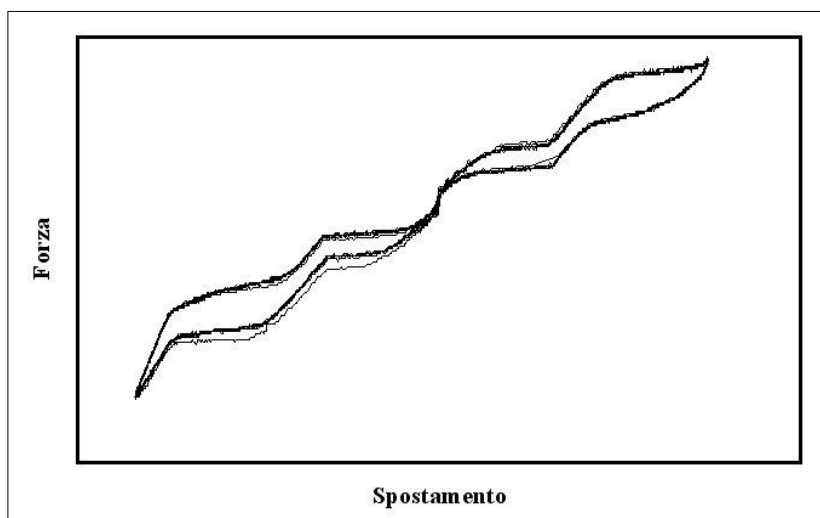


Figura 10: Dispositivo in lega a memoria di forma e tipico ciclo isteretico sperimentale

A differenza dei tradizionali tiranti in acciaio, che costituiscono un collegamento molto rigido, i dispositivi in lega a memoria di forma consentono piccoli spostamenti relativi tra le due porzioni di struttura che collegano (ad esempio facciata e copertura). Il particolare legame costitutivo di questi dispositivi è ottenuto sfruttando le proprietà della lega a memoria di forma di cui sono costituiti, utilizzata sotto forma di fili di piccolo diametro.

I dispositivi in lega a memoria di forma sono stati applicati in diverse strutture monumentali, tra cui la Basilica di San Francesco ad Assisi e la Cattedrale di Foligno, entrambe danneggiate dal terremoto Umbria-Marche del 1997 [Castellano, Frighi, 2000; Castellano et al, 2000].

## DISPOSITIVI DI VINCOLO DINAMICO

I dispositivi di vincolo dinamico, noti anche con il nome inglese di *shock transmitters*, sono dispositivi di vincolo assiale che si attivano solo in condizioni dinamiche. Sono costituiti da un cilindro riempito con fluido silconico e da un pistone che crea due camere, libero di muoversi in entrambi i versi. Nel caso di movimenti bruschi derivanti dal sisma il dispositivo si blocca e blocca rigidamente tutta la struttura a cui è collegato. Nel caso di movimenti lenti, dovuti a dilatazione termica, creep, ritiro, cedimenti differenziali, il dispositivo consente il travaso di fluido da una camera all'altra opponendo una minima resistenza, normalmente inferiore al 10% della forza massima.

I dispositivi di vincolo dinamico trovano valida applicazione quando è richiesto che la struttura cambi il suo schema statico sia in presenza di sisma che di altro evento dinamico. Tali dispositivi, infatti, realizzano lo schema iperstatico temporaneo in caso di azione dinamica, chiamando a collaborare tutta la struttura, e mantengono invece lo schema isostatico in caso di normale esercizio. A tale scopo sono usati da più di 30 anni nei ponti e viadotti; sono anche spesso utilizzati negli impianti sportivi con coperture di grande luce in acciaio o c.a.p., per collegare la copertura alle strutture di supporto. Più recente è l'utilizzo nelle strutture intelaiate in c.a., sia nuove che esistenti, in corrispondenza dei giunti termici. Sono stati anche installati in edifici monumentali, ad esempio nella Basilica di San Francesco ad Assisi [Castellano, Infanti, 2000].

### Il Marin County Civic Center, California, USA

Il Marin County Civic Center, situato a San Rafael, circa 30 km a nord di San Francisco, fu uno degli ultimi edifici progettati da Frank Lloyd Wright. Fu costruito nel 1957, per ospitare diversi uffici pubblici. La porzione dell'edificio adibita a Tribunale (Hall of Justice) è stata adeguata sismicamente nel 2000 mediante controventi dissipativi e dispositivi di vincolo dinamico. Questi ultimi, forniti dalla FIP Industriale, sono stati installati a cavallo dei giunti. In tal modo i giunti rimangono funzionanti per le dilatazioni termiche, mentre durante il sisma è come se non esistessero: l'edificio si comporta come un blocco unico.

### L'Ospedale di Mirano (VE)

L'utilizzo dei dispositivi di vincolo dinamico nel complesso edilizio in ampliamento al Monoblocco Ospedaliero esistente ha consentito l'adeguamento sismico dell'opera - già in fase di realizzazione - all'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri 3274/03 [Breda, Castellano, 2007].

Il progetto strutturale originario prevedeva la realizzazione di 4 corpi di fabbrica distinti per la presenza di giunti tecnici in cui la continuità strutturale era ottenuta, per i soli carichi statici, con la posa di collegamenti a taglio in grado di trasferire i carichi della campata dei solai adiacenti al giunto ai pilastri del vicino corpo di fabbrica, senza richiedere il raddoppio delle strutture verticali. Per ridurre al minimo le modifiche architettoniche, in particolare in prossimità dei giunti, si è optato per il mantenimento dei giunti a taglio per la trasmissione dei carichi verticali, e l'impiego di dispositivi di vincolo dinamico accoppiati ed inclinati a 45° rispetto all'asse longitudinale dell'edificio. Le diverse forze che i dispositivi devono trasmettere nei vari punti sono state ottenute combinando opportunamente dispositivi di tre diverse tipologie, ossia progettati per forze di 100, 200 e 350 kN. Lo spostamento di progetto è di  $\pm 25$  mm per tutte e tre le tipologie. In totale sono stati utilizzati 102 dispositivi di vincolo dinamico.

### Storebaelt East Bridge, Danimarca

Lo Storebaelt East Bridge è, per lunghezza, il secondo ponte sospeso al mondo con una campata principale di 1624 m e lunghezza complessiva di circa 7 km. Il movimento longitudinale dell'impalcato principale indotto dal vento o dai normali carichi di esercizio è controllato da 4 dispositivi di vincolo dinamico, progettati per una forza idraulica massima di 5.000

kN, una forza meccanica massima di 15.000 kN, ed uno spostamento di  $\pm 1.100$  mm. Sono state condotte diverse prove sperimentali per simulare le condizioni ambientali estreme (da  $-35$  °C a  $+60$ °C) a cui i dispositivi sono soggetti e per assicurarne la costanza delle prestazioni, in quanto tutta la struttura è stata progettata per mantenere funzionalità, sicurezza ed una buona efficienza per almeno 100 anni.

## CONCLUSIONI

La tecnologia del controllo passivo della risposta strutturale mediante isolamento sismico e/o dissipazione di energia è ormai matura, e sul mercato italiano sono disponibili praticamente tutti i prodotti di isolamento e dissipazione esistenti al mondo. Il progettista ha così la possibilità di scegliere i dispositivi o la combinazione di dispositivi più adatti alle particolari esigenze di ciascuna struttura, sia nuova che esistente.

## BIBLIOGRAFIA

- Antonucci, R., Balducci, F., Castellano, M.G., Ahmadi, H., Goodchild, I., Fuller, K., (2001a) . *Viscoelastic dampers for seismic protection of buildings: an application to an existing building*. Proceedings of Fifth World Congress on Joints, Bearings and Seismic Systems for Concrete Structures, Rome
- Antonucci, R., Balducci, F., Castellano, M.G., Donà, F., (2006). *Pre-casted RC buildings with buckling restrained braces: the example of the new building of the faculty of engineering in Ancona*. Proceedings of the *Second International fib Congress*, Napoli, Italy, June 5-8, 2006, paper No. 879
- Antonucci, R., Balducci, F., Lova, S. (2001b) *Lezioni di sostegno*. Costruzioni Due n. 1, Anno IV, Dicembre 2000 - Gennaio 2001.
- Baldo P., Tomaselli F., (2003). *The seismic protection of the Caracas-Tuy Medio Railway in Venezuela*. Fourth International Conference STESSA 2003: Behaviour of steel structures in seismic areas, Napoli
- Breda G., Castellano M.G. (2007). *Dispositivi di vincolo dinamico per l'Ospedale di Mirano (VE)*. GLIS News n° 1-2006
- Castellano M.G., Infanti S., Saretta G., (2001). *Validation of steel hysteretic dampers through shaking table test*. Fifth World Congress on Joints, Bearings and Seismic Systems for Concrete Structures, Roma
- Castellano, M.G., Frighi, I. (2000). *Salvaguardare il patrimonio artistico "a memoria"*. Costruzioni Due, N. 2, Anno III, Febbraio /Marzo 2000
- Castellano, M.G., Infanti S., (2000) *Shock transmitters di acciaio inossidabile duplex con ruolo di dispositivi di vincolo dinamico per la protezione sismica di strutture monumentali*. Il Convegno del 2000. Atti del 28° Convegno Nazionale AIM, Milano, 8-10 Novembre 2000
- Castellano, M.G., Infanti S., Indirli M., Tirelli D. (2000). *Dispositivi in lega a memoria di forma per la protezione sismica di strutture monumentali*. Il Convegno del 2000. Atti del 28° Convegno Nazionale AIM, Milano, 8-10 Novembre 2000
- Colato G.P. (2002). *Protezione sismica del ponte sul Rio Higuamo nella Repubblica Dominicana*. Nota Tecnica FIP Industriale NT 1578bis
- Di Sarno L., Cosenza E., Pecce M.R. (2007). *Application of Base Isolation to a Large Hospital in Naples*. Proceedings of the 10<sup>th</sup> World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibrations Control of Structures, Istanbul, Turkey, May 2007
- Di Sarno L., De Risi B., Mascolo C. (2006). *Application of base isolation to a large hospital building*. Proceedings of First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (1st ECEES), Geneva, Switzerland, 3-8 September 2006, Paper No. 48
- Dolce, M., Martelli A., Panza G. (2006) *Moderni metodi di protezione dagli effetti del terremoto*. 21°secolo, Milano, 2006.
- Dusi A., Mezzi M. (2007) *Il nuovo Istituto Tecnico G.Lombardo Radice di Bojano*. In "La sfida dell'isolamento sismico" – Editor Alberto Parducci. EdA Esempi di Architettura n. speciale giugno 2007
- Guerreiro, L., Prazeres Ferreira, J., Colato, G.P., Castellano, M.G., Baldo, P (2005). *Base isolation for seismic protection – The new hospital in Lisbon*. Proceedings of IABSE Symposium on Structures and Extreme Events, Lisbon, Portugal, September 14-46, 2005
- Infanti S., Colato G.P., Castellano M.G. (2000). *Structural devices for bridge engineering: the challenge goes on*. Proceedings of Bridge Engineering Conference 2000 – Past Achievements, Current Practices, Future Technologies, Sharm El-Sheikh.
- Infanti, S., Papanikolas, P., Benzoni, G., Castellano, M.G., (2004) *Rion-Antirion Bridge: design and full-scale testing of the seismic protection devices*. Proceedings of 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004, Paper No. 2174
- Prazeres Ferreira, J. (2006). *Hospital da Luz – Um edificio com isolamento sísmico de base*. Engenharia e vida, anno III, N. 25
- Serino G, Castellano M.G. (2006) *Isolamento sismico e monitoraggio del Santuario della Madonna delle Lacrime in Siracusa*. GLIS News n° 1, 2006
- Serino G., Spizzuoco M., Marsico M.R. (2007) *Isolamento sismico del Santuario "Madonna delle Lacrime" in Siracusa*. ANIDIS 2007 – XII Convegno Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia", Pisa, 10-14 giugno 2007