



### Alessandro Martelli



*Laureato in ingegneria chimica all'Università di Bologna, dottore di ricerca in ingegneria nucleare all'Università di Karlsruhe (Germania); impegnato nel Centro di Ricerche Nucleari (KFK) di Karlsruhe (Germania), funzionario della General Atomic Europe di Zurigo (Svizzera), delegato alla General Atomic Company di San Diego (USA), delegato dal CNEN al Centro di Ricerche Nucleari di Saclay (Francia). Attualmente docente di Costruzioni in zona sismica alla Facoltà di Architettura dell'Università degli Studi di Ferrara. È all'ENEA dal 1979, dove è responsabile dell'Unità Analisi e Progettazione Sismica (SISM) fino al 2002, quando diviene responsabile della Sezione Prevenzione Rischi Naturali e Mitigazione Effetti (PROT-PREV) dell'attuale Dipartimento Ambiente, Cambiamenti Globali e Sviluppo Sostenibile (ACS). Dalla sua fondazione nel 1989, è coordinatore del Gruppo di Lavoro Isolamento Sismico (GLIS), e, dall'inizio del 2007, presidente della nuova associazione "GLIS – Isolamento ed altre Strategie di Progettazione Antisismica", che è subentrata al preesistente GLIS con la stessa denominazione abbreviata. È presidente dell'Anti-Seismic Systems International Society (ASSISi), in cui sono rappresentati 30 Paesi oltre alla UE. Autore o coautore di circa 370 pubblicazioni sulle analisi sismiche è anche collaudatore di importanti edifici pubblici e privati, protetti con l'isolamento sismico.*

WORKSHOP

## La sicurezza strutturale: soluzioni di prevenzione del danno sismico

401

Le moderne normative sismiche richiedono che le costruzioni 1) non crollino sotto l'azione di terremoti violenti e 2) non subiscano danni significativi durante eventi di bassa/media intensità. Sebbene le costruzioni tradizionali progettate in accordo con tali requisiti limitino le conseguenze più gravi ai terremoti veramente violenti, con esse, però, non si consegue una vittoria totale e definitiva sul sisma. Ecco perché l'attenzione si è concentrata, negli ultimi 20-30 anni, sulla messa a punto di tecnologie innovative per la riduzione delle azioni sismiche o dei loro effetti. L'obiettivo è stato di superare le limitazioni delle costruzioni tradizionali riguardanti l'accettazione di danni anche considerevoli e dell'inutilizzabilità delle costruzioni stesse a fronte del non crollo per effetto di terremoti di forte intensità, nonché di rendere più semplici, efficaci ed economici gli interventi sull'esistente. Per quanto attiene alla riduzione degli effetti del terremoto, lo sviluppo tecnologico ha riguardato la messa a punto di materiali e di tecniche per le nuove costruzioni e per gli interventi sull'esistente in grado di accrescere significativamente la resistenza sismica sia della struttura portante che degli elementi non strutturali, inclusi i "contenuti". Per quanto riguarda, invece, la riduzione delle azioni sismiche, le strategie perseguite sono principalmente riconducibili all'isolamento sismico ed alla dissipazione d'energia. Questo scritto introduce soprattutto tali ultime strategie, rinviando ad altri relatori per quelle tese ad accrescere la resistenza strutturale.



402

## Introduzione

I terremoti sono fra i disastri naturali più comuni e sono, spesso, i più catastrofici per l'umanità. Nel mondo se ne verificano annualmente almeno un paio di distruttivi ed il numero medio annuo delle vittime è superiore a 20000 (Dolce et al., 2005 & 2006). Inoltre, terremoti particolarmente violenti che si verificano sotto gli oceani o i mari (ovvero anche in terraferma, in prossimità delle coste) possono provocare disastrosi maremoti, come, purtroppo, quello tristemente noto di Banda-Aceh, prodotto dall'omonimo terremoto di magnitudo probabilmente superiore a 9,3 il 26 dicembre 2004 nell'Oceano Indiano, al largo di Sumatra.

Circa un terzo della popolazione mondiale vive in zone esposte al pericolo di terremoti e, sovente, occupa edifici non adeguati a resistere alle vibrazioni del terreno da essi causate: il sisma è, quindi, una reale minaccia per l'umanità intera. Si tratta di un fenomeno ricorrente, ma fortemente irregolare nei suoi tempi di accadimento: ogni cento, duecento anni, od anche più, nelle zone ad elevata pericolosità sismica avviene un forte terremoto, che, in assenza di un'adeguata progettazione antisismica, provoca crolli di costruzioni e vittime. L'irregolarità con cui i forti terremoti si succedono nelle diverse zone contribuisce alla riduzione della consapevolezza del rischio sismico e, conseguentemente, molto spesso, alla limitatezza delle risorse dedicate alla sua mitigazione.

## Il rischio sismico in Italia

L'Italia, contrariamente a quanto è sovente affermato e creduto, è il paese caratterizzato dal rischio sismico più elevato nell'Europa Comunitaria ed è uno dei paesi industrializzati a maggior rischio sismico, a livello mondiale (Dolce et al., 2005 & 2006). Per quanto riguarda l'Eu-

ropa Comunitaria, il fatto che in Grecia la frequenza dei terremoti con magnitudo superiore a 6 (che sono, usualmente, gli eventi che possono causare vittime) sia superiore a quella dell'Italia è compensato dalla maggiore densità di popolazione del nostro paese. Una stima effettuata in base ai dati di questo secolo indica che, in Italia, il numero medio di abitanti per chilometro quadrato che è annualmente esposto al verificarsi di un terremoto di magnitudo maggiore di 6 è pari a 75, mentre tale numero scende a 64 per la Grecia.

<i>Evento di magnitudo 7,0</i>		
	Morti	Feriti
<b>Appennino meridionale</b>	5000÷11000	>15000
Media mondiale	6500	20500
Giappone	50	250
<i>Evento di magnitudo 7,5</i>		
	Morti	Feriti
<b>Calabria</b>	15000÷32000	>37000
Media mondiale	18500	75000
Giappone	400	2000

TAB. 1 Numero di vittime (morti e feriti) attese, a parità di popolazione colpita, sia in aree italiane ad elevata pericolosità sismica, sia in Giappone, sia (in media) a livello mondiale

Ancora più impressionante è il confronto, riportato nella Tabella 1, tra il numero di vittime (morti e feriti) attese per un evento sismico in Italia, nel mondo ed in Giappone: i risultati conseguiti in quest'ultimo paese non sono solo il frutto dello sviluppo tecnologico (che ha lì trovato vasta applicazione nella comune edilizia residenziale, pubblica e privata, oltre che nelle strutture strategiche e pubbliche), ma anche quello di approfondite ricerche di base sulle modalità di propagazione ed attenuazione delle onde sismiche e sulla fisica dei terremoti.

Sebbene il problema sia globale, le esperienze acquisite in una regione, generalmente, non possono, però, essere facilmente trasferite ad altre realtà. Ad esempio, la particolarità degli insediamenti urbani in Europa e, in particolare, in Italia, che costituiscono un patrimonio culturale unico al mondo, non permette di trasferirvi direttamente le esperienze maturate in paesi come gli Stati Uniti ed il Giappone: la sequenza di eventi che colpì l'Umbria e le Marche nel 1997 e nel 1998 costituisce un chiaro esempio dell'unicità del rischio sismico associato ad insediamenti con costruzioni di grande valore storico e artistico.

### La vulnerabilità sismica in Italia

Nel passato la prevenzione era affidata quasi esclusivamente alla memoria storica dell'uomo, che tramandava, di generazione in generazione, le lezioni che il terremoto impartiva, attraverso le vittime da esso causate, i danni inferti alle costruzioni, il bestiame perito e le catastrofi sociali che ne conseguivano (Dolce et al., 2005 & 2006). Erano lezioni che riguardavano la migliore localizzazione delle costruzioni (luoghi anche a poca distanza tra loro possono essere soggetti a scosse sismiche di intensità anche significativamente diverse, a causa della differente natura dei terreni), il modo di erigere tali costruzioni perché potessero resistere meglio alle vibrazioni indotte dal sisma, l'uso di buoni materiali e di particolari accorgimenti costruttivi. Purtroppo, la memoria dei terremoti si affievoliva nel tempo e le lezioni da essi impartite erano dimenticate dopo due o tre generazioni: di conseguenza, progressivamente, si abbandonavano quelle precauzioni ed attenzioni nel costruire atte a ridurre gli effetti di tali eventi.

È per questo che, oggi, il patrimonio edilizio italiano, quello più antico, o semplicemente più "vecchio", quello, insomma, costituito da edifici in muratura costruiti nei secoli passati od anche all'inizio di questo secolo, è così vulnerabile all'azione dei terremoti. È, inoltre, per questo che anche molte strutture costruite in Italia più recentemente utilizzando il cemento armato sono state realizzate con armature e calcestruzzi del tutto inadeguati, che sovente le rendono non solo incapaci di resistere al terremoto, ma addirittura insicure a fronte dei soli carichi statici. Le indagini sulla sicurezza degli edifici, in particolare di quelli strategici e pubblici (effettuate come prescritto dall'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri - OPCM - n. 3274/2003, con la quale sono entrate in vigore sia la nuova normativa sismica italiana che i criteri generali di riclassificazione sismica del territorio nazionale, e dalle sue successive modifiche ed integrazioni oggetto delle OPCM n. 3316/2003 e n. 3431/2005), hanno purtroppo mostrato che quest'ultimo allarmante problema ha dimensioni assai più vaste del previsto. Più in generale, l'elevata vulnerabilità sismica del patrimonio edilizio italiano è stata evidenziata da tutti i terremoti significativi degli ultimi 20-30 anni: da quello del Friuli nel 1976, a quelli dell'Irpinia (o campano-lucano) del 1980, dell'Abruzzo del 1984, della Basilicata del 1990, delle Province di Reggio Emilia e Modena del 1996, dell'Umbria e delle Marche del 1997-98, del Pollino del 1998 e, infine, del Molise e della Puglia del 2002.

### La nuova normativa sismica italiana e la riclassificazione sismica del territorio nazionale

I provvedimenti presi con la summenzionata OPCM n. 3274, pubblicata l'8 maggio 2003, e con le sue successive modifiche e integrazioni, cercando di porre rimedio ad una perdurante situazione d'inadeguatez-

za degli strumenti normativi, hanno evidenziato le carenze inammissibili nella prevenzione sismica che caratterizzavano la situazione precedente (Dolce et al., 2005 & 2006). Con la nuova classificazione, in pratica, tutto il territorio italiano è considerato, giustamente, a rischio (ed il 70%, quello nelle zone 1÷3, a rischio rilevante), laddove soltanto circa il 45% lo era precedentemente e soltanto il 25% lo era prima del 1980. Con la nuova normativa l'Italia si allinea al resto dell'Europa ed anzi (con la liberalizzazione da essa operata dell'uso delle moderne tecnologie antisismiche d'isolamento sismico e dissipazione d'energia) si pone all'avanguardia, dopo anni e anni di rinvii sull'adozione di nuove regole di progettazione aggiornate alle conoscenze oramai consolidate del mondo scientifico: gli studi d'ingegneria sismica, volti a definire criteri, metodi e tecnologie costruttive antisismici, hanno fatto passi da gigante negli ultimi trent'anni e gli strumenti progettuali si sono evoluti in maniera significativa, al punto da far ritenere non sufficientemente sicuri persino gli edifici costruiti in Italia con le vecchie norme sismiche. Tenuto conto, pertanto, del fatto che la normativa sismica italiana era in larga misura inadeguata a garantire i necessari livelli di sicurezza rispetto al danno ed al crollo e che la pericolosità sismica del territorio italiano era, per molte sue parti, ancora non riconosciuta dalla classificazione ufficiale, appare evidente come il problema della sicurezza degli edifici nei confronti del terremoto coinvolga milioni di abitazioni e numerosissimi altri edifici e strutture in muratura ed in cemento armato.

### **I requisiti della progettazione antisismica**

In Italia, così come negli altri paesi tecnologicamente sviluppati, le costruzioni progettate secondo i criteri previsti dalle moderne normative sismiche devono soddisfare due requisiti fondamentali rispetto ai terremoti che possono colpirle (Dolce et al., 2005 & 2006):

- non devono crollare sotto l'azione di terremoti violenti;
- non devono subire danni significativi per effetto di terremoti di bassa/media intensità.

Il primo requisito presuppone l'accettazione di danni anche gravi alle costruzioni, a condizione, però, che esse non crollino: si minimizzano così i danni alle persone (ferimenti e vittime). Il secondo requisito è di fondamentale importanza in termini economici, perché è volto a minimizzare i costi di riparazione dopo i terremoti che, quasi sicuramente, colpiranno le costruzioni durante la loro "vita". È necessario, quindi, che questi ultimi non causino danni significativi, ovvero non producano conseguenze economiche rilevanti. Con i due requisiti suddetti si prende atto del fatto che è pressoché impossibile realizzare costruzioni "tradizionali" (cioè non protette da particolari sistemi antisismici atti a

ridurre drasticamente le azioni sismiche o i loro effetti) che possano resistere senza danni a qualunque terremoto cui nel futuro potranno verosimilmente essere soggetti.

Se tutte le costruzioni rispettassero i requisiti succitati, nel caso di un sisma di piccola o media intensità, dunque piuttosto frequente, non si avrebbero sicuramente né vittime né ripercussioni importanti di tipo economico, dirette o indirette; al di là dell'inevitabile paura causata da qualsiasi terremoto e dei provvedimenti prudenziali d'evacuazione di breve periodo (qualche ora o qualche giorno), la vita potrebbe proseguire normalmente, senza alcuna conseguenza, né economica, né sociale. Nell'ipotesi suddetta, se, invece, si verificasse un sisma violento – come quello di Messina e Reggio Calabria del 1908, quello del Friuli del 1976 (di cui ricorre quest'anno il trentesimo anniversario) o quello campano-lucano del 1980 – esso causerebbe un numero limitato di vittime, ma sicuramente si avrebbero forti ripercussioni di carattere economico, dirette o indirette, e sociale (a meno di un uso esteso dei sistemi antisismici “non tradizionali” prima menzionati o, quantomeno, di tecniche innovative di rinforzo e di costruzione): si renderebbero necessari provvedimenti d'evacuazione di lungo periodo (mesi od anni), per permettere la riparazione dei danni o la ricostruzione degli edifici irrecuperabili, la messa in campo di alloggi provvisori (container o prefabbricati), con conseguenze economiche e sociali comunque gravi. Essendo, infatti, danneggiati (se realizzati in modo tradizionale) anche quegli edifici in cui si svolgono le attività produttive (fabbriche, uffici, esercizi commerciali) e sociali (scuole, ecc.), nonché altre strutture ed infrastrutture (ponti, viadotti ed impianti), la vita normale subirebbe una drammatica interruzione, con l'attenzione tutta rivolta a fronteggiare l'emergenza. La distruzione od il danneggiamento degli elementi non strutturali degli edifici tradizionali, di delicate apparecchiature ed altri oggetti di valore (o comunque importanti) contenuti nelle costruzioni strategiche, a causa delle vibrazioni sismiche che comunque penetrerebbero all'interno delle strutture suddette, produrrebbero gravi conseguenze, quali lunghe interruzioni del normale funzionamento (si pensi agli ospedali), rilevanti perdite economiche (si pensi ai centri computerizzati delle banche o di altre aziende) e la perdita di opere d'arte (si pensi ai musei e agli edifici d'interesse storico e artistico). L'esperienza dei terremoti, anche di quelli più recenti, evidenzia “tempi di recupero” di decenni e, comunque, l'impossibilità di rimediare totalmente a tutti i danni del terremoto.

### **Lo sviluppo di tecnologie innovative di progettazione antisismica**

Dunque, sebbene le costruzioni tradizionali progettate con i criteri antisismici previsti dalle moderne normative possano condurre a significativi progressi, limitando le conseguenze più gravi ai terremoti veramente violenti, non si può dire che, con esse, si riesca a conseguire una

vittoria totale e definitiva sul sisma (Dolce et al., 2005 & 2006). Si comprende, quindi, perché l'attenzione del mondo della ricerca e dell'industria si sia concentrata, negli ultimi 20÷30 anni, sulla messa a punto di tecnologie innovative per la riduzione delle azioni sismiche o dei loro effetti.

Da un lato, l'obiettivo è stato di superare le limitazioni delle costruzioni tradizionali, riassumibili nel secondo requisito della moderna ingegneria sismica (quello che, a fronte del non crollo per effetto di terremoti di forte intensità, implica, di fatto, l'accettazione di un danno anche considerevole e, dunque, dell'inutilizzabilità della costruzione); dall'altro, si sono voluti rendere più semplici ed efficaci, nonché più economici, gli interventi di miglioramento ed adeguamento sismico delle strutture esistenti.

Su queste tematiche opera in Italia, fino dal 1989, il GLIS ("Gruppo di Lavoro Isolamento Sismico"), a cui il 1° gennaio 2007 subentrerà, con la stessa denominazione abbreviata, la nuova associazione "GLIS – Isolamento ed altre Strategie di Progettazione Antisismica".

Il GLIS, che ormai conta circa 300 soci in rappresentanza di tutti i settori attivi nello sviluppo e nell'applicazione delle moderne tecnologie antisismiche, promosse, nel 2003, la fondazione dell'Anti-Seismic Systems International Society (ASSISi, che attualmente annovera oltre 100 soci individuali e corporate in rappresentanza di 30 paesi e della Commissione Europea) e, nel 2004, quella della Sezione Territoriale Italiana dell'ASSISi.

Per quanto attiene alla riduzione degli effetti del terremoto, lo sviluppo tecnologico ha riguardato la messa a punto di materiali e di tecniche per le nuove costruzioni e gli interventi sull'esistente in grado di accrescere significativamente la resistenza sismica, sia della struttura portante, sia degli elementi non strutturali, inclusi i "contenuti" (il cui valore supera ormai di molto, per numerosi edifici, quello della struttura e la cui integrità è di fondamentale importanza, in particolare per le strutture strategiche o pubbliche, quali, ad esempio, gli ospedali, i centri di gestione dell'emergenza e le scuole).

Di questo argomento trattano, per alcuni aspetti, le prime due relazioni di questa sessione di Constructa. In particolare, la seconda verte sulle problematiche del fissaggio in zona sismica, sulla cui risoluzione la società Fischer Italia, aderente al GLIS, vanta ottime e consolidate esperienze (Redazione, 2006).

Fra le ulteriori tecniche innovative di costruzione sono da citare anche il sistema CAM (Cuciture Attive della Muratura), mutuato dalle tecniche d'imballaggio (Dolce et al., 2005 & 2006) e quello della Società EMMEDUE (aderente sia al GLIS che all'ASSISi), basato sull'uso di pannelli molto leggeri, costituiti da due reti d'acciaio zincato elettrosaldato, poste in adiacenza alle facce di una lastra centrale in polistirene espanso, sagomato ad onda (Candiracci e Bassotti, 2006).

### I sistemi d'isolamento sismico

Per quanto riguarda la riduzione delle azioni sismiche, le strategie progettuali e costruttive perseguite sono principalmente riconducibili all'isolamento sismico ed alla dissipazione di energia.

L'isolamento sismico, realizzato negli edifici mediante l'inserimento di dispositivi molto flessibili (generalmente alla base o in corrispondenza del piano più basso – FIGG. 1÷4), è quella più efficace, perché, “filtrando” le vibrazioni sismiche pericolose per le costruzioni, fa sì che, durante un terremoto, queste ultime si muovano, sopra il sistema d'isolamento, pressoché come “corpi rigidi” e molto lentamente (anche se con spostamenti significativi – tipicamente, in Italia, dai 10 ai 40 cm) e ne permette, quindi, la protezione integrale (cioè anche degli elementi non strutturali e dei contenuti) fino ai terremoti più violenti, minimizzando anche il panico.

Si noti che gli ampi movimenti laterali suddetti non comportano alcun problema realizzativo, neppure per gli elementi (tubazioni, scale, ascensori) che entrano nella sovrastruttura isolata (o permettono di accedere) da una costruzione adiacente a base fissa od indipendentemente isolata: in particolare, per le tubazioni (incluse quelle contenenti materiali pericolosi, come il gas), il problema è agevolmente risolto mediante opportuni sistemi di vincolo, geometrie delle linee e/o giunti e snodi adatti.



FIG. 1 L'ala nuova dell'Ospedale Gervasutta di Udine, che è stato il primo ospedale italiano ad essere isolato sismicamente (con 56 HDRB), a costruzione completata e durante la sua realizzazione nel 2005

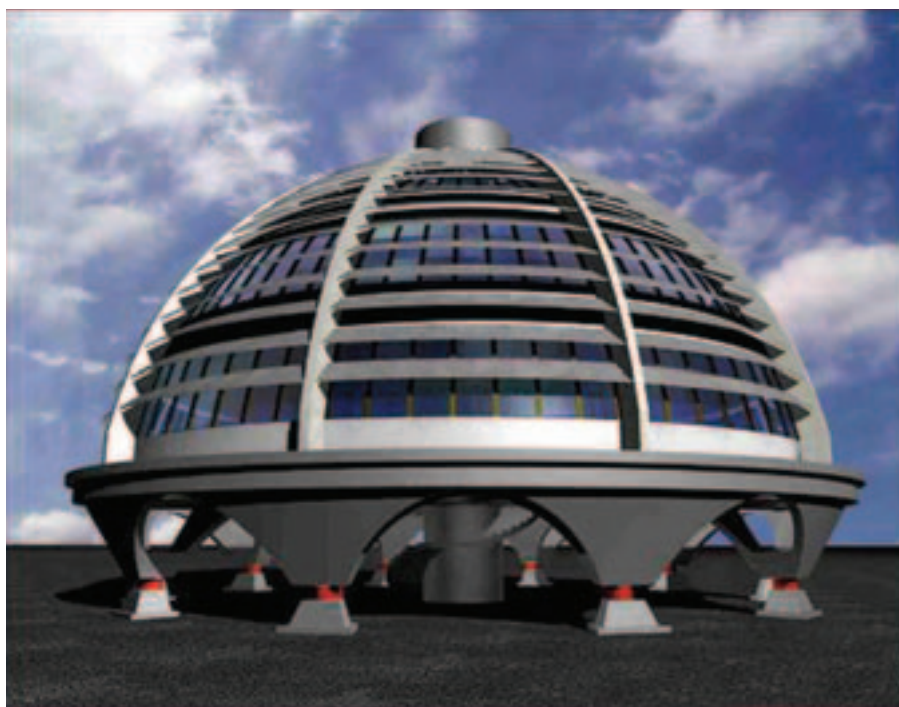


FIG. 3 L'edificio d'ingresso del nuovo Centro della Protezione Civile di Foligno, da costruire a breve con 10 HDRB di 1 m di diametro

Si noti anche che, in considerazione del movimento quasi rigido della sovrastruttura e grazie alla possibilità di variare le caratteristiche dei singoli isolatori in modo da minimizzare gli effetti torsionali, l'isolamento sismico permette di realizzare, in un unico corpo di fabbrica, anche edifici con forti asimmetrie sia in alzata che in pianta.

Per quanto riguarda anche i soli costi di costruzione, gli evidenti vantaggi che le suddette possibilità comportano vanno ad aggiungersi a quelli derivanti dalla notevolissima riduzione delle azioni sismiche prodotte dall'isolamento sulla sovrastruttura, dalla parallela riduzione delle reazioni sulle fondazioni e più semplice realizzazione dei nodi travelpilastro, nonché dalla progettazione anch'essa più semplice, oltre che più affidabile (essendo il comportamento della sovrastruttura essenzialmente elastico), dalla possibilità di costruire edifici di notevole altezza anche in muratura e, *last but not least*, dall'ampia libertà lasciata al progetto architettonico (si vedano, ad esempio, le FIGG. 2 e 3).

Infatti, la nuova normativa sismica italiana permette, giustamente, di tener conto della riduzione delle azioni e delle reazioni sismiche operate dall'isolamento e ciò, oltre ad assicurare una sicurezza molto elevata ed un bilancio economico complessivo sempre favorevole alle costruzioni protette con tale sistema, permette di compensare, almeno parzialmente, i costi di costruzione aggiuntivi connessi alla sua utilizzazione (dispositivi, solaio aggiuntivo, se necessario, ecc.); anzi, in siti caratterizzati da una pericolosità sismica significativa, i costi di costruzione



FIG. 3 Plastico della nuova scuola Francesco Jovine di San Giuliano di Puglia (Campobasso), in costruzione dopo il collasso di quella preesistente avvenuto durante il terremoto del Molise e della Puglia del 2002, e vista di alcuni dei 61 HDRB che la proteggeranno assieme a 12 SD acciaio-teflon



FIG. 4 Plastico di 6 edifici residenziali da realizzare a Marigliano (Napoli) su un'unica piattaforma isolata con 40 HDRB e 12 SD

di un edificio isolato anche di media altezza sono sovente inferiori a quelli che esso ha con fondazioni convenzionali (Martelli e Forni, in stampa).

I sistemi d'isolamento sismico (sui cui vantaggi vertono anche la terza relazione e la quarta di questa sessione di Constructa), oltre a dover conferire alle strutture periodi d'oscillazione  $T_{is}$  molto maggiori di quelli che le caratterizzerebbero nel caso di fondazioni convenzionali (tipicamente, in Italia,  $T_{is} \geq 2 \div 2,5$  s), devono essere ricentranti (per evitare spostamenti residui a fine terremoto) e possedere una capacità dissipativa tale da limitare i movimenti della sovrastruttura a valori accettabili (frazione di

smorzamento critico  $\geq 10\%$ ). Gli isolatori più frequentemente utilizzati in tali sistemi limitano poi la loro azione al solo piano orizzontale (per evitare pericolosi effetti di *rocking*, in assenza di sofisticati sistemi atti ad eliminarli), cosa più che sufficiente per le normali costruzioni. Questi isolatori sono in gomma naturale (o, talvolta, artificiale, in neoprene), armati internamente con lamine d'acciaio, ovvero a scorrimento, ovvero (in particolare per strutture molto leggere) a rotolamento. Gli isolatori in gomma naturale sono ad alto smorzamento, grazie a speciali additivi (*High Damping Rubber Bearing* o HDRB – FIGG. 1÷4), o con nuclei interni di piombo (*Lead Rubber Bearing* o LRB), od anche a basso smorzamento (*Low Damping Rubber Bearing* o LDRB); in quest'ultimo caso il sistema d'isolamento include dissipatori, posti in parallelo ai LDRB. Gli attuali isolatori a scorrimento (*Sliding Device* o SD) sono, invece, usualmente appoggi acciaio-teflon: questi sono ora spesso accoppiati ad HDRB o LRB, per ottimizzare il sistema d'isolamento, inserendoli nelle posizioni su cui gravano carichi verticali limitati (FIG. 4), e per facilitare l'azzeramento degli effetti torsionali nel caso di strutture con forti asimmetrie in pianta (FIG. 3). A scorrimento sono anche il *Friction Pendulum System* (FPS) e la sua evoluzione *Sliding Isolation Pendulum* (SIP), che sono ricentranti e possiedono una sufficiente capacità dissipativa. Infine, gli attuali isolatori a rotolamento (che trovano numerose applicazioni in Giappone, in particolare in villette private) sono costituiti da sfere in acciaio (*Ball Bearing* o BB) e richiedono l'uso, in parallelo, di dissipatori, nonché di dispositivi di ricentraggio (qualora non possiedano questa caratteristica).

### I sistemi dissipativi e gli altri moderni sistemi antisismici

I sistemi di dissipazione d'energia e, in alcuni casi, quelli costituiti da dispositivi oleodinamici di vincolo provvisorio (*Shock Transmitter* o ST) o in leghe a memoria di forma (*Shape Memory Alloy Device* o SMAD), utilizzabili anche quando l'isolamento sismico non lo sia (ad esempio per interventi sull'esistente che non permettano di realizzare gli ampi giunti laterali necessari per una struttura isolata), assicurano comunque, anch'essi, un elevato grado di protezione (FIGG. 5 e 6). In particolare, i dissipatori sono dispositivi (elastoplastici, viscosi, viscoelastici, ad attrito, ad estrusione di piombo, elettroinduttivi), applicabili a qualsiasi tipo di struttura e con qualsiasi condizione di terreno di fondazione, installati in posizioni ove essi sono in grado di "attrarre", "concentrare" su se stessi e lì trasformare in calore la maggior parte dell'energia sismica che penetra nella costruzione. Essi sono, in genere, inseriti in aste di controvento, disposte diagonalmente nelle maglie strutturali, o nei collegamenti tra tali aste e la struttura stessa, e dissipano energia grazie al movimento relativo tra i piani adiacenti dell'edificio. Fra i dissipatori elastoplastici rientrano anche i cosiddetti "controventi ad instabilità impedita" (*Buckling-Restraint Brace* o BRB), costituiti da aste d'ac-

ciaio con incamiciatura in calcestruzzo, da tempo molto utilizzati in Giappone e negli USA e che di recente hanno visto le prime applicazioni anche in Italia (FIG. 5). Grazie ai dissipatori si riducono (sebbene, ovviamente, non si annullino) i movimenti della costruzione, evitando il danneggiamento delle parti strutturali e minimizzando quello delle parti non strutturali.



FIG. 5 Il nuovo Polo Didattico dell'Università Politecnica delle Marche, protetto nel 2005 con 86 BRB, durante la costruzione

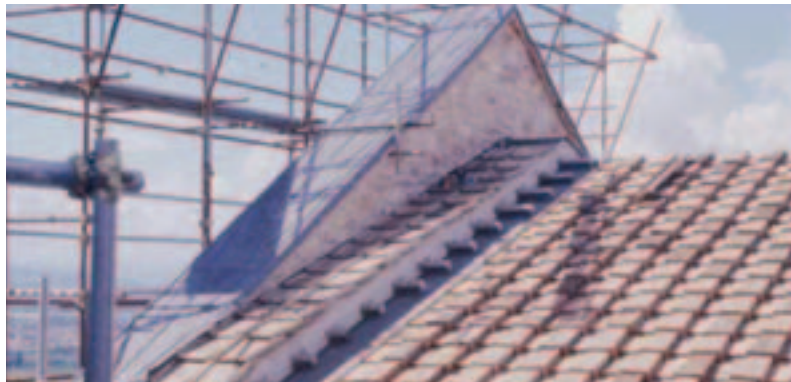


FIG. 6 Alcuni dei 47 SMAD installati nel 1998-99, durante il restauro della Basilica Superiore di San Francesco in Assisi, per connettere i timpani con il tetto del transetto; due dei 34 ST installati all'interno della Basilica

### **Comportamento di costruzioni protette da moderni sistemi antisismici durante violenti terremoti**

L'affidabilità dei moderni sistemi antisismici descritti nei paragrafi precedenti è ormai riconosciuta a livello mondiale, anche grazie all'ottimo comportamento che costruzioni da essi protette hanno dimostrato in occasione di tutti i recenti terremoti violenti o, comunque, significativi (Dolce et al., 2005 & 2006, e Martelli e Forni, in stampa): a San Francisco e a Los Angeles, in California, durante quelli di Loma Prieta del 1989 e, rispettivamente, di Northridge del 1994; a Shantou, nella Repubblica Popolare Cinese, e nelle isole Kurili, nella Federazione Russa, nello stesso 1994; a Kobe, in Giappone, durante il terremoto di Great Hanshin – Awaji (denominato anche di Hyogo-ken Nanbu) del 1995; a Santiago, in Cile, in occasione di varie scosse sismiche, in particolare nel 1996; a Bolu, in Turchia, durante i due eventi di Kocaeli e Duzce del 1999; a Sendai-City, Kushiro-City e Ojiya-City, nuovamente in Giappone, durante i sismi di Miyagi-Oki e, rispettivamente, di Off Tokachi del 2003 e quello di Niigata-ken – Chetsu del 2004; infine, ancora a Sendai-City durante il terremoto di magnitudo 7,2 del 16 agosto 2005.

### **Applicazioni delle moderne tecnologie antisismiche, in Italia e all'estero**

Grazie alle riconosciute caratteristiche d'efficacia ed affidabilità dell'isolamento e di altri sistemi antisismici, nel mondo si contano ormai circa 5000 strutture (ponti, viadotti, edifici ed impianti, di cui alcuni a rischio d'incidente rilevante, chimici e nucleari) protette con tali sistemi ed il loro numero è in continua crescita (Martelli, 2006b, e Martelli e Forni, in stampa). È da sottolineare che l'uso di tali tecniche è ovunque influenzato, in modo determinante, dalle caratteristiche della normativa applicata. Il Giappone, dove i soli edifici isolati sono oltre 3000, è il paese leader, grazie alla disponibilità di un'adeguata normativa dal 2000 ed alla liberalizzazione dell'uso dell'isolamento sismico dal 2001. In questo paese, la tendenza è d'isolare, da una parte, anche grattacieli e gruppi di edifici sorretti da un'unica grande struttura isolata (*artificial ground*) e, dall'altra, pure villette private di piccole dimensioni.

Seguono la Federazione Russa e la Repubblica Popolare Cinese, dove questi edifici erano, rispettivamente, 550 e 490 in giugno 2005 (Dolce et al., 2006): mentre nella prima, a causa della perdurante difficile situazione economica, le nuove applicazioni procedono a rilento da diverso tempo e solo da pochi anni sono adottati adeguati sistemi d'isolamento sismico (analoghi a quelli utilizzati negli altri paesi), nella seconda vi è stato, negli ultimi anni, un aumento significativo del numero delle applicazioni, in particolare agli edifici residenziali (anche in muratura, che erano già 270 in giugno 2005), e continuano grandi realizzazioni, come quella riguardante i 50 edifici isolati del nuovo centro residenziale di Pechino.

Negli Stati Uniti (in quarta posizione) le applicazioni ai ponti ed ai viadotti e, per la dissipazione d'energia, anche agli edifici prosegue in modo soddisfacente; però, a causa della normativa molto penalizzante in vigore per gli edifici isolati, il numero di nuove realizzazioni di questo tipo resta limitato: in base a recenti informazioni (Martelli e Forni, in stampa), gli edifici isolati statunitensi sono ora "solo" circa 200, sebbene si tratti, in gran parte, di costruzioni molto importanti e per la metà di retrofit. L'Italia è quinta (Martelli, 2006b, e Martelli et al., in stampa), ma, nel nostro paese, grazie alla nuova normativa sismica, l'utilizzo delle moderne tecnologie antisismiche si sta diffondendo sempre di più, sia per gli edifici strategici, quali ospedali e centri di gestione dell'emergenza, sia per le scuole e gli altri edifici pubblici, sia per l'edilizia residenziale (anche con soluzioni di *artificial ground*, come descritto da Martelli, 2006a, e Martelli et al., 2006), sia per il patrimonio culturale (FIGG. 1÷6): infatti, in settembre 2006 non solo risultavano già completati almeno 43 edifici italiani isolati sismicamente (contro i 25 di giugno 2005), 19 dotati di sistemi di dissipazione d'energia o dispositivi in leghe a memoria di forma e 28 protetti con ST, ma anche, limitandosi ai soli edifici isolati, ne erano noti già in costruzione od in fase avanzata di progetto altri 44 (FIG. 7).

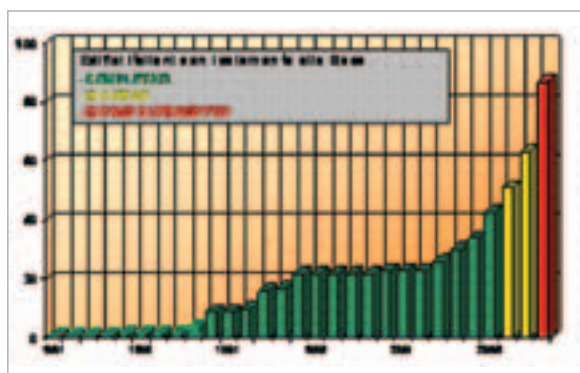
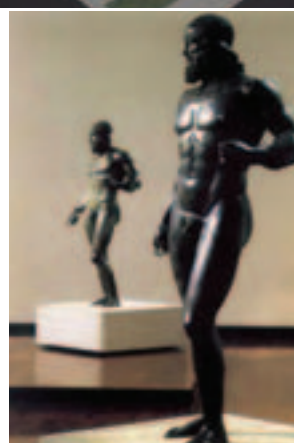


FIG. 7 Andamento cumulativo del numero delle applicazioni dell'isolamento sismico agli edifici italiani, nel corso degli anni

FIG. 8 L'Iran Bastan Museum di Tehran, da adeguare con l'isolamento sismico

Fig. 9 I Bronzi di Riace, isolati sismicamente

Per quanto riguarda altri paesi, da notare è l'attuale significativa applicazione dell'isolamento sismico e degli altri sistemi antisismici a Taiwan (a seguito del terremoto di Chi Chi del 1999 e delle conseguenti modifiche della normativa sismica), nonché il numero crescente di edifici isolati in Armenia (nonostante si tratti di un paese in via di sviluppo) e Nuova Zelanda. Importanti applicazioni sono iniziate da qualche anno anche in Turchia (dopo i due terremoti di Kocaeli e Duzce del 1999), in Grecia, in Portogallo, in Indonesia ed a Cipro (molte con dispositivi prodotti in Italia), proseguono in



Corea del Sud ed in Cile e stanno per iniziare in Iran (FIG. 8). Non deve poi essere dimenticata la Francia, paese nel quale, alle prime applicazioni sia agli impianti nucleari che agli edifici civili degli anni Settanta ed Ottanta, se ne sono aggiunte altre, più recentemente, in particolare alle scuole nell'isola della Martinica.

Inoltre, è da sottolineare l'uso crescente dell'isolamento sismico nel settore industriale, in particolare per impianti a rischio d'incidente rilevante come i serbatoi di gas naturale liquefatto (prima in Grecia e Corea del Sud ed ora in Turchia e Cina) e per le strutture nucleari. Alla prima applicazione dell'isolamento sismico a strutture nucleari giapponesi (*Nuclear Fuel Related Facility*), si aggiungeranno a breve nuovi impianti nucleari isolati, in Giappone (dove sono già disponibili regole di progetto che permettono di licenziarli) ed in altri paesi, in particolare in Francia, dove l'isolamento sismico è già stato deciso sia per il *Jules Horowitz Reactor* che per l'impianto per la fusione nucleare controllata ITER, che sorgeranno ambedue nel Centro di Ricerche Nucleari di Cadarache.

Di estremo interesse sono anche le prime applicazioni delle moderne tecnologie antisismiche sia al patrimonio storico, artistico e monumentale che a singoli capolavori. Basti ricordare, quanto al primo, l'utilizzazione di SMAD e ST nel restauro della Basilica Superiore di San Francesco in Assisi, gravemente danneggiata dal terremoto umbromarchigiano del 1997 (FIG. 6), che è stata seguita da alcune altre importanti applicazioni. Quanto ai secondi, sono già dotati di moderni sistemi antisismici nuovi musei negli Stati Uniti, in Giappone, in Nuova Zelanda, in Italia ed in Grecia e coperture di scavi archeologici, come quelli di Akrotiri nell'isola greca di Santorini. Nei paesi suddetti anche alcuni musei esistenti sono già stati adeguati con l'isolamento sismico ed altri lo dovrebbero essere a breve, pure in ulteriori paesi: un esempio è *l'Iran Bastan Museum di Tebran*, per il quale è già in fase avanzata di sviluppo un progetto sviluppato con la collaborazione di soci del GLIS (FIG. 7). Infine, sistemi d'isolamento già proteggono beni museali in Giappone, negli Stati Uniti e, soprattutto, in Italia: basti citare i Bronzi di Riace al Museo di Reggio Calabria (FIG. 9), la statua bronzea dell'Imperatore Germanico al Museo Nazionale di Perugia, il Satiro Danzante di Mazara del Vallo, le due statue di Scilla e Nettuno al Museo di Messina e che a questi potrebbe seguire il David di Michelangelo (fortemente vulnerabile a vibrazioni sismiche anche di piccola entità, a causa delle lesioni che presenta), qualora le ricerche già avviate permettano di sviluppare un sistema e modalità d'intervento adatti.

## Conclusioni

L'ingegneria sismica ha fatto passi da gigante negli ultimi decenni, mediante lo sviluppo sia di tecniche innovative di rinforzo degli elementi strutturali e non strutturali, sia di sistemi atti a ridurre le azioni sismi-

che agenti su tali elementi. Fra questi ultimi, quelli d'isolamento sismico sono i più efficaci, ma anche altri (di dissipazione d'energia, ecc.) sono in grado d'accrescere fortemente la protezione sismica. L'efficacia dei suddetti sistemi è stata dimostrata dall'eccellente comportamento di edifici e viadotti di essi dotati durante violenti terremoti, avvenuti in diversi paesi. In ciascun paese, le applicazioni evidenziano il ruolo chiave giocato, sulla loro numerosità, dalle caratteristiche della normativa utilizzata; in particolare, per quanto riguarda l'Italia, è da sottolineare la forte crescita del numero di tali applicazioni grazie alla nuova normativa entrata in vigore con l'OPCM n. 3274/2003 e le sue successive modifiche ed integrazioni. Restano da migliorare, anche attraverso una più stretta collaborazione fra ingegneri strutturali e sismologi, le metodologie utilizzate per valutare la pericolosità sismica, affiancando a quelle probabilistiche attualmente in uso le metodologie deterministiche (che hanno già fornito ottime prove di affidabilità) ed affinando la valutazione degli effetti di sito, in modo da ridurre ulteriormente le incertezze che tuttora gravano sulla valutazione della pericolosità sismica (Dolce et al., 2005 & 2006).

### Ringraziamenti

Quest'articolo riporta numerosi brani tratti dai due libri di Dolce et al. (2005 & 2006), di cui chi scrive è coautore assieme al prof. Mauro Dolce dell'Università della Basilicata e al prof. Giuliano Panza dell'Abdus Salam International Centre of Theoretical Physics (ICTP) e del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Trieste. Si ringraziano, pertanto, i due suddetti coautori.

### Bibliografia

- V. Candiracci ed O. Bassotti (2006), «Un'azienda che ha recentemente aderito al GLIS e ad ASSISi – Il sistema costruttivo della società EMME-DUE», in 21<sup>mo</sup> Secolo Scienza e Tecnologia, n. 1-2006, pp. 42-46.
- M. Dolce, A. Martelli e G. Panza (2005), *Proteggersi dal Terremoto – Le Moderne Tecnologie e Metodologie e la Nuova Normativa Sismica*, 21<sup>mo</sup> Secolo, 2<sup>a</sup> edizione, Milano, ISBN 88-87731-28-4.
- M. Dolce, A. Martelli e G. Panza (2006). *Moderni Metodi di Protezione dagli Effetti dei Terremoti*. Milano: 21<sup>mo</sup> Secolo, Edizione speciale per il Dipartimento della Protezione Civile a cura di A. Martelli, Milano, ISBN 88-87731-30-6.
- A. Martelli (2006a), «Una nuova grande applicazione dell'isolamento sismico all'edilizia residenziale – Prevista a Marigliano, in provincia di Napoli, nell'ambito dei progetti di riqualificazione dei centri urbani degradati», in 21<sup>mo</sup> Secolo Scienza e Tecnologia, n. 1-2006, pp. 34-42.
- A. Martelli (2006b). «Seminario ed Esposizione del 6 ottobre – Applicazioni delle moderne tecnologie antisismiche progettate con la nuova norma-

tiva», in 21<sup>mo</sup> Secolo Scienza e Tecnologia, n. 4-2006, pp. 31-40.

A. Martelli, P. Clemente, A. Dusi, C. Nunziata, G. Panza, A. Sodano e M.C. Turri (2006), «*Importante applicazione dell'isolamento sismico – La ricostruzione del “comparto 219” di Marigliano, Napoli*», in 21<sup>mo</sup> Secolo Scienza e Tecnologia, n. 2-2006, pp. 40-46.

A. Martelli, M. Dolce e M. Forni (in stampa), «*Italy*», Paragrafo di *Summary of State-of-the-Art on Seismic Isolation and Response Control for Structures*, T. Saito, H. Li, W.-Q. Liu e M. Higashino, ed., SPON Press, Londra, Regno Unito.

A. Martelli e M. Forni (in stampa), «*Panorama delle realizzazioni dell'isolamento sismico e delle altre moderne tecnologie antisismiche a livello internazionale*», Capitolo di *Tecnologie Innovative di Protezione Sismica delle Strutture*, G. Russo e S. Sorace, ed., CISM, Udine.

Redazione (2006). «*Le problematiche del fissaggio in zona sismica*», in 21<sup>mo</sup> Secolo Scienza e Tecnologia, n. 4-2006, p. 41.