

LA PROTEZIONE DEGLI EDIFICI DAL TERREMOTO MEDIANTE MODERNE TECNOLOGIE

Alessandro MARTELLI *

** Presidente dell'associazione GLIS (GLIS – Isolamento ed altre Strategie di Progettazione Antisismica) e dell'International Seismic Safety Organization (ISSO); presidente fondatore ed attuale vicepresidente e coordinatore della Sezione Territoriale dell'Unione Europea e degli altri paesi dell'Europa Occidentale dell'Anti-Seismic Systems International Society (ASSISi); coordinatore del Task Group 5 on Seismic Isolation of Structures dell'European Association for Earthquake Engineering (EAE-EG5); membro della Commissione IPPC (Integrated Pollution Prevention and Control) per la concessione dell'AIA (Autorizzazione Integrata Ambientale) del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare; Collaudatore in corso d'opera di edifici protetti da sistemi antisismici; membro del Collegio dei Docenti del Dottorato di Ricerca in "Ingegneria Civile, Ambiente e Territorio, Edile e in Chimica" del Politecnico di Bari; già Direttore del Centro Ricerche di Bologna dell'Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA) (in pensione da fine novembre 2012); fino al 2011 docente di "Costruzioni in Zona Sismica" presso la Facoltà di Architettura dell'Università di Ferrara*

In questa relazione, tratta da quattro libri dell'autore [1-4], sono illustrate brevemente le caratteristiche fondamentali delle moderne tecnologie antisismiche (principalmente dell'isolamento sismico e della dissipazione d'energia), sono sottolineati i benefici derivanti dalla loro utilizzazione (soprattutto a seguito dell'entrata in vigore della nuova normativa sismica italiana, dapprima con l'Ordinanza 3274/2003 del Presidente del Consiglio dei Ministri e le sue successive modifiche ed integrazioni ed ora con le nuove norme tecniche) ed è fornito un quadro sintetico delle attuali applicazioni in Italia e nel mondo, sottolineando i benefici delle suddette tecnologie non solo per le opere strategiche e pubbliche, per gli impianti ed i componenti industriali e per il patrimonio culturale, ma anche per gli edifici residenziali. Maggiori dettagli su tali tecnologie, oltre ad informazioni sulle moderne metodologie atte a determinare la pericolosità sismica, possono essere reperite nella rivista di informazione scientifica ed economica 21^{mo} Secolo – Scienza e Tecnologia (nella quale l'associazione GLIS, presieduta dall'autore di questa relazione, tiene una rubrica), nei quattro libri summenzionati ed in numerose altre pubblicazioni in essi citate.

RISCHIO SISMICO

Ricordiamo che per rischio di una struttura derivante da un evento calamitoso si intende la combinazione di tre parametri: la pericolosità (che definisce l'entità dell'evento), la vulnerabilità (che definisce la capacità della struttura di resistere all'evento) e l'esposizione (che definisce il valore della struttura, inclusi i suoi contenuti, siano questi esseri umani od oggetti, tenendo conto anche della loro numerosità e degli effetti socio-economici).

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 20.000. 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 dell'isola 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: quindi, il sisma è 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, o anche più, nelle zone ad elevata pericolosità sismica avviene un forte terremoto, che, in assenza di un'adeguata progettazione antisismica, determina 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.

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. Per quanto riguarda l'Europa Comunitaria, il fatto che in Grecia la frequenza dei terremoti con magnitudo M superiore a 6,0 (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 sui dati del secolo scorso 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. Ancora più impressionante è il confronto, riportato in Tabella 1, tra il numero di vittime (morti e feriti) attese per un evento sismico in Italia, nel mondo ed in Giappone.

Evento di magnitudo M = 7,0		
	Morti	Feriti
Appennino meridionale	5.000÷11.000	più di 15.000
Media mondiale	6.500	20.500
Giappone	50	250
Evento di magnitudo M = 7,5		
	Morti	Feriti
Calabria	15.000-32.000	più di 37.000
Media mondiale	18.500	75.000
Giappone	400	2.000

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

I risultati conseguiti in Giappone 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 e di 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. Per esempio, la particolarità degli insediamenti urbani in Europa, 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 umani con costruzioni di grande valore storico e artistico.

PREVENZIONE SISMICA E 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. 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 secoli fa o anche solo all'inizio del secolo scorso, 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. È, infine, per questo che molte ristrutturazioni di edifici esistenti, anche di vecchia costruzione, sono state e effettuate (e, purtroppo, lo sono tuttora) senza curarsi delle conseguenze di tali ristrutturazioni sulla sicurezza sismica degli edifici succitati e, in molti casi, neppure sulla loro sicurezza dal punto di vista meramente statico.

Le indagini sulla sicurezza degli edifici, in particolare di quelli strategici (effettuate come prescritto dall'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri – OPCM – N. 3274, con la quale entrarono in vigore nel 2003 sia la nuova normativa sismica italiana che i criteri generali di riclassificazione sismica del territorio nazionale, dalle sue successive modifiche ed integrazioni oggetto delle Ordinanze 3316/2003 e 3431/2005 (si ricorda che l'OPCM 3274/2003 fu predisposta a seguito del tragico crollo della scuola elementare Francesco Jovine di San Giuliano di Puglia, durante il terremoto del Molise e della Puglia del 31 ottobre 2002 (vedi oltre) e dalla recente normativa tecnica che ha recepito i contenuti principali di tali ordinanze), 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, durante il quale crollò la scuola Francesco Jovine di San Giuliano di Puglia, uccidendo 27 bambini – inclusi tutti i più piccoli – ed una maestra (la scuola è stata recentemente ricostruita, protetta dall'isolamento sismico – si veda la Figura 1).



Figura 1 – (a) Crollo della scuola elementare Francesco Jovine di San Giuliano di Puglia durante il terremoto del Molise e della Puglia del 31 ottobre 2002. (b) La nuova scuola Francesco Jovine, eretta su un'unica platea isolata sismicamente assieme al Centro Culturale, Professionale ed Universitario "Le Tre Torri", ambedue collaudati dall'autore di questa relazione e dal socio del GLIS ing. Claudio Pasquale il 2 settembre 2008 ed inaugurati dal Presidente del Consiglio il 18 settembre. (c) Vista di alcuni degli isolatori sismici che proteggono il complesso suddetto.

LA NUOVA NORMATIVA SISMICA ITALIANA E LA NUOVA CLASSIFICAZIONE SISMICA DEL TERRITORIO NAZIONALE

I provvedimenti presi con la summenzionata OPCM N. 3274, pubblicata l'8 maggio 2003, e con le sue successive modifiche ed integrazioni, cercando di porre rimedio ad una perdurante situazione d'inadeguatezza degli strumenti normativi, hanno evidenziato le carenze inammissibili nella prevenzione sismica che caratterizzavano la situazione precedente. Con la nuova classificazione, in pratica, tutto il territorio italiano è considerato, giustamente, a rischio, laddove solo circa il 45% lo era precedentemente e solo il 25% lo era prima del 1980. Con la nuova normativa l'Italia si è allineata al resto dell'Europa ed anzi (grazie alla liberalizzazione da essa operata dell'uso delle moderne tecnologie antisismiche d'isolamento sismico e dissipazione d'energia) si pone all'avanguardia, dopo anni ed 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, in Italia, milioni di abitazioni in muratura ed in cemento armato.

COSTRUZIONI ANTISISMICHE TRADIZIONALI

Per semplicità, nel seguito ci riferiremo principalmente agli edifici, ma quanto diremo vale pure per i ponti ed i viadotti, nonché per gli impianti industriali ed i singoli componenti o, anche, per le singole opere d'arte. Occorre ora capire che cosa si intenda per "costruzione antisismica", secondo i canoni della moderna ingegneria. È pressoché impossibile costruire edifici con struttura tradizionale (cioè non dotati dei summenzionati moderni sistemi antisismici oggetto di questa relazione) che possano resistere senza danni a qualunque terremoto cui nel futuro potranno verosimilmente essere soggetti. Ecco perché una costruzione progettata secondo tecniche tradizionali, ma con moderni criteri antisismici, deve soddisfare due requisiti fondamentali:

- non deve crollare sotto l'azione di terremoti violenti (tenendo conto delle caratteristiche di sismicità e delle tipologie del terreno della zona in cui tale costruzione sorge);
- non deve subire danni significativi per effetto di terremoti di bassa-media intensità.

Il primo requisito ha implicazioni molto importanti, ovvero presuppone l'accettazione di danni anche gravi nella costruzione, a condizione, però, che la stessa non crolli. Si minimizzano, così, i danni alle persone che vi abitano (ferimenti e vittime). Che cosa, poi, s'intende per terremoto violento? Per gli usuali edifici d'abitazione si fa riferimento, tipicamente, ad una probabilità del 10% che un tale evento si verifichi nell'arco di vita dell'edificio stesso, assunto pari a circa 50 anni. È su questa scommessa che si basa il criterio fondamentale dell'ingegneria sismica moderna.

Il secondo requisito è di fondamentale importanza in termini economici, perché serve a minimizzare i costi di riparazione per terremoti che, molto probabilmente, colpiranno la costruzione durante la sua vita. È necessario, quindi, che tali terremoti non causino danni significativi, ovvero non producano conseguenze economiche rilevanti.

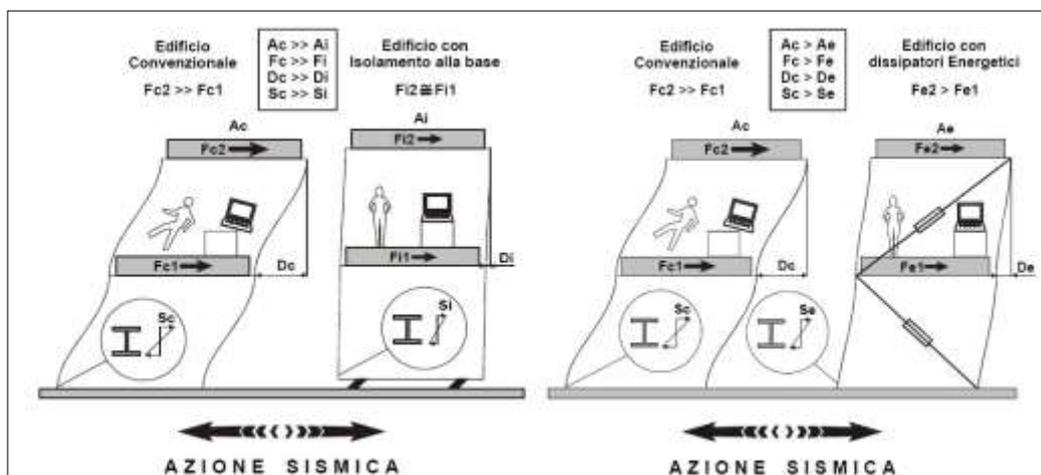
Quali scenari si realizzerebbero per effetto di un terremoto, se tutte le costruzioni rispettassero i moderni criteri antisismici appena descritti? Nel caso di un terremoto di piccola o media intensità, dunque piuttosto frequente, non si avrebbero sicuramente vittime né ripercussioni importanti di tipo economico, dirette o indirette. Al di là dell'inevitabile paura che qualsiasi terremoto induce nella gente e dei provvedimenti prudenziali d'evacuazione di breve periodo (qualche ora o qualche giorno), la vita potrà proseguire normalmente, senza alcuna conseguenza, né economica, né sociale.

Se, invece, si verificasse un terremoto violento (ad esempio, in Italia, simile a quelli del Friuli del 1976 e 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. Si renderebbero necessari provvedimenti d'evacuazione di lungo periodo (mesi o 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 anche gli edifici strategici (ospedali, ecc.) e quelli in cui si svolgono le attività produttive (fabbriche, uffici, esercizi commerciali) e sociali (scuole, chiese, municipi, ecc.), nonché altre strutture ed infrastrutture (ponti, viadotti, impianti, strade, linee elettriche e telefoniche, condutture dell'acqua e del gas, fognature), 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, di delicate apparecchiature e di altri oggetti di valore (o comunque importanti) contenuti nelle costruzioni strategiche, a causa delle vibrazioni sismiche che comunque penetrerebbero al loro interno, produrrebbero gravi conseguenze, quali lunghe interruzioni del normale funzionamento (si pensi agli ospedali), o rilevanti perdite economiche (si pensi ai centri computerizzati delle banche o di altre aziende), o 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 causati da tali eventi.

LE MODERNE TECNOLOGIE ANTISISMICHE

Dunque, sebbene le costruzioni tradizionali progettate con moderni criteri antisismici possano condurre a significativi progressi nella lotta ai terremoti, limitando le conseguenze più gravi fino a terremoti veramente violenti, non si può dire che, con esse, si riesca a conseguire una vittoria totale e definitiva sul sisma. Si comprende, quindi, perché l'attenzione di molti ricercatori e dell'industria si sia concentrata, negli ultimi 20÷30 anni, sulla messa a punto di tecnologie innovative per la riduzione degli effetti dei terremoti. Da un lato, l'obiettivo è stato di superare le limitazioni delle costruzioni tradizionali, riassumibili nel secondo dei requisiti 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 dell'edificio); dall'altro, si sono voluti rendere più semplici ed efficaci, nonché più economici, gli interventi di miglioramento ed adeguamento sismico delle strutture esistenti.

Soffermando l'attenzione sulle moderne tecnologie antisismiche sviluppate negli ultimi anni e già oggetto di numerose applicazioni a tutte le tipologie di costruzioni in vari paesi (inclusa l'Italia), notiamo che le strategie progettuali e costruttive generali che sono perseguite sono principalmente riconducibili alle seguenti due: l'isolamento sismico (Figura 2a) e la dissipazione d'energia (Figura 2c).



(a)

(c)



(b)

Figura 2 – (a) Effetti delle componenti orizzontali del sisma in presenza (pedice "i") ed in assenza (pedice "c") d'isolamento sismico (A = accelerazione assoluta, F = forze d'inerzia, D = spostamento d'interpiano, S = stato tensionale alla base).

(b) Immagine dell'interno di un isolatore in gomma, che mostra i lamierini d'acciaio inseriti nella gomma per garantire un'elevata rigidità verticale.

(c) Paragone fra il comportamento sismico di un edificio convenzionale (pedice "c") e quello di uno dotato di dissipatori (pedice "e") (A = accelerazione assoluta; F = forze d'inerzia; D = spostamenti d'interpiano; S = stato tensionale alla base).

Contrariamente a quanto avviene utilizzando l'approccio convenzionale, la progettazione con ambedue le tecniche succitate mira alla drastica riduzione delle forze sismiche agenti sulla struttura, piuttosto che affidarsi alla sua resistenza.

Isolamento sismico

L'isolamento sismico (Figura 2a), come dice la parola, si pone l'obiettivo di isolare la costruzione dal sisma. Ora, poiché l'energia sismica è trasmessa alla struttura attraverso le fondazioni, il principio generale è di disconnettere la costruzione dal terreno. Più precisamente, con l'isolamento sismico si disaccoppia il movimento della costruzione, usualmente solo nel piano orizzontale, da quello del terreno, "filtrando" così almeno le componenti orizzontali del terremoto (che sono quelle più pericolose). Ciò è effettuato mediante l'inserimento – usualmente alla base (Figure 3b) od in corrispondenza del piano più basso (Figura 3c) – di dispositivi, detti isolatori, orizzontalmente estremamente flessibili (per lo più in gomma armata internamente con lamine d'acciaio, vedi Figura 2b) e/o a scorrimento (Figura 3a) od anche a rotolamento (Gli isolatori a rotolamento sono già largamente adottati in alcuni paesi, come il Giappone, in particolare per le strutture leggere (villette, computer, componenti impiantistici, oggetti d'arte) e, nel caso degli isolatori "a ricircolo di sfere", anche per grandi edifici soggetti a sforzi di trazione. Ad essi sono affiancati dissipatori e dispositivi ricentranti. In Italia, i suddetti isolatori, anche in considerazione dell'elevata durabilità dei materiali che li costituiscono (acciai), presentano le prospettive d'applicazione più interessanti per le strutture leggere di pregio, come sono, ad esempio, molti beni museali.); pertanto, sopra gli isolatori, la struttura (se non è eccessivamente flessibile) si muove rigidamente nel piano orizzontale, con valori molto piccoli sia dell'accelerazione che degli spostamenti d'interpiano e, quindi, senza danneggiamento non solo delle parti strutturali, ma neppure di quelle non strutturali, contenuti compresi (Figura 2a). Nei casi suddetti, si realizza, cioè, per la cosiddetta sovrastruttura (che è la parte della struttura sorretta dagli isolatori) una drastica riduzione sia dell'accelerazione e delle sue variazioni verticali che delle deformazioni orizzontali e verticali, cosa impossibile per una costruzione fondata in maniera convenzionale. Infatti, il periodo proprio della costruzione aumenta considerevolmente e, pertanto, le accelerazioni della struttura decrescono fortemente; è vero che, in parallelo, crescono fortemente i suoi spostamenti trasversali, ma, nei casi in cui l'isolamento è applicato, queste deformazioni sono praticamente tutte concentrate negli isolatori.

Si noti che, sebbene la funzione principale del sistema d'isolamento sia quella di filtro dell'energia sismica, esso deve però possedere anche una sufficiente capacità dissipativa, in modo da limitare lo spostamento di progetto a valori accettabili (usualmente dai 10 ai 40 cm in Italia, fino ai 50÷80 cm tipici di aree con elevatissima pericolosità sismica come il Giappone o la California). Quando si utilizzino isolatori in gomma (Figura 2b), ciò si ottiene o additivando la gomma con particolari oli e resine (isolatori ad alto smorzamento o *High Damping Rubber Bearing* – HDRB), od inserendo all'interno degli isolatori nuclei di piombo o fluidi silicologici (per ottenere uno smorzamento ancora maggiore del 15% raggiungibile con gli HDRB), od installando alcuni dissipatori accanto ad isolatori in gomma, usualmente a basso smorzamento (*Low Damping Rubber Bearing* o LDRB).



(a)



(b)



(c)

Figura 3 – (a) Uno dei 12 isolatori SD installati nella nuova scuola Francesco Jovine di San Giuliano di Puglia (Figura 1) nel 2006. (b) Alcuni dei 61 HDRB installati alla base della scuola suddetta nel 2006. (c) Alcuni dei 16 HDRB installati (assieme a 4 SD) alla sommità del primo piano dell'edificio isolato sismicamente del Corpo delle Guardie Forestali del Centro della Protezione Civile di Foligno (Perugia), durante la sua costruzione nel 2005.

Ovviamente, oltre ad essere caratterizzato dalle funzioni principale e secondaria summenzionate, un sistema d'isolamento adeguato del tipo suaccennato deve possedere:

- una buona capacità ricentrante (cioè di riportare la struttura alla posizione iniziale una volta terminato il terremoto);
- una vita utile sufficientemente lunga (almeno pari a quella delle usuali costruzioni, sebbene debba essere anche garantita la sostituibilità degli isolatori);
- rigidità crescente al diminuire del livello dell'eccitazione sismica (elevata per quelle di modesta entità, così da impedire continue vibrazioni, ad esempio, sotto l'azione del vento);
- rigidità e smorzamento poco sensibili ad effetti quali le variazioni di temperatura, l'invecchiamento, ecc.

Gli attuali isolatori in gomma ormai possiedono tutte queste caratteristiche. Sono, comunque, tuttora utilizzati anche altri dispositivi d'isolamento sismico: ad esempio, gli isolatori a scorrimento (*Sliding Device* o SD, ora usualmente costituiti da superfici di acciaio sovrapposte a superfici di teflon, Figura 3a), che, in alcune realizzazioni, soprattutto in Giappone e da qualche anno anche in Italia (Figura 3b), sono accoppiati ad isolatori in gomma (i quali forniscono la capacità ricentrante) per sorreggere parti di edifici che non devono sostenere carichi verticali rilevanti e per contribuire a minimizzare gli effetti torsionali (in tal modo si possono isolare in modo economico, ad esempio, anche edifici leggeri o con forti asimmetrie in pianta). Quello dello scorrimento è il concetto su cui erano basate le prime applicazioni dell'isolamento sismico, proposte

od anche realizzate, già nell'antichità (ad esempio in Grecia, in Cina, in Anatolia, dagli Incas e, probabilmente, pure in Italia, per proteggere templi come quelli di Paestum).

È da sottolineare che l'isolamento sismico è usualmente applicato solo nel piano orizzontale, perché la componente verticale dei terremoti è normalmente meno violenta di quelle orizzontali, almeno al di fuori della zona epicentrale, e perché le strutture, dovendo già sostenere il loro peso, resistono assai meglio alle vibrazioni verticali che non a quelle orizzontali; inoltre, con l'isolamento tridirezionale (3D) è spesso arduo controllare i moti di beccheggio (sebbene particolari sistemi antibeccheggio siano stati recentemente sviluppati per gli impianti nucleari giapponesi). Infine, quando è necessario proteggere apparecchiature o altri oggetti particolarmente delicati (ad esempio, computer, opere d'arte, o componenti degli impianti nucleari rilevanti ai fini della sicurezza) anche dalle vibrazioni verticali, è usualmente più agevole isolare orizzontalmente la base dell'edificio che li contiene e verticalmente solo i piani d'interesse, o gli oggetti stessi, o, nel caso degli impianti nucleari, ad esempio, il solo blocco reattore (Sistemi d'isolamento 3D sono però già stati sviluppati ed applicati alla base di edifici civili, sia in Giappone che nella Repubblica Popolare Cinese, per proteggere edifici non solo dalle vibrazioni sismiche, ma anche da altre forti vibrazioni ambientali, indotte dal traffico stradale o da metropolitane (vedi oltre)).

L'isolamento è una tecnica di agevole applicazione (sia in fase progettuale, dato che la sovrastruttura resta in campo elastico, sia durante la realizzazione) nel caso di nuove costruzioni, ma può essere utilizzato (e lo è già stato sovente, dapprima in Nuova Zelanda e negli USA ed ora anche in Italia, oltre che in Giappone, in Armenia, nella Repubblica Popolare Cinese e, più recentemente, nella Federazione Russia ed in Turchia) anche per l'adeguamento (od il miglioramento) sismico di strutture esistenti (*retrofit*): in questo caso esso è attuato, per gli edifici, mediante il taglio delle fondazioni o delle strutture portanti (pilastri e pareti) del piano più basso (Figura 13c), ovvero mediante la sottofondazione (Figura 14a).

L'applicazione della tecnica suddetta è particolarmente vantaggiosa per edifici che presentano notevoli asimmetrie in pianta e/o in alzata. Tali asimmetrie, infatti, risultano assai problematiche per gli edifici non isolati, in aree significativamente sismiche; in particolare, quelle in pianta generano pericolosi effetti torsionali. Ecco che allora, per evitare forti asimmetrie geometriche in pianta o in alzata, occorre spesso separare gli edifici fondati convenzionalmente in più corpi di fabbrica sufficientemente simmetrici: ciò, invece, non è usualmente necessario per costruzioni isolate, perché il movimento quasi rigido della sovrastruttura minimizza gli effetti negativi delle asimmetrie in alzata ed un'opportuna disposizione degli isolatori in gomma – unita, eventualmente, a diversi valori delle loro rigidezze (ottenuti variandone il diametro e/o utilizzando diversi valori del modulo di elasticità tangenziale della gomma) ed all'uso pure di SD – in genere consente di portare il centro di rigidezza del sistema d'isolamento a coincidere, o quasi, con la proiezione del baricentro della costruzione sul piano dell'isolamento (condizione per evitare le deformazioni torsionali).

La nuova normativa sismica italiana, oltre ad aver liberalizzato l'uso delle moderne tecnologie antisismiche, lo ha reso più conveniente, permettendo, in particolare, nel caso di strutture isolate, di tener conto della riduzione delle forze sismiche agenti sulla sovrastruttura e sulle fondazioni, operata dal sistema d'isolamento, e di assumere, per la sovrastruttura, accelerazione costante (invece che crescente) dalla base alla sommità, coerentemente con il movimento di corpo rigido che essa presenta. I progetti predisposti basandosi sulla nuova normativa suddetta mostrano che queste semplificazioni annullano spesso i costi aggiuntivi dovuti al sistema d'isolamento, anche per le nuove costruzioni, in quanto questi costi sono compensati dai risparmi dovuti all'alleggerimento della sovrastruttura e delle fondazioni. Comunque, anche nel caso in cui i suddetti costi aggiuntivi di costruzione non risultino totalmente compensati, resta sempre a favore dell'isolamento sismico, oltre alla sicurezza nettamente maggiore, il bilancio economico complessivo, che tiene correttamente conto anche dei costi da affrontare dopo un terremoto (riparazione, demolizione, delocalizzazione degli abitanti, smaltimento delle macerie, ricostruzione, ecc.).



Figura 4 – (a) Realizzazione del *gap* durante i lavori effettuati nel 2002 per l'adeguamento sismico con l'isolamento in sottofondazione della palazzina di Fabriano (AN) di Figura 14a, danneggiata dal terremoto umbro-marchigiano del 199798. (b) Vista dal basso (dall'interno del nuovo piano interrato) del *gap* realizzato durante l'adeguamento sismico con isolamento in sottofondazione della palazzina di Figura 14a (a lavori completati nel 2006). (c) Tubazioni d'interfaccia della nuova sede dell'Associazione "Alleanza Popolare – Croce d'Oro" di Grassina (Bagno a Ripoli, Firenze), isolata sismicamente e collaudata dall'autore di questa relazione nel 2007. (d) Palazzina residenziale isolata sismicamente con HDRB a Shantou nel 1994 (prima applicazione cinese di moderni sistemi d'isolamento): si noti la scala d'accesso, vincolata alla sovrastruttura, ed il *gap* verticale che essa presenta rispetto al terreno circostante.



Figura 5 – Viste dei 4 edifici residenziali isolati sismicamente del nuovo Quartiere residenziale San Samuele di Cerignola (FG), in zona sismica 2, e (a destra) del lamierino di protezione del *gap* (collaudo in corso d'opera dell'autore di questa relazione, con rilascio del certificato di collaudo previsto nel 2008).

Da ultimo, è molto importante sottolineare che, nell'applicazione dell'isolamento sismico (e soprattutto nella fase costruttiva), merita particolare attenzione la corretta realizzazione:

- dei “giunti strutturali” (*gap*) fra la sovrastruttura isolata e la sottostruttura od il terreno circostante (ovvero fra due sovrastrutture adiacenti isolate indipendentemente l'una dall'altra), cioè di quegli “spazi” che sono necessari a garantire il libero movimento della sovrastruttura almeno fino allo spostamento corrispondente al cosiddetto Stato Limite di Collasso (Figure 4a, 4b e 4d) (Mentre l'OPCM 3274/2003 e le sue successive modifiche ed integrazioni prevedevano, per la progettazione sismica, due Stati Limite (Stato Limite di Danno e Stato Limite Ultimo), le nuove norme tecniche ne prevedono quattro: Stato Limite di Operatività, Stato Limite di Danno, Stato Limite di Vita e Stato Limite di Collasso);
- dei cosiddetti “elementi di interfaccia”, cioè di quei componenti e di quelle strutture che attraversano, orizzontalmente o verticalmente, il *gap* (interfaccia): passerelle d'accesso, coperture dei *gap* stessi, scale, ascensori, tubazioni di vario tipo, cavi, ecc (Figura 4c).

La corretta realizzazione dei *gap* e degli elementi d'interfaccia non è affatto difficoltosa, ma l'esperienza applicativa ha evidenziato che errori (commessi soprattutto durante la costruzione) sono poi spesso assai ardui da correggere e possono comportare notevoli costi aggiuntivi inattesi. Gli elementi d'interfaccia non devono impedire il libero movimento della sovrastruttura (neppure quello verticale, seppur limitato a pochi centimetri al massimo, indotto dalla grande deformazione orizzontale degli isolatori elastomerici – si veda la Figura 4d). Inoltre, mentre per alcuni di tali elementi (ad esempio, per le coperture dei *gap* - vedi Figura 5) si può ammettere il danneggiamento durante un terremoto violento (purché sia ad essi limitato), in quanto se ne accetta la successiva sostituzione, per altri è indispensabile (ad esempio per le tubazioni del gas e, in generale, per quelle di edifici strategici) od opportuno (ad esempio per quelle di edifici non strategici contenenti fluidi non pericolosi, per scale ed ascensori) mantenerne l'integrità anche durante un terremoto violento: ecco che, allora, le linee delle tubazioni (grazie alla loro geometria, ai vincoli e, soprattutto, all'utilizzazione di particolari snodi o “giunti meccanici” – *joint*) devono essere in grado di assorbire gli spostamenti di progetto (quello compatibile con la larghezza del *gap* per fluidi pericolosi) senza rompersi (Figura 4c), mentre strutture d'interfaccia come scale ed ascensori devono essere vincolate o alla sola sovrastruttura o alla sola sottostruttura (ovvero al terreno circostante od alla sovrastruttura adiacente indipendentemente isolata) e presentare, all'estremità libera, i necessari valori del *gap* orizzontale e verticale (riguardo a quest'ultimo – quando si utilizzino isolatori in gomma o che, comunque, comportino spostamenti verticali indotti dalle deformazioni orizzontali – è opportuno prevedere sempre qualche centimetro – si veda, ad esempio, la Figura 4d). Ovviamente, poi, occorre garantire che i *gap* siano e restino completamente liberi.

Le suddette raccomandazioni e, soprattutto, l'ultima possono sembrare superflue, ma l'esperienza realizzativa ha purtroppo dimostrato che così non è. Pertanto, occorre che sia il direttore dei lavori che il collaudatore in corso opera (In base alla normativa vigente il collaudo di costruzioni isolate sismicamente deve essere in corso d'opera e (in accordo con l'OPCM n. 3274/2003 e successive modifiche ed integrazioni) la commissione di collaudo deve includere un esperto di applicazioni dell'isolamento sismico.

) di costruzioni isolate sismicamente le tengano ben presenti e non si limitino a controllare la corretta qualifica, produzione ed installazione degli isolatori e l'adeguatezza della realizzazione degli elementi strutturali. In particolare, il certificato di collaudo potrà essere rilasciato solo dopo il completamento della costruzione od installazione degli elementi d'interfaccia prima menzionati.

Sistemi dissipativi

La dissipazione d'energia è una strategia costruttiva complementare a quella dell'isolamento. Essa consiste nell'inserimento, in apposite posizioni della struttura (cioè sulle diagonali o, comunque, ove sono massimi gli spostamenti differenziali, si veda la Figura 2c), di dispositivi, detti dissipatori (*damper*), in grado di “attrarre” e concentrare su se stessi gran parte della dissipazione dell'energia trasmessa alla struttura dal sisma (cioè gran parte della trasformazione di tale energia in calore), che, in assenza di essi, sarebbe operata dagli elementi strutturali e non, attraverso il danneggiamento di tali elementi e, eventualmente, il collasso della struttura o di sue parti.

I dissipatori più comuni sono di tipo viscoso ed elastoplastico, oltre che ad instabilità impedita, viscoelastico, ad attrito, od elettroinduttivo. In particolare, i dissipatori elastoplastici (*Elastic-Plastic Damper* o EPD, Figure 6a e 6b) si basano sulla capacità di particolari acciai o di altri materiali di sopportare numerosi cicli di elevate deformazioni plastiche, mentre i dissipatori viscosi (*Viscous Damper* o VD, Figura 6c), si basano sulla dissipazione energetica derivante dal passaggio di fluidi particolarmente viscosi (ad esempio siliconici) attraverso stretti orifizi nel setto presente in un sistema cilindro-pistone.

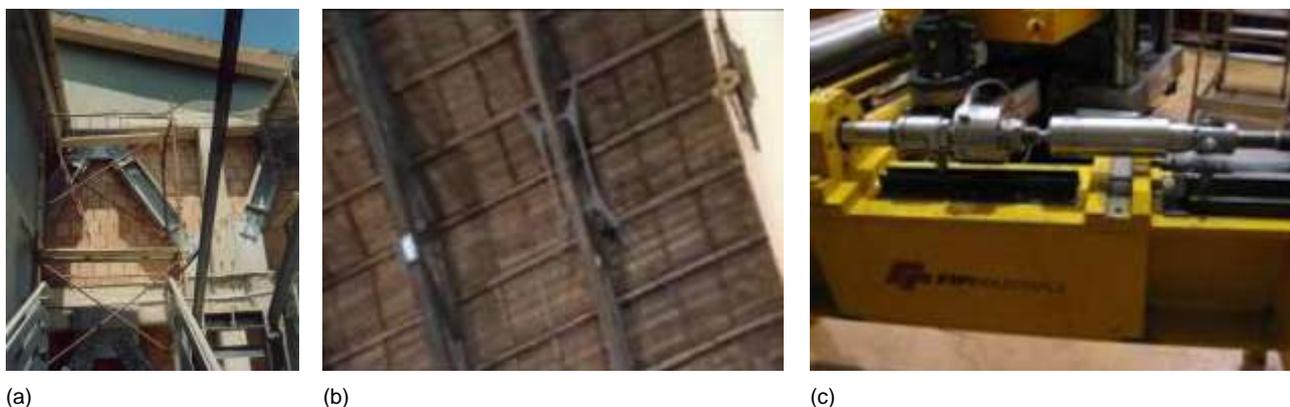


Figura 6 – (a) Controventi dissipativi con dispositivi EPD inseriti nel corso del *retrofit* della scuola Domiziano Viola di Potenza nel 2000 (zona sismica 1). (b) Uno dei dissipatori EPD inseriti nella struttura del tetto della cattedrale di Santa Maria di Collemaggio a L'Aquila per limitare le vibrazioni delle pareti. (c) Vista, durante le prove di laboratorio, di un dissipatore VD rientrante installato nel Duomo di Siena per impedire il ribaltamento della facciata.

I sistemi dissipativi sono meno efficaci di quelli d'isolamento, perché lasciano entrare inalterata l'energia sismica nella struttura e perché, per attivarsi e funzionare, hanno la necessità che la struttura si deformi (e non possono, quindi, ridurre gli spostamenti relativi nella stessa misura con cui riescono a farlo i sistemi d'isolamento, si confrontino le Figure 1a e 1c). Inoltre, non incrementando il periodo di vibrazione della struttura, non minimizzano il panico. Infine, rendono spesso necessaria l'installazione di numerosi elementi ingombranti e sovente antiestetici, come le aste di controvento (per riportare rigidamente, cioè senza modifiche, lo spostamento di ciascun piano alla quota di quello superiore o inferiore) ed anche i dissipatori stessi (Figura 6a).

Questa tecnica, però, è particolarmente utile quando l'isolamento sismico non è applicabile, cioè, principalmente, o perché la struttura considerata è un edificio troppo flessibile, o perché il terreno su cui poggia è troppo soffice, o perché occorre adeguare o migliorare sismicamente un edificio che non presenta (e non permette di realizzare) *gap* sufficientemente ampi, rispetto agli edifici adiacenti, tali da permettere i necessari spostamenti rigidi (che, come si è detto, possono raggiungere alcune decine di centimetri).

Dispositivi SMAD e STU

Oltre a quelli d'isolamento e dissipativi, i moderni sistemi antisismici includono:

- le cosiddette *Shock Transmitter Unit* (STU), ritegni oleodinamici che lasciano la struttura libera di deformarsi nel caso di deformazioni lente, come quelle di origine termica, ma (analogamente alle cinture di sicurezza in un'auto) si bloccano, irrigidendo la struttura, nel caso di deformazioni rapide, come quelle indotte dal sisma (Figure 7a e 7b) o (nel caso dei ponti e dei viadotti) dalle frenate dei camion;
- gli SMAD, dispositivi (*Device*) in leghe a memoria di forma (*Shape Memory Alloy* o SMA), che permettono di connettere, durante il sisma, elementi strutturali separati o soggetti a spostamenti relativi consistenti, limitando al massimo le variazioni dei carichi su di essi agenti al variare degli spostamenti relativi (Figure 7c e 7d).

Le prime e tuttora più numerose applicazioni delle STU riguardano i ponti e i viadotti (ove sono accoppiati ad altri dispositivi antisismici) ed alcuni edifici industriali, mentre gli SMAD (ancora di costo non trascurabile) sono stati sviluppati, nell'ambito di progetti comunitari, per la protezione del patrimonio culturale. Quanto alle SMA, si nota che con esse possono essere realizzati anche dissipatori ricentranti (un'applicazione di questo tipo ha già riguardato, in Italia, gli originali delle statue marmoree di Scilla e Nettuno, custoditi al Museo di Messina).



Figura 7 – (a) Due dei 34 dispositivi STU installati all'interno della Basilica Superiore di San Francesco in Assisi durante i lavori di restauro effettuati a seguito dei danni riportati nel corso del terremoto umbro-marchigiano del 1997/98. (b) Installazione di dispositivi STU di Figura 7a all'interno della Basilica Superiore di San Francesco in Assisi per irrigidire la struttura durante un terremoto. (c) Alcuni dei 47 SMAD installati nella Basilica Superiore di San Francesco in Assisi per connettere il tetto del transetto a ciascuno dei due timpani, a seguito dei danni subiti da questi ultimi durante il terremoto summenzionato. (d) Uno degli SMAD di Figura 7c.

Livelli di protezione assicurati dai moderni sistemi antisismici

Quali livelli di protezione si possono conseguire con i moderni sistemi antisismici e, in particolare, con l'isolamento e la dissipazione d'energia? Sicuramente di molto superiori a quelli di una struttura antisismica convenzionale. Una buona progettazione del sistema d'isolamento e della struttura permette all'edificio di sopportare terremoti distruttivi (quelli che determinano danni anche gravi su una moderna struttura antisismica convenzionale o il crollo di una non antisismica), senza subire alcun danno.



Figura 8 – Crolli e danni provocati dal terremoto di Wenchuan (Repubblica Popolare Cinese) del 12 maggio 2008 in edifici fondati convenzionalmente.



Figura 9 – Assenza di danni (agli elementi sia strutturali che non strutturali) in uno dei tre edifici residenziali isolati sismicamente che si trovavano nell'area colpita dal terremoto di Wenchuan del 12 maggio 2008, nonostante le azioni sismiche di progetto fossero state fortemente sottostimate. Due degli edifici (incluso quello mostrato nelle figure) erano in cemento armato, mentre un terzo, di 6 piani, era in muratura: quest'ultimo è stato, a livello mondiale, il primo edificio in muratura ad aver resistito indenne ad un terremoto tanto violento.

Queste prestazioni sono confermate non solo da una grande quantità di studi teorici e simulazioni numeriche, ma anche da un'estesa sperimentazione in laboratorio e, quel che più conta, dall'esperienza reale di un numero ormai consistente di ponti, viadotti ed edifici isolati o protetti da sistemi dissipativi che hanno ottimamente affrontato terremoti violenti (o, comunque, significativi):

- in Friuli, dove il viadotto Somplago dell'autostrada Udine-Tarvisio, nel quale l'impalcato era stato da poco installato, resistette indenne alla seconda scossa (quella di settembre) del sisma del 1976;
- a San Francisco ed a Los Angeles, in California, durante i terremoti 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;
- nell'area di Kobe, in Giappone, durante il terremoto di Hyogo-ken Nanbu del 1995;

- a Santiago, in Cile, in occasione di varie scosse sismiche, inclusa una di magnitudo 5,9 nel 1996;
- a Bolu, in Turchia, durante i due eventi di Kocaeli e Duzce del 1999;
- a Sendai-City, a Kushiro-City, ad Ojiya-City ed in altre località giapponesi, durante i violenti terremoti che hanno colpito il Giappone, con cadenza praticamente annuale, dal 2003;
- infine, nella Repubblica Popolare Cinese, durante il disastroso terremoto di Wenchan del 12.05.2008 (Figure 8 e 9).

Occorre ribadire che, con l'isolamento sismico, non subiscono danni non solo la struttura, ma anche le parti non strutturali (tamponamenti, tramezzi, ecc.) e che gli impianti e gli oggetti all'interno dell'edificio rimangono indenni. Per di più, essendo lente le vibrazioni della struttura isolata, si elimina la condizione di panico indotta dal terremoto (che può essere molto pericolosa in edifici ad elevata presenza umana, in particolare nelle scuole) e si possono proseguire, quasi senza interruzione, le attività in corso (condizione di particolare importanza per gli ospedali, i centri di gestione dell'emergenza, i centri computerizzati, ecc.): ad esempio, in un ospedale sismicamente isolato colpito dal terremoto di Northridge nel 1994 (*USC Hospital* di Los Angeles) le attività ospedaliere proseguirono senza interruzione alcuna dopo il terremoto. Insomma, si può dire che con l'isolamento sismico si può raggiungere la tanto desiderata "protezione sismica totale".

In Italia, la necessità di ricostruire numerosi edifici strategici e pubblici, a causa delle già ricordate frequenti inadeguatezze riscontrate nelle verifiche di sicurezza imposte dall'OPCM N. 3274/2003, offre interessantissime prospettive per l'applicazione dell'isolamento sismico. E tali ottime prospettive non si limitano agli edifici "importanti" suddetti, ma riguardano anche la comune edilizia residenziale, perché (come si è già notato) la nuova normativa sismica, in molti casi, rende economicamente conveniente (o, quantomeno, poco costosa) l'adozione dell'isolamento sismico anche per tali costruzioni (si vedano le Figure 5 e 12-15).

Materiali utilizzati nei moderni sistemi antisismici

Ma quali sono i materiali utilizzati per la realizzazione di questi marchingegni miracolosi? Nulla di particolarmente inconsueto. Più che nella ricerca di materiali "particolari", la tecnologia si è sviluppata verso l'uso "particolare" di materiali la cui conoscenza era ed è nota e consolidata. Ciò anche perché, in applicazioni di questo genere, dove un dispositivo è probabile che "lavori" una sola volta nella sua vita, l'importante è garantire l'affidabilità nel tempo. Così si usano principalmente la gomma e l'acciaio, preferibilmente inossidabile. Va però detto che anche materiali d'uso meno comune hanno fatto recentemente ingresso nel campo dell'ingegneria civile, quali le già citate SMA (peraltro già da tempo utilizzate, per le loro particolari caratteristiche, in altri settori, come l'ingegneria aeronautica e quella biomedica), ed hanno dimostrato ottime caratteristiche di comportamento per la soluzione dei problemi di riduzione della risposta sismica: il loro uso, pertanto, ha già trovato importanti applicazioni (Figura 7c-d).

APPLICAZIONI DEI MODERNI SISTEMI ANTISISMICI

Attualmente vi sono, nel mondo, già oltre 10.000 strutture protette mediante le moderne tecnologie antisismiche, situate in oltre 30 paesi (Figura 10). L'uso di tali tecnologie è ovunque in continua crescita e riguarda un numero sempre maggiore di paesi. La sua estensione è ovunque influenzata, in modo determinante, dalle caratteristiche della normativa applicata. Un forte impulso all'affermazione dei moderni sistemi antisismici si deve anche agli effetti di terremoti violenti, con i crolli delle strutture costruite in modo convenzionale e, al contrario, l'ottimo comportamento di importanti opere protette con i sistemi suddetti (soprattutto, ma non solo, d'isolamento), in particolare il Giappone (Par. 5.4).

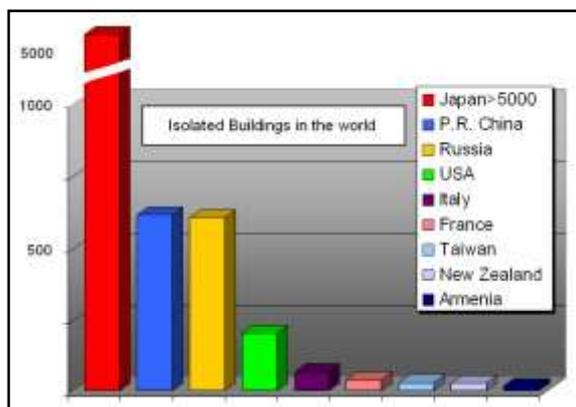


Figura 10

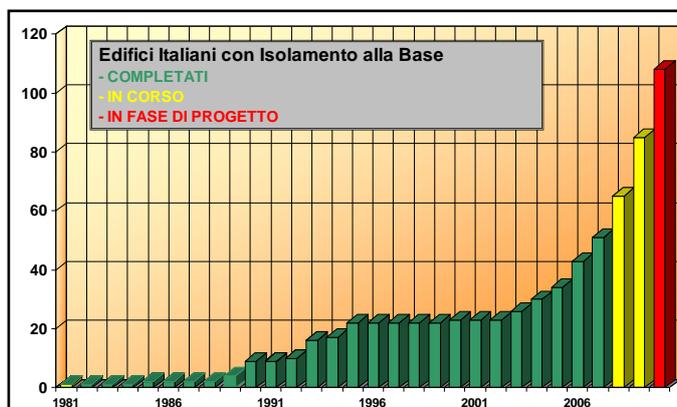


Figura 11

Non meraviglia, quindi, che il **Giappone**, in conseguenza del terremoto di Hyogo-ken Nanbu del 1995 ed anche grazie alla disponibilità di un'adeguata specifica normativa dal 2000 ed alla liberalizzazione dell'uso dell'isolamento sismico dal 2001, abbia ulteriormente consolidato la sua leadership a livello mondiale, già da tempo acquisita, con gli attuali oltre 5.000 edifici isolati (in aggiunta ad altri 2.700 protetti con sistemi dissipativi e ad un buon numero di ponti e viadotti isolati). In questo paese, la tendenza è ora di isolare, da una parte, anche grattacieli e gruppi di edifici sorretti da

un'unica grande struttura isolata (*artificial ground*) e, dall'altra, pure piccoli e leggeri edifici privati (di questi ultimi ve ne sono già 3-000 isolati e 2-000 protetti da dissipatori). Inoltre, sono iniziate l'utilizzazione di sistemi d'isolamento 3D ed importanti applicazioni dell'isolamento sismico anche nel settore industriale (in particolare per proteggere fabbriche di semiconduttori e strutture nucleari) e per la salvaguardia del patrimonio culturale.

Al Giappone segue ora, per numero di applicazioni delle moderne tecnologie antisismiche, la **Repubblica Popolare Cinese**, con 650 edifici isolati e decine di edifici protetti da sistemi dissipativi (oltre a numerosi ponti e viadotti isolati); anche in questo paese le nuove applicazioni delle tecnologie suddette continuano a succedersi ad un ritmo elevato (in particolare per gli edifici residenziali) e proseguono con grandi realizzazioni (come quella riguardante i 50 edifici isolati del nuovo centro residenziale di Pechino). Di rilievo sono pure ora, come in Giappone, l'uso di isolatori 3D negli edifici e quello di SMAD per la salvaguardia del patrimonio culturale, oltre a quello dell'isolamento sismico per la protezione degli impianti industriali, ad esempio con le prime applicazioni ai serbatoi di gas naturale liquefatto (*Liquefied Natural Gas* o LNG).

Questo notevole sviluppo ha fatto recentemente retrocedere al terzo posto la **Federazione Russa**, dove risultano esservi attualmente circa 600 edifici isolati: qui, infatti, le nuove applicazioni delle moderne tecnologie antisismiche (che sono principalmente d'isolamento) procedono con una certa lentezza da diversi anni, sebbene ora annoverino interessanti realizzazioni e progetti, sia di adeguamento sismico (*retrofit*) di edifici monumentali che per grattacieli di nuova costruzione. Questi sono attuati finalmente con sistemi d'isolamento "di tipo occidentale", nettamente più affidabili di quelli a forma di fungo rovesciato in cemento armato utilizzati fino a qualche anno fa nella maggior parte dei paesi dell'ex-URSS (Armenia esclusa). È da notare che, per i grattacieli russi isolati in costruzione a Sochi, si utilizzano isolatori di produzione italiana.

Al quarto posto restano gli **Stati Uniti d'America**, dove l'uso dei moderni sistemi antisismici nei ponti e nei viadotti (con 600-650 applicazioni sparse in tutto il paese) e, per la dissipazione d'energia, anche negli edifici, prosegue in modo soddisfacente, ma, a causa della normativa molto penalizzante in vigore per gli edifici isolati (nonostante l'ottimo comportamento di alcuni di essi durante il terremoto di Northridge del 1994), il numero di nuove realizzazioni di questo tipo resta limitato. Infatti, tali edifici continuano a risultare da 100 a 200, sebbene in gran parte molto importanti e per la metà oggetto di interventi di *retrofit*, attuati, in particolare, per edifici strategici e pubblici.

L'**Italia**, dove le applicazioni dei moderni sistemi antisismici sono iniziate nel 1975 per i ponti ed i viadotti e nel 1981 per gli edifici (4 anni prima del Giappone e degli USA), resta quinta, almeno per il numero di edifici isolati già completati: essi risultano ora circa 70 (oltre a 20 prossimi al completamento), sia strategici o pubblici, sia residenziali. Inoltre, il nostro paese vanta già alcune decine di edifici protetti da dissipatori, SMAD, o STU. È comunque da notare che, in Italia, vi è stato un incremento significativo del numero degli edifici protetti da moderni sistemi antisismici completati negli ultimi anni (con i primi *retrofit* di edifici con l'isolamento) e, soprattutto, delle nuove realizzazioni in costruzione o progetto (Figura 11): ciò si deve alla nuova normativa sismica nazionale. L'Italia, infine, resta leader mondiale per numero ed importanza delle applicazioni dei moderni sistemi antisismici nel settore della salvaguardia del patrimonio culturale ed è ancora quantomeno ai primi posti in quello della protezione, con tali sistemi, dei ponti e dei viadotti (nel quale le realizzazioni italiane erano già oltre 150 all'inizio degli anni Novanta e risultano ora certamente più di 250).

Per quanto riguarda altri paesi, l'utilizzazione dei moderni sistemi antisismici è in forte espansione anche:

- a **Taiwan**, dove, a metà del 2007, risultavano già completati od in costruzione 29 edifici isolati (dapprima soprattutto ospedali, ma, più recentemente, anche edifici residenziali), oltre a 20 ponti o viadotti isolati, ed erano già 85 nel 2005 gli edifici protetti con sistemi dissipativi;
- in **Armenia**, dove, nonostante si tratti di un paese ancora in via di sviluppo e scarsamente abitato, sono già 32 gli edifici isolati (con dispositivi di produzione nazionale), sia di nuova costruzione (fino a 20 piani di altezza) che esistenti (anche in muratura, con il primo *retrofit*, quello della scuola n. 4 di Vanadzor, risalente al 2002);
- in **Nuova Zelanda**, patria dei dispositivi d'isolamento e dissipazione che utilizzano la tecnologia del piombo, anch'essa scarsamente popolata, dove sono già stati protetti con moderni sistemi antisismici oltre 30 edifici, oltre a numerosi ponti e viadotti;
- in **Messico**, che vanta 7 edifici isolati con dispositivi a rotolamento di produzione nazionale (il primo dei quali, la scuola secondaria Legaria a Mexico City, completato già nel 1974), oltre a 25 protetti con dissipatori;
- in **Francia**, che aveva importanti applicazioni dell'isolamento sismico già negli anni '70 (sia nel settore civile che in quello nucleare), e dove, nel territorio europeo, tale tecnica è ora utilizzata nuovamente per ulteriori impianti nucleari in costruzione o previsti (vedi oltre), mentre, nell'isola francese della Martinica, le realizzazioni in corso sono nel settore civile, con l'isolamento sismico addirittura obbligatorio per proteggere le scuole ed altri edifici pubblici.

Si noti che anche a Taiwan ed in Armenia l'inizio delle applicazioni si deve a due terremoti violenti: quello di Chi Chi del 1999 (dopo il quale fu modificata la normativa nazionale, incentivando l'uso dei moderni sistemi antisismici) e quello di Spitak del 1988.

Importanti realizzazioni sono iniziate da alcuni anni anche in **Turchia**, in **Grecia**, in **Portogallo**, in **Venezuela** ed a **Cipro** (molte delle quali con dispositivi prodotti in Italia o progetti italiani) e, più recentemente, in **Argentina**, **Israele**, **India**, **Romania** ed **Iran** e proseguono nella **Corea del Sud**, in **Canada**, **Cile**, **Indonesia** e **Macedonia**. Le applicazioni in Iran (dove un edificio è già protetto da dissipatori italiani) sono, in prospettiva, di particolare interesse, in quanto a Parand (una nuova città satellite di Tehran in costruzione) è in corso un enorme progetto, che prevede la realizzazione di centinaia di edifici residenziali isolati.

Per quanto attiene alla Corea del Sud, all'isolamento di numerosi ponti e viadotti (molti dei quali dotati di dispositivi italiani o prodotti in collaborazione con aziende italiane) e di 13 serbatoi LNG, si aggiungono attualmente un solo edificio isolato ed uno solo protetto da dissipatori, ma è prevista una rapida estensione dell'uso dei moderni sistemi antisismici anche negli edifici, a seguito del violento terremoto di Busan-Fukaoka del 2005 (di magnitudo $M = 7,0$), con epicentro fra la penisola coreana ed il Giappone, e di un evento più recente (2007), di magnitudo assai inferiore ($M = 4,8$), ma con epicentro all'interno del paese. In Canada sono numerose le applicazioni di sistemi dissipativi (anche di produzione nazionale), ma l'utilizzazione dell'isolamento sismico sta iniziando solo ora. Sulla Macedonia, infine, si nota che questo paese vanta la prima applicazione dell'isolamento sismico moderno, a livello mondiale: si tratta della scuola elementare Pestalozzi, che fu costruita a Skopje dopo il disastroso terremoto del 1963 su LDRB donati dalla Svizzera (tali isolatori, assai poco armati e ormai fortemente deteriorati, sono stati sostituiti con HDRB nel 2007).

Per concludere, è da sottolineare l'uso crescente delle moderne tecnologie antisismiche, in numerosi paesi, non solo per la protezione delle strutture civili, ma anche in altri due settori di estremo interesse: quello del patrimonio culturale e quello degli impianti industriali. Nel primo da tempo primeggia l'Italia, dove SMAD, STU, dissipatori e sistemi d'isolamento, sviluppati nell'ambito di progetti comunitari a partire dall'inizio degli anni '90, sono già stati applicati sia ad alcune chiese antiche famose (ad esempio, oltre che alla Basilica Superiore di San Francesco in Assisi, alla Cattedrale di Santa Maria di Collemaggio a L'Aquila, al Duomo di Siena, ecc.) che a singoli capolavori (come i Bronzi di Riace, il Satiro Danzante di Mazara del Vallo, le già citate statue di Scilla e Nettuno al Museo di Messina, ecc.).

Nel secondo settore è di grande rilevanza l'isolamento sismico di impianti a rischio d'incidente rilevante come i serbatoi LNG (attuato dapprima in Francia, in Grecia e nella Corea del Sud, poi anche in Turchia e nella Repubblica Popolare Cinese e previsto prossimamente in Messico) e le strutture nucleari. Riguardo a queste ultime, oltre alla prima applicazione giapponese ad esse della tecnica suddetta (riguardante la *Nuclear Fuel Related Facility*), è da citare la costruzione del *Jules Horowitz Reactor*, già in corso nel centro di ricerca francese di Cadarache. Inoltre, si prevede a breve la costruzione di ulteriori nuovi impianti nucleari isolati, sia in Giappone (dove sono già disponibili regole di progetto che permettono di licenziarli) che in altri paesi, in particolare ancora a Cadarache in Francia, dove l'isolamento è già stato deciso anche per l'impianto *ITER* per la fusione nucleare controllata, che è stato progettato con un'attiva collaborazione italiana.

Considerazioni conclusive

È naturale ora domandarsi perché in Italia non si sia ancora giunti ad un'applicazione estensiva delle moderne tecnologie antisismiche. La risposta è che, in Italia, mancando fino all'8 maggio 2003 una normativa di riferimento, i progetti delle costruzioni isolate, o che comunque prevedevano l'uso di tecnologie non convenzionali per la riduzione della risposta sismica, dovevano essere valutati dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. L'intento, di tutelare l'utilizzatore finale (che è la società) dall'uso incauto o improprio dovuto ad errate progettazioni, era giusto. Spesso, però, il meglio è nemico del bene! E le buone intenzioni del Consiglio Superiore, a causa della complessità dell'iter burocratico e del conseguente inaccettabile allungamento dei tempi di realizzazione, si sono tradotte in un freno alla diffusione di strategie di protezione che, se fossero state applicate in modo esteso già negli anni passati, sarebbero ora provvidenziali in un paese ad elevate pericolosità e vulnerabilità sismiche quale è il nostro (Figura 10).

L'entrata in vigore della nuova normativa (che, come si è già sottolineato, prevede e regola esplicitamente l'adozione delle nuove tecnologie di protezione sismica) e della nuova classificazione sismica del territorio (che riconosce la diffusa pericolosità sismica del territorio italiano e l'aggiorna ai dati più recenti) lasciano ben sperare per un futuro nel quale la lotta contro le catastrofi sismiche possa fruire di strumenti moderni e adeguati. Fra l'altro, la nuova normativa sismica prevede esplicitamente la rivedibilità delle regole e dei criteri in essa contenuti, sulla base dello sviluppo delle conoscenze in campo scientifico e tecnologico: ciò permetterà non solo di migliorare la normativa laddove ciò risulterà necessario, ma anche di tenere conto, nella valutazione della pericolosità sismica, di nuove metodologie, come ad esempio quella deterministica, che costituisce un utile complemento alle classiche metodologie di tipo probabilistico sino ad ora utilizzate per la classificazione sismica del territorio nazionale: tutti i recenti violenti terremoti, da ultimo quello di Wenchuan del 12 maggio 2008 (Figura 8), hanno evidenziato i forti limiti dell'approccio probabilistico).

Oltre alla nuova normativa sismica ed alla nuova classificazione sismica del territorio, anche le iniziative del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti e, recentemente, del Ministero dell'Istruzione, Università e Ricerca (Decreto Legge n. 137), che promuovono l'applicazione dei moderni sistemi antisismici, lasciano ben sperare per il futuro: ma ciò è vero a condizione che non si abbassi la guardia nei confronti di un nemico subdolo per i suoi lunghi tempi di ritorno, come è il terremoto, e che non si dimentichi l'enorme rischio connesso alla grande vulnerabilità di un patrimonio edilizio esistente ancora del tutto inadeguato a sostenere la "sfida sismica", come è quello italiano.

La Figura 10 mostra come, mentre l'uso delle moderne tecnologie antisismiche è ancora limitato in Italia, in alcuni paesi (USA e, soprattutto, Giappone e nella Repubblica Popolare Cinese) esso sia decollato già da tempo. Però, grazie alla nuova normativa sismica e agli effetti benefici che essa ha già prodotto, l'Italia (che, d'altra parte, era stata tra i primi paesi a realizzare strutture isolate e dotate di sistemi dissipativi) sta ormai recuperando rapidamente il terreno perduto, con un numero crescente di applicazioni non soltanto ad i ponti, ai viadotti ed alle opere strategiche e pubbliche, ma anche agli edifici residenziali (Figure 5 e 12-15).



Figura 12 – I primi edifici residenziali italiani in cemento armato, di nuova costruzione, protetti con l'isolamento simico: (a) la prima applicazione italiana ad edifici residenziali, effettuata a Squillace Marina (CZ), in zona sismica 1, nel 1992 e (al centro) vista del sistema d'isolamento sismico, installato alla sommità del piano terreno e costituito da 43 isolatori LDRB e HDRB (si notino i "denti" che costituiscono il fail-safe system); (b) una delle 4 palazzine residenziali della Base della Marina Militare di Augusta (SR), in zona sismica 2, completate nel 1993, ciascuna con 48 HDRB.



Figura 13 – Alcuni degli edifici residenziali italiani in cemento armato, di nuova costruzione od esistenti, protetti con l'isolamento sismico all'inizio di questo secolo: (a) palazzina residenziale protetta con 28 HDRB con SD sovrapposti, completata a Rapolla (PZ), in zona sisma 1, nel 2000 (accanto ad una gemella fondata convenzionalmente); (b) uno dei 3 edifici dell'ATER della Provincia di Perugia (con 34 appartamenti e negozi), costruiti su 56 HDRB a Città di Castello (zona sismica 2) nel 2004; (c) uno dei 2 edifici dell'IACP di Siracusa adeguati a Solarino (zona sismica 2) nel 2004 mediante l'inserimento di 13 SD e 12 HDRB in ciascun edificio, e (d) vista di un HDRB durante la sua installazione.



Figura 14 – Alcuni degli edifici residenziali italiani in cemento armato recentemente adeguati sismicamente o ricostruiti con l'isolamento, a seguito dei danni riportati durante eventi sismici: (a) palazzina di 3 piani con 11 appartamenti a Fabiano (AN), in zona sismica 2, fortemente danneggiata dal terremoto umbro-marchigiano del 1997/98 e successivamente riparata ed adeguata sismicamente mediante la realizzazione di un nuovo piano interrato e l'inserimento di 56 HDRB nei nuovi pilastri di tale piano, e (al centro) vista di quest'ultimo (prima applicazione europea dell'isolamento sismico in sottofondazione, collaudata in corso d'opera dall'autore di questa relazione, con certificato di collaudo rilasciato nel 2006); (b) palazzina di 3 piani ricostruita nel 2007 a San Giuliano di Puglia (CB) su 13 HDRB e 2 SD, dopo essere stata demolita a seguito dei gravi danni subiti durante il terremoto del Molise e della Puglia del 2002.

Per un'ancor più vasto uso dei moderni sistemi antisismici, gli aspetti economici non dovrebbero costituire un ostacolo: si è già accennato al fatto che la nuova normativa sismica permette di annullare o, quantomeno, di ridurre nettamente l'impatto dei costi aggiuntivi legati all'applicazione dei moderni sistemi antisismici, ma occorre, soprattutto, ricordare che l'uso di tali sistemi minimizza il "rischio" economico relativo alle costruzioni (che tiene conto, accanto ai costi iniziali di costruzione, anche di quelli, più o meno probabili, di riparazione, demolizione, asportazione e smaltimento dei detriti, ricostruzione, delocalizzazione degli abitanti durante i lavori, ecc., conseguenti ad un terremoto) e, a seguito della nuova normativa sismica che impone standard più stringenti di sicurezza, aumenta il valore delle costruzioni stesse.



Figura 15 – Alcuni degli edifici residenziali italiani in muratura od in cemento armato, di nuova costruzione od esistenti, che saranno protetti con l'isolamento sismico: (a) nuovi edifici residenziali in muratura dell'ATER della Provincia di Perugia, realizzati a Corciano, in zona sismica 2 (l'isolamento sismico ha permesso di realizzare un piano in più); (b) fabbricato in provincia di Belluno (zona sismica 2) in mattoni pieni, dei primi del '900, da isolare sismicamente nell'ambito dei lavori di restauro, con la collaborazione dell'ENEA; (c) gruppo di 6 edifici di 4 piani eretti su un'unica piattaforma di *artificial ground* isolata (mediante 40 HDRB e 30 SD) alla sommità dei pilastri che la sorreggono, da realizzare nell'ambito del progetto di demolizione e ricostruzione, con l'isolamento sismico, del "Comparto 219" di Marigliano (il progetto prevede 16 di tali piastre).

Per concludere, si sottolinea anche come i progressi dei mezzi di calcolo, in campo sismologico, per la valutazione della pericolosità sismica, assieme alle conoscenze acquisite sul comportamento delle strutture e alle moderne tecniche antisismiche, come quelle d'isolamento e di dissipazione d'energia, possano e debbano costituire un efficace strumento, che può essere reso disponibile:

- alle Istituzioni preposte per stabilire le priorità d'intervento sulle costruzioni esistenti, in particolare nell'ambito delle verifiche di sicurezza sismica degli edifici strategici previste dalla nuova normativa;
- più in generale, agli urbanisti ed ai gestori dell'emergenza, per la valutazione della vulnerabilità dei nuclei urbani e per sviluppare piani di mitigazione e prevenzione, con particolare attenzione per tutte le infrastrutture che devono essere operative immediatamente dopo l'evento disastroso (ospedali, caserme dei pompieri e della polizia, altri edifici deputati alla gestione dell'emergenza, reti di erogazione, ecc).

BIBLIOGRAFIA

- [1] Mauro Dolce, Alessandro Martelli e Giuliano Panza (2005), *Proteggersi dal Terremoto: le Moderne Tecnologie e Metodologie e la Nuova Normativa Sismica*, 2a edizione, ISBN 88-87731-28-4, 21mo Secolo, Milano.
- [2] Mauro Dolce, Alessandro Martelli e Giuliano Panza (2006), *Moderni Metodi di Protezione dagli Effetti dei Terremoti*, ISBN 88-87731-30-6, Edizione speciale per il Dipartimento Nazionale della Protezione Civile a cura di A. Martelli, 21mo Secolo, Milano.
- [3] Alessandro Martelli, Umberto Sannino, Alberto Parducci e Franco Braga (2008), *Moderni Sistemi e Tecnologie Antisismici. Una Guida per il Progettista*, ISBN 978-88-87731-37-8, 21mo Secolo, R. Irsuti, ed., Milano.
- [4] Umberto Sannino, Horea Sandi, Alessandro Martelli e Ion Vlad (in stampa), *Modern Systems for Mitigation of Seismic Action – Proceedings of the Symposium Held at Bucharest, Rumania, on October 31, 2008*, AGIR Publishing House, Bucarest.