

NUOVE CONCEZIONI PER IL PROGETTO SISMICO: UNA SFIDA PER L'ARCHITETTURA E PER L'INGEGNERIA *

Alberto PARDUCCI **

* Questo articolo riproduce l'Editoriale della rivista "EdA – Esempi di Architettura", numero speciale 2007 – LA SFIDA DELL'ISOLAMENTO SISMICO, di cui il Prof. Ing. Alberto Parducci è l'Autore

** Professore Ordinario di "Tecnica delle Costruzioni", Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi e-Campus

È probabilmente vero che nella storia del pensiero umano gli sviluppi più fruttuosi si verificano spesso nei punti d'interferenza tra due diverse linee di pensiero. Se esse vengono a trovarsi in rapporti sufficientemente stretti da dare origine ad un'effettiva interazione, si può allora sperare che possano seguirne nuovi ed interessanti sviluppi.

Werner Heisenberg (1)

Il mondo è pieno di cose ovvie che nessuno si prende la cura di osservare
Sherlok Holmes, "Il Mastino dei Basrkerville"

PROBLEMI ED AUSPICI

Verso la fine degli anni '20 del secolo scorso Frank Lloyd Wright progettò l'Imperial Hotel di Tokyo affrontando il problema sismico in modo originale. Progettò un edificio complesso, ma lo suddivise in corpi scatolari pensati come elementi "galleggianti" sopra un terreno deformabile. Li fondò su una cortina di pali infissi in uno "shallow cheese soil" superficiale, senza portarli nella formazione melmosa sottostante; ciò perché il sistema fondale potesse funzionare come uno "shock adsorber" (così lo chiamò) deformabile capace di assicurare un effetto di isolamento dinamico nei confronti del sisma. Nelle sue memorie scrisse: "Perché lottare contro il terremoto? Perché non mettersi in sintonia con esso per superarlo in astuzia?". Wright dovette usare la sua forte personalità per imporre quest'idea ad un'ingegneria ancora vincolata alle concezioni di resistenza e di rigidità, arrivando a modificare d'autorità i disegni strutturali.

La costruzione era stata appena ultimata quando nel 1923 un violentissimo terremoto, il Great Kanto Earthquake (M=7.9), colpì Tokyo provocando oltre 120.000 vittime. L'hotel rimase quasi indenne e poté essere usato per alloggiare gli sfollati. "Hotel stands undamaged as monument of your genius" fu il testo del telegramma che il barone Okura inviò a Wright consegnando alla storia la geniale intuizione dell'architetto americano. Nel 1968 l'hotel fu demolito; non sono chiare le ragioni di questa decisione e non si dispone più dei documenti di progetto. Ciò rende difficile oggi separare il mito dalla realtà della vicenda. Tuttavia, le dichiarazioni di Wright appaiono come il manifesto storico di una concezione che per la prima volta aveva indirizzato il progetto di un edificio verso la concreta applicazione di un sistema di protezione sismica differente da quello che proponeva l'ingegneria tradizionale, anzi antitetico. "La rigidità non era la risposta giusta, ma lo erano la flessibilità e la resilienza", aveva affermato anticipando concetti sui quali si fonda oggi l'ingegneria sismica. Era riuscito ad armonizzare *architettura ed ingegneria* per proporre una nuova idea progettuale; ma l'ingegneria dell'epoca non era pronta e non lo comprese, sicché mancò lo sviluppo auspicato da Heisenberg.

La vicenda di Wright e l'esortazione di Heisenberg, prima ancora di introdurre l'argomento di questo numero speciale, invitano a riflettere sull'annosa discrasia della quale troppo spesso soffre il progetto delle costruzioni. Il problema riguarda, ancora una volta, il rapporto fra *architettura* e *struttura* nella pratica professionale corrente, dove non sempre ci si rende conto di quanto sia importante l'armonia fra queste due componenti progettuali; armonia essenziale nelle zone sismiche. L'ambiente d'affari in cui si lavora separa la funzione di un "architetto", che definisce l'opera essendo impegnato a risolvere problemi distributivi da inserire in forme compositive rispondenti ai codici della scuola di appartenenza, da quella di un "ingegnere", che interviene dopo ritenendosi custode di magici procedimenti numerici, ormai automatizzati e neppure sempre efficaci, da soli, nel caso sismico (2). Entrambi sembrano però convinti che il filtraggio attraverso un codice di calcolo minuzioso (3), possa rendere veramente antisismica qualunque costruzione così progettata. L'anomalia è favorita anche, non certo meno, dall'ormai tradizionale separazione culturale fra i percorsi formativi delle due categorie professionali.

In questo contesto, a più di 60 anni dall'esperienza di Tokyo, si inseriscono le nuove tecniche dell'isolamento e della dissipazione di energia, con le quali l'ingegneria sismica apre ora nuovi orizzonti; con quali aspettative? Questa volta le concezioni di fondo nascono come risultato di una ricerca scientifica di natura ingegneristica; appaiono differenti, ma di fatto sono fondate sugli stessi principi intuiti da Wright. I nuovi sistemi si articolano in differenti modalità di applicazione con lo scopo di innalzare sostanzialmente i livelli di sicurezza delle costruzioni, maggiormente nei confronti degli attacchi sismici più violenti. Le recenti norme (4) ne hanno liberalizzato l'impiego, prima soggetto a tormentati iter di approvazione, ed hanno stabilito le procedure occorrenti per il progetto delle costruzioni e per la qualificazione dei sistemi. L'industria italiana produce dispositivi di elevata qualità che soddisfano un ampio spettro di esigenze realizzative. I costi di costruzione non sono elevati; sono elevati invece i benefici economici attesi dalla collettività, dovuti alle riduzioni dei danni e degli interventi richiesti dopo le grandi catastrofi. Le analisi di redditività indicano che l'isolamento può abbassare di circa due gradi l'intensità del terremoto percepito dalla costruzione.

Questo numero di EdA si propone di illustrare le applicazioni più significative delle tecniche di isolamento di tipo "passivo" che, in linea con quanto accade nei Paesi più esposti al rischio sismico, si stanno sviluppando ora anche in Italia (5). L'auspicio è che ciò possa favorire un incontro fra le differenti competenze progettuali per stimolare la ricerca di appropriate *configurazioni morfologiche e strutturali* atte a perseguire il duplice obiettivo di ampliare il campo delle soluzioni architettoniche proponibili e di ottimizzarne l'impiego. Le tecniche d'isolamento sismico richiedono strutture che possano rispondere all'input sismico subendo ampi movimenti rispetto alla base, oppure fra parti di esse. Appare già questo un motivo forte per rinnovare le abituali concezioni ereditate dal principio vitruviano di "*firmitas*". Alcune caratteristiche morfologiche, solitamente considerate improprie, possono diventare adeguate in conseguenza del diverso peso che assumono alcune irregolarità e destrutturazioni delle forme; oppure perché la deformabilità favorisce l'impiego dei dissipatori. Allo stesso tempo, nuovi concetti ignorati dalle consuetudini progettuali, come quelli di *movimento*, *discontinuità* e *deformazione*, ("*motus*", "*scissio*" e "*deformatio*") possono diventare la base per impostare nuove idee architettoniche.

L'importanza dell'argomento non è contestata, ma pochi autori hanno trattato lo scabroso problema delle configurazioni compositive per le zone sismiche. Negli ultimi anni un certo numero di pubblicazioni è cominciato ad apparire, ma l'isolamento sismico stenta a farne parte. I lavori riflettono ancora un punto di vista prevalentemente ingegneristico, lasciando da colmare ampi spazi per affrontare il problema con una mentalità più orientata verso gli aspetti architettonici.

- (1) Premio Nobel per la fisica nel 1932; enunciò il Principio d'indeterminazione
- (2) "Nella misura in cui le leggi della matematica si riferiscono alla realtà non sono certe. Nella misura in cui sono certe non si riferiscono alla realtà", Albert Einstein, "Geometry and Experience", dalla conferenza tenuta all'Accademia delle Scienze Prussiana il 27 Gennaio 1921
- (3) "Non c'è errore più comune di quello di presumere che, siccome sono stati effettuati calcoli matematici lunghi ed accurati, l'applicazione del risultato a qualche realtà strutturale sia assolutamente sicura"; Alfred North Whitehead (citato da J. D. Barrow in "Teorie del Tutto", Adelphi, 2003)
- (4) Ordinanze PCM 3274/03 e 3431/05, la cui applicazione è purtroppo ritardata da una continue di proroghe che tollerano ancora l'impiego delle precedenti norme
- (5) Non sono trattati in questa sede i sistemi "attivi" (ibridi o semi-attivi), considerati troppo sofisticati per poterne prevedere un utilizzo diffuso

IL PROBLEMA SISMICO E LE TECNICHE DI ISOLAMENTO

Il terremoto è un evento naturale imprevedibile; nelle sue manifestazioni più intense produce scosse d'intensità molto superiore alla capacità di resistenza dei materiali da costruzione. Le abitudini progettuali acquisite inducono a sottovalutare questo aspetto. Pur nella consapevolezza di questa inadeguatezza, i requisiti progettuali richiesti dalle precedenti norme erano limitati ad assicurare la resistenza dei singoli elementi strutturali occorrente per superare senza danni i terremoti più frequenti, di media intensità, attesi con periodi di ritorno dell'ordine dei 50-60 anni. Si trattava di eventi la cui intensità, ai massimi livelli di pericolosità, è definita "moderata" (M=5-6) nell'allegata tabella (6) del "US Geological Service". La sicurezza nei confronti dei terremoti più severi era lasciata alle generiche risorse residue delle strutture, senza però che ne fosse richiesto un esplicito controllo progettuale.

In armonia con l'EC8, il progetto sismico esige oggi un valore aggiunto. L'attenzione è rivolta in maggior misura al controllo degli effetti prodotti dagli attacchi più violenti. Dovendo accettare nei loro confronti danni anche gravi, occorre intervenire progettualmente, sia pure con controlli semplificati, per scongiurare quei crolli rovinosi che potrebbero pregiudicare la sicurezza delle persone e la protezione dei valori intangibili, quali sono per esempio i beni storici ed artistici. Il riferimento è diventato quello di un evento raro, definito da un periodo medio di ritorno di circa 500 anni (7), caratterizzato da accelerazioni del suolo quasi dieci volte maggiori di quelle del riferimento precedente. Per una costruzione a base fissa si stima preliminarmente la capacità che può esserle attribuita per opporsi a questo evento estremo in condizioni danneggiate, ma potendo sviluppare un'adeguata capacità dissipativa globale associata a deformazioni anelastiche duttili. Si definiscono così appropriati coefficienti con i quali si valuta ancora un terremoto di progetto ridotto, la cui intensità è però correlata alla capacità post-elastica dissipativa della particolare costruzione in esame. Le norme agevolano questa fase del progetto definendo, oltre a quelli di dettaglio, i requisiti di configurazione che servono per colmare la disparità tra la performance richiesta dall'evento raro e la resistenza effettiva delle strutture. Più di quanto possano indicare gli schemi delle norme, basati in genere su concetti di regolarità, i requisiti di configurazione dipendono però in larga misura dalle configurazioni strutturali condizionate dalle scelte *morfologiche* del progetto architettonico.

È possibile sintetizzare, mediante una rappresentazione spettrale, il divario che può esistere fra la capacità di risposta di una normale struttura antisismica e la domanda del terremoto di riferimento. Nella Figura 1 sono indicati i fattori che possono consentirle di superare questo severo impatto.

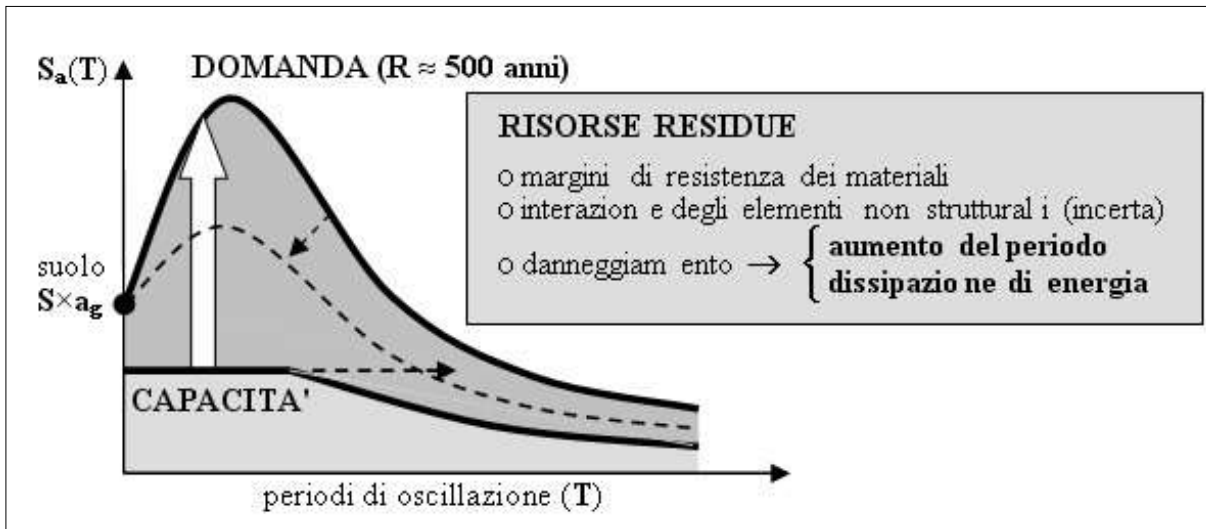


Figura 1: Divario tra domanda sismica e capacità di risposta

Sono importanti gli ultimi due, connessi proprio con il danneggiamento: l'aumento del **periodo di oscillazione** conseguente alla minore rigidità globale della struttura danneggiata e l'aumento della **capacità dissipativa** dovuto alle deformazioni ripetute imposte alle zone critiche plasticizzate. Il primo effetto si legge come uno spostamento verso destra lungo la retta tratteggiata che porta il periodo di oscillazione verso i periodi in cui la domanda si attenua in modo sostanziale; al secondo corrisponde la riduzione, anch'essa tratteggiata, della domanda medesima guadagnata grazie agli effetti dissipativi. I due meccanismi sono efficaci quando le zone critiche del sistema che si oppone al sisma possiedono la deformabilità anelastico-dissipativa potenzialmente necessaria, purché la configurazione del meccanismo anelastico che si produce in fase di danneggiamento abbia un forma appropriata per mobilitare realmente tutte le potenzialità disponibili.

Quanto ora detto contiene già la sostanza dei principi dell'isolamento sismico. Nella concezione del "*capacity design*", che regola il progetto delle costruzioni a base fissa, tutte le membrature strutturali dovrebbero contribuire alla resistenza ed alla dissipazione di energia mediante un danneggiamento diffuso, senza concentrazioni improprie. Con le tecniche dell'isolamento invece queste prestazioni si attribuiscono, anziché alle strutture danneggiate, a particolari dispositivi meccanici, isolatori e dissipatori, opportunamente disposti nel sistema resistente. L'isolamento sismico passivo si consegue pertanto utilizzando una o entrambe le seguenti strategie di progetto:

- *isolamento alla base, con il quale si tende ad ottenere un forte aumento del periodo di oscillazione;*
- *incremento della capacità dissipativa, consistente nell'inserimento di appositi dissipatori opportunamente distribuiti.*

L'isolamento alla base ("*base isolation*") è il sistema più semplice. Si ottiene disponendo la costruzione sopra un letto di isolatori molto deformabili in direzione orizzontale, per lasciare che questa possa oscillare lentamente come un corpo rigido indeformato e con periodi compresi nel campo delle minori domande (per esempio, 2 o 3 secondi). In genere, nelle applicazioni si utilizzano isolatori di gomma multistrato rinforzati mediante lamierini di acciaio. La capacità di ridurre le accelerazioni trasmesse da questi dispositivi aumenta al crescere delle deformazioni imposte; vale a dire che, entro i limiti di progetto, questi isolatori sono tanto più efficaci quanto maggiore è l'intensità degli attacchi sismici. Il sistema si applica bene agli edifici multipiano, dove si riducono le accelerazioni trasmesse ai piani stessi a beneficio degli oggetti e dei valori contenuti. L'aggiunta di una certa capacità dissipativa non è essenziale, ma è utile per attenuare ulteriormente la domanda e per ridurre l'ampiezza delle deformazioni richieste agli isolatori, che possono essere molto grandi, anche dell'ordine di 30 o 40 cm.

In una rappresentazione spettrale di tipo capacitivo, dove le accelerazioni di risposta elastica ($S_a = w^2 S_d$) sono riprodotte in funzione degli spostamenti "equivalenti" (S_d) e dove i periodi di oscillazione T corrispondono alle rette uscenti dall'origine degli assi, si illustra bene l'essenza dell'isolamento alla base (Figura 2). Si consideri, come semplice esempio, un edificio a base fissa che abbia un periodo di oscillazione di 0.5 secondi e si accetti, sempre per semplicità, il criterio di "uguale spostamento". Se nel suo complesso la struttura dispone di una duttilità post-elastica uguale a 5 ($m=5$) il sistema resistente può essere progettato per un input sismico 5 volte inferiore alla domanda del terremoto raro ($q=5$). L'edificio può sopravvivere all'attacco sismico estremo perché lo spostamento equivalente richiesto corrisponde al limite della sua capacità di deformarsi oltre i limiti elastici (le deformazioni plastiche locali dei singoli elementi strutturali possono essere però molto ampie). Se la stessa costruzione è posta sopra un letto di isolatori deformabili capaci di portare, per esempio, il periodo di oscillazione a 2.5 secondi, il grafico mostra come questa, oscillando lentamente, potrebbe sopportare il terremoto estremo senza neppure mobilitare deformazioni superiori ai limiti elastici. Occorre solo che la capacità deformativa degli isolatori sia sufficientemente ampia.

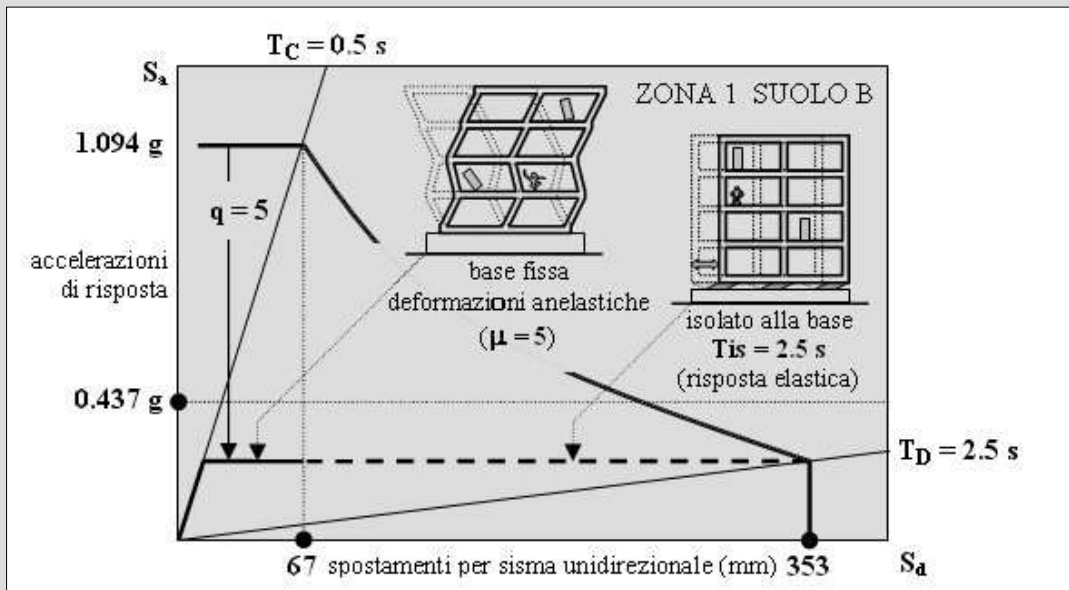


Figura 2: Isolamento alla base in una rappresentazione capacitiva

Un comportamento analogo si consegue anche inserendo alla base del fabbricato dissipatori di tipo viscoso, simili agli ammortizzatori automobilistici, oppure dissipatori capaci di un ampio comportamento elasto-plastico, ottenuto in genere per deformazione plastica di elementi metallici duttili. Dissipatori di questo tipo possono essere inseriti anche nei riquadri delle strutture intelaiate per funzionare in parallelo durante le deformazioni laterali imposte dal sisma. Quest'ultimo è il caso, per esempio, delle costruzioni metalliche che possono sopportare deformazioni orizzontali piuttosto ampie, tali da consentire ai dispositivi di sviluppare la loro capacità dissipativa. Inoltre, le strutture metalliche possono essere configurate anche in modo da far funzionare particolari sistemi di "controventi dissipativi" che all'occorrenza si deformano plasticamente insieme agli stessi elementi strutturali. I controventi dissipativi possono essere usati convenientemente anche per l'adeguamento sismico di strutture intelaiate, purché queste abbiano una deformabilità di piano sufficiente.

La configurazione del "primo piano soffice" ("soft first storey"), derivata dai "pilotis" di Le Corbusier, sebbene sia ancora largamente usata, è particolarmente pericolosa nel caso sismico, perché possiede una capacità dissipativa molto povera quando la resistenza flessionale dei montanti è mobilitata oltre i limiti elastici. I piani soprastanti non si danneggiano perché le forze orizzontali trasmesse non possono superare la resistenza del piano critico (Figura 3). La capacità dissipativa rimane però concentrata in poche cerniere plastiche. Ciò non può evitare il rapido aumento delle deformazioni laterali e, ad aggravare la situazione, fa intervenire il cosiddetto effetto "pi-delta" (momento corrispondente al prodotto del peso delle masse soprastanti per lo spostamento rispetto alla base) che conduce presto al crollo rovinoso dell'intero fabbricato.



Figura 3: Due crolli tipici degli edifici con "primo piano soffice": a sinistra un edificio di Izmit (Kocaeli Earthquake, Turchia); a destra un edificio di Taipei ("Chi Chi Earthquake, Taiwan")

L'adeguamento sismico di questo schema non può essere ottenuto aumentando la resistenza dei montanti del primo piano, perché ciò aumenterebbe la capacità di trasmettere le azioni sismiche ai piani superiori. Il problema può essere risolto invece aumentando la capacità dissipativa del piano critico mediante l'inserimento di VD e confinando le potenziali cerniere plastiche mediante cerchiature ottenute con materiale flessibile (Figura 4).

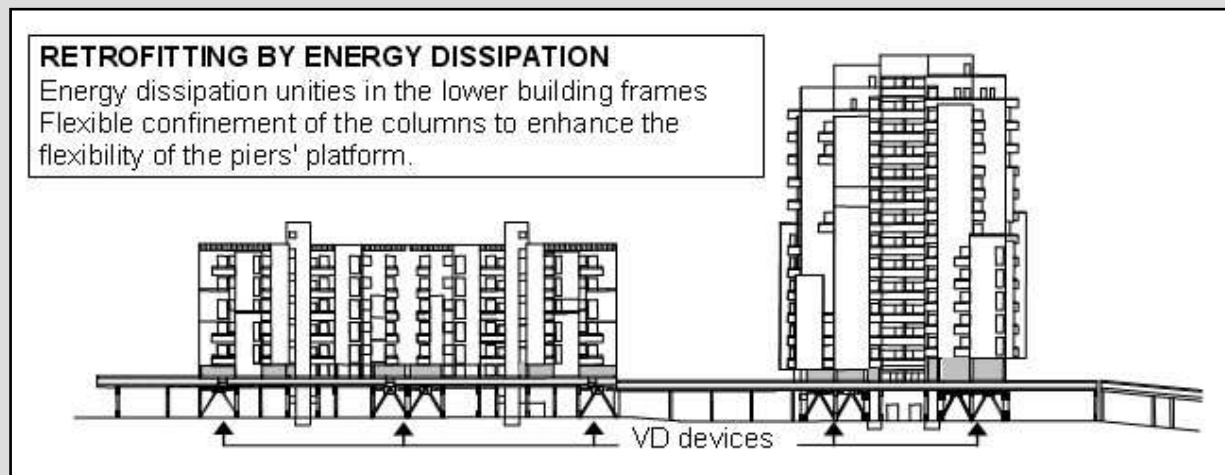


Figura 4: Adeguamento sismico di un complesso su "pilotis" mediante inserimento di VD

L'isolamento sismico ha visto le prime applicazioni all'inizio degli anni '80 in Nuova Zelanda, in California ed in Giappone. Gli edifici sono stati muniti in genere di sistemi di isolamento alla base, secondo schemi diventati ormai tradizionali. Il momento decisivo che ne ha lanciato definitivamente l'impiego è stato il terremoto di Kobe del 1995 (lo Hyogoken Nanbu Earthquake, detto anche Great Hanshin-Awaji Earthquake, $M=7.2$). Nella località di Sanda erano presenti due fabbricati isolati alla base, le cui registrazioni di risposta hanno mostrato con evidenza la forte riduzione delle accelerazioni sismiche trasmesse dagli isolatori. Fu la definitiva conferma di ciò che era stato registrato l'anno precedente all'USC Hospital di Los Angeles, durante il terremoto di Northridge. A Kobe fu perfino possibile confrontare le risposte di due edifici analoghi ed adiacenti, uno isolato l'altro no; in testa al primo furono registrate accelerazioni di piano pari a solo il 20% (!) di quelle misurate nell'altro.

L'isolamento sismico ha trovato un importante impiego anche nel settore delle infrastrutture stradali. In Italia, verso la fine del secolo scorso, era stato raggiunto un certo primato, perché erano stati isolati gli impalcati di oltre un centinaio di ponti. In queste applicazioni furono preferiti dispositivi dissipativi di tipo elasto-plastico, disposti in sostituzione dei normali appoggi delle travate. Un significativo esempio di queste applicazioni è pubblicato nel n° 2-2007 di EdA, dedicato alle Infrastrutture.

- (6) La Magnitudo M è la misura logaritmica di uno spostamento di riferimento; ogni aumento di un grado corrisponde ad uno spostamento 10 volte maggiore!
- (7) Come l'EC8, le norme assumono ora come riferimento l'evento che ha la probabilità di occorrenza del 10% in 50 anni corrispondente, per l'esattezza, ad un periodo di ritorno di 475 anni. Gli edifici scolastici e le costruzioni strategiche, comprendenti gli ospedali, si progettano per periodi di ritorno maggiori

NOTE BIBLIOGRAFICHE

- [1] Werner Heisenberg: "Wandlungen in den Grundlagen der Naturwissenschaft", Hirzel Verlag, 1959 ("Mutamenti nelle basi della scienza", Universale Bollati Boringhieri, Torino 2000)
- [2] E. Kaufmann editor: "An American Architecture - Frank Lloyd Wright", Bramhall House, New York, 1955
- [3] Christopher Arnold & Robert Reitherman: "Building Configuration and Seismic Design", John Wiley & Son, 1982 ("Morfologia Edilizia e Progetto Sismico", Edizioni Luigi Parma, Bologna, 1985)
- [4] C.C. Thiel: "Life cycle cost consideration in structural systems selection", ATC-17, San Francisco (CA), 1986
- [5] C. Arnold: "Architectural Considerations", in Seismic Design Handbook, F. Naeim editor, Von Nostrand, New York, 1989
- [6] R. I. Skinner, W. H. Robinson, G. H. McVerry: "An Introduction to Seismic Isolation", John Wiley & Sons, 1993
- [7] A. Parducci, M. Mezzi: "Economics in Seismic Isolation Options - Expected Benefits Versus Construction Costs", PCEE, Melbourne (Australia), 1995
- [8] A. Parducci: "Seismic Isolation: Why, Where, When: Design Options for Ordinary Isolated Structures" - International Post-Smirn Conference Seminar on Isolation, Energy Dissipation and Control of Vibration of Structures - Cheju (Korea), 1999

- [9] A. W. Charleson, M. Taylor: "Towards an Earthquake Architecture", 12th WCEE, Auckland (NZ), 2000
- [10] A. Parducci: "Seismic Isolation and Structural Configurations - The Italian experience", Special meeting held at the Forell/Elsesser Company, San Francisco (California), 2000
- [11] A. Parducci: "Seismic Isolation and Architectural Configuration" - Special Conference on Conceptual Design of Structures, Singapore, 2001
- [12] A. W. Charleson, M. Taylor: "Earthquake Architecture Exploration", 13th WCEE, Vancouver, 2004
- [13] M. Mezzi, A. Parducci: "Conceptual Seismic Design and State-of-the Art Protection Systems", U. S. National Conference on Earthquake Engineering", San Francisco (CA), 2006
- [14] M. Mezzi: "Architectural and Structural Configuration of Buildings with Innovative Aseismic Systems", 13th WCEE, Vancouver, 2004
- [15] A. Parducci ed Altri: "Base Isolation and Structural Configuration - The New Emergency Management Centre in Umbria", 9th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Kobe, Japan, 2005
- [16] M. Dolce, A. Martelli, G. Panza: "Moderni Metodi di Protezione dagli Effetti del Terremoto", 2005
- [17] E. Elsesser: "New Ideas for Structural Configurations", 8th U. S. National Conference on Earthquake Engineering", San Francisco (CA), 2006
- [18] A. Parducci, M. Mezzi (coordinatori) ed Altri: "Configurazioni Strutturali per l'Ottimizzazione delle Prestazioni dei Sistemi Innovativi di Protezione Sismica", Reluis, Linea 7, Unità E1, Report preliminare 2007
- [19] A. Parducci: "A Synergic Dissipation Approach to Retrofit Framed Structures with a Soft First Storey" (invited paper) - 9th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Kobe, Japan, June 13-16, 2005
- [20] A. Parducci: "Nuovi Sistemi di Protezione Sismica dei Ponti – Il Viadotto Coltano", EdA, n° 2, 2007
- [21] R. Reitherman, A.W. Charleson: "Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering", CUREE, sito internet, www.curee.org