

Principi dell'isolamento sismico e applicazioni in campo nucleare

Un evento sismico può mettere in crisi l'assetto socio-economico anche di grandi aree, oltre a mettere a rischio, anche indirettamente, la vita di migliaia di persone, come ha confermato il recente evento sismico giapponese. La questione sismica, pertanto, deve essere affrontata con tecniche moderne più affidabili, che garantiscono un grado di sicurezza non perseguibile con tecniche tradizionali

■ Giovanni Bongiovanni, Paolo Clemente, Massimo Forni, Alessandro Martelli, Fernando Saitta

La sicurezza sismica

Il terremoto ha da sempre messo a dura prova gli ingegneri, capaci di progettare strutture soggette, nel corso della loro vita, prevalentemente a carichi gravitazionali. Le azioni sismiche, invece, soprattutto con le loro componenti orizzontali, hanno sempre rappresentato delle "illustri sconosciute", spesso associate nel lontano passato a punizioni divine, che mettevano a dura prova costruzioni pensate per sopportare azioni di caratteristiche ben diverse. Le strutture, infatti, sono da sempre state concepite per sopportare azioni verticali statiche, associate nelle antiche costruzioni quasi esclusivamente ai pesi propri degli elementi strutturali.

La storia ci racconta di tante città e civiltà letteralmente distrutte da eventi sismici: un violento terremoto poteva spazzare via in pochi istanti il lavoro di numerose generazioni e le civiltà faticosamente costruite in lunghi secoli. In realtà, già nell'antichità gli ingegneri hanno cercato di capire l'essenza di tali azioni, basandosi sulle esperienze precedenti e comprendendo subito che per fronteggiare le azioni sismiche c'era bisogno di un'idea geniale.

E idee geniali non mancarono. Plinio Il Vecchio nella *Naturalis Historia* scriveva che il tempio di Diana ad Efeso era poggiato su stati di frammenti di carboni co-stipati e di velli di lana per separare una così imponente costruzione da un terreno poco dignitoso: in realtà

nel sistema adottato c'era l'intuizione di disaccoppiare il moto della struttura da quello del terreno, realizzando un isolamento che, in caso di sisma, avrebbe consentito alla struttura di scorrere sul sito di fondazione preservandola dal crollo. L'idea del disaccoppiamento suolo-struttura come sistema di protezione sismica era stato già applicato in precedenza, fu applicato anche in tempi successivi e tornò a galla alla fine del XIX secolo. Nel 1870 Touvaillon progettò un edificio residenziale, inserendo tra la sovrastruttura dalla fondazione dei rulli che potevano scorrere in apposite nicchie di geometria ellittica che garantivano il ritorno alla posizione iniziale. Nel 1909 Calantarientes propose l'interposizione di uno strato di talco fra la struttura e le sue fondazioni, capace di disaccoppiare il moto della struttura da quello del suolo, preoccupandosi anche di progettare dispositivi che consentissero l'elongazione delle condotte in caso di importanti spostamenti.

- **Giovanni Bongiovanni, Paolo Clemente**
ENEA, Unità Tecnica Caratterizzazione, Prevenzione e Risanamento Ambientale
- **Massimo Forni**
ENEA, Unità Tecnica Ingegneria Sismica
- **Alessandro Martelli**
ENEA, Centro Ricerche di Bologna
- **Fernando Saitta**
ENEA, Unità Tecnica Metodi per la Sicurezza dei Reattori e del Ciclo del Combustibile

Purtroppo le normative, normalmente emanate a seguito di eventi sismici, come quello che nel 1908 aveva distrutto Messina e Reggio Calabria, non presero in considerazione queste idee, preferendo la via della rigidità e della resistenza per fronteggiare le azioni sismiche. Tale scelta non teneva conto che un edificio di tipo tradizionale, ben progettato e ben realizzato, sarebbe certamente in grado di evitare il crollo, anche in occasione di un evento sismico violento, ma potrebbe riportare danni notevoli. La capacità di evitare il crollo è, infatti, affidata alla duttilità della struttura, ossia alla sua capacità di dissipare energia danneggiandosi senza crollare. Tale principio, certamente non sostenibile se si pensa ai costi di ricostruzione, diventa addirittura non applicabile per strutture strategiche e impianti a rischio di incidente rilevante (nucleari e chimici), che devono rispettare stringenti requisiti di sicurezza e per i quali non può essere tollerato il minimo danneggiamento.

L'isolamento sismico alla base

Queste considerazioni portano, come già intuito dagli antichi ingegneri, a soluzioni diverse, che si basano sulla drastica riduzione delle forze sismiche agenti sulla struttura, piuttosto che affidarsi alla sua resistenza.

Tra queste, l'isolamento sismico alla base, che consiste nell'interporre tra la fondazione, incassata al suolo, e la sovrastruttura dei dispositivi molto deformabili in direzione orizzontale (figura 1). Il vantaggio che si ottiene è ben



FIGURA 1 Isolatori sismici della nuova scuola Romita di Campobasso
Fonte: ENEA

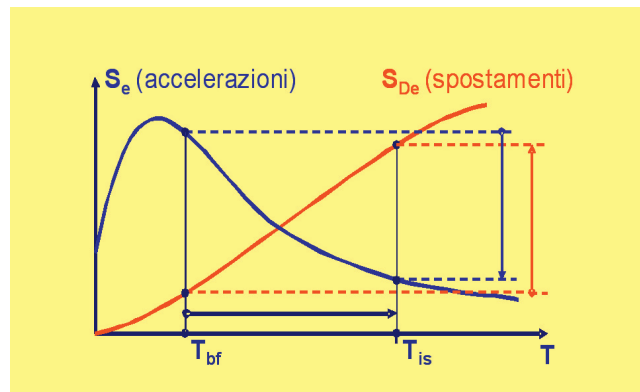


FIGURA 2 Spettro di risposta elastico
Fonte: ENEA

illustrato dallo spettro di risposta elastico che assume, in genere, la forma di figura 2: le strutture con periodo proprio di oscillazione corto ($T_{bf} < 1.0$ s) sono quelle maggiormente sensibili agli effetti sismici; una struttura isolata, invece, con periodo di vibrazione $T_{is} > 2.0$ s, è soggetta ad accelerazioni ridotte.

Al contrario, ad un aumento del periodo corrisponde un incremento dello spostamento, che dovrà essere totalmente assorbito dal sistema di isolamento e che richiederà adeguati giunti strutturali intorno alla costruzione. L'incremento di smorzamento, $\geq 10\%$ negli attuali dispositivi di isolamento, attenua sia gli spostamenti che le accelerazioni. Va subito osservato che, ai fini di un buon isolamento, la sovrastruttura (cioè la parte della struttura posta sopra il sistema di isolamento) deve essere sufficientemente rigida, il sottosuolo non deve essere molto soffice e, infine, deve essere possibile realizzare i giunti tra la sovrastruttura e il terreno circostante per consentire gli spostamenti relativi di cui detto.

I dispositivi d'isolamento, oltre a garantire la funzione di appoggio, devono avere: una bassa rigidità orizzontale; un'adeguata rigidità nei confronti delle azioni orizzontali di piccola entità; una buona capacità dissipativa, di ricentraggio e di vincolo laterale sotto carichi orizzontali di servizio. Le ultime proprietà possono essere affidate anche a dispositivi ausiliari.

Esistono vari tipi di isolatori: gli isolatori elastomerici armati, gli isolatori a scorrimento a superfici piane, gli isolatori "a pendolo scorrevole" e gli isolatori a rotolamento. Nei nuovi progetti di impianti nucleari isolati sono usualmente considerati gli isolatori elastomerici armati (*High Damping Rubber Bearing* o HDRB) e in gomma-

piombo (*Lead Rubber Bearing* o LRB), ottenuti dai precedenti mediante inserti in piombo in uno o più fori centrali per incrementare lo smorzamento. È da ricordare che, a partire da agosto 2011, l'applicazione dell'isolamento sismico sarà regolato in Europa dalla norma EN15129. Tale norma non comprende specificatamente gli impianti nucleari e, pertanto, le prescrizioni contenute devono essere considerate requisiti minimi per tali strutture: ad esempio, nel caso degli impianti nucleari sarebbe opportuno effettuare prove di qualificazione su isolatori in scala piena, applicando dinamicamente il carico sismico contemporaneamente nelle tre direzioni; inoltre, le prove di accettazione dovrebbero essere effettuate su tutti gli isolatori da installare, anziché soltanto su una percentuale di essi.

L'utilizzo dell'isolamento sismico richiede l'adozione di particolari accorgimenti costruttivi, soprattutto nel caso di impianti a rischio di incidente rilevante, quali un adeguato giunto strutturale (*gap*) tra la struttura da isolare e le parti solidali al suolo, efficaci "elementi d'interfaccia", che collegano le parti solidali alla struttura isolata con quelle solidali al suolo, e i *fail-safe system*, che impediscano spostamenti agli isolatori oltre il loro limite, garantendo anche un "martellamento soffice".

L'alloggiamento dei dispositivi d'isolamento ed il loro collegamento alla struttura devono essere concepiti in modo da assicurarne l'accesso e rendere i dispositivi stessi ispezionabili e sostituibili. I dispositivi di isolamento elastomerici ad alto smorzamento e in gomma-piombo non richiedono particolare manutenzione. Infine, deve essere prevista la possibilità di sostituire il singolo dispositivo, perché difettoso o a seguito di un evento sismico violento (od altro) che possa averlo danneggiato.

In fase di esecuzione sono di fondamentale importanza il controllo della posa in opera dei dispositivi e la verifica della completa separazione tra sottostruttura e sovrastruttura e tra quest'ultima ed altre strutture adiacenti. Per gli impianti nucleari devono essere disposte speciali prove per la caratterizzazione dinamica del sistema di isolamento e deve essere previsto un idoneo sistema di monitoraggio sia durante le suddette prove sia per l'intera vita dell'opera. Il sistema di isolamento, in particolare, deve essere monitorato in continuo per seguirne il comportamento e individuare eventuali anomalie, soprattutto in occasione di un terremoto.

Applicazioni in campo nucleare

Attualmente per gli impianti a rischio di incidente rilevante si considerano usualmente due eventi sismici di riferimento:

- l'*Operational Basis Earthquake* (OBE), ossia un sisma massimo di operatività in occasione del quale tali impianti devono poter rimanere funzionanti in condizioni di sicurezza;
- il *Safe Shutdown Earthquake* (SSE), ossia il "Terremoto di Spegnimento in Sicurezza", il massimo evento per il quale non devono verificarsi incidenti rilevanti, tali da pregiudicare lo spegnimento del reattore ed il successivo mantenimento dello stato di reattore spento, in piena sicurezza.



FIGURA 3 Le 4 unità PWR di Cruas, Francia, dotate di isolamento sismico
Fonte: <http://www.icjt.org/>

L'impianto deve continuare a funzionare regolarmente per eventi sismici inferiori all'OBE, mentre deve spegnersi e mantenersi in sicurezza per eventi superiori. L'SSE rappresenta il massimo evento di progetto; l'OBE è usualmente fissato in modo da ottenere azioni sismiche pari ad almeno il 50% di quelle dell'SSE.

L'isolamento sismico consente la standardizzazione del progetto di impianti nucleari, rendendolo praticamente indipendente dalla sismicità del sito (almeno per quel che riguarda la componente orizzontale dell'accelerazione). Questo è particolarmente importante nella fase iniziale dello sviluppo di nuovi reattori, come quelli di IV Genera-

zione, quando il sito di costruzione è ancora sconosciuto, o nel caso di utilizzazione in un paese ad alta sismicità di un reattore progettato per un paese e sismicità minore, come sarebbe il caso degli EPR francesi se fossero realizzati in paesi a maggiore sismicità.

I pionieri dell'utilizzazione dell'isolamento sismico nel settore nucleare sono stati i francesi. Le loro prime applicazioni risalgono all'inizio degli anni 60, con l'utilizzazione di isolatori orizzontali in neoprene (*Neoprene Bearing* o NB) per supportare le tanche (vessel) di alcuni reattori, come quelli termici raffreddati a gas (*Gas Cooled Reactors* o GCR) dell'unità A3 di Chinon, di Saint Laurent e Bugey in Francia e di Vandellos in Spagna e quello veloce sperimentale Phénix in Francia: sebbene, per questi impianti, l'applicazione dei NB fosse finalizzata al controllo delle deformazioni termiche, tali dispositivi si dimostrarono efficaci anche per la protezione sismica e non hanno successivamente evidenziato effetti negativi d'invecchiamento.

Reattori ad acqua leggera

Nel 1978 iniziò a Cruas in Francia la costruzione del primo impianto nucleare espressamente dotato di isolamento sismico, composto da 4 PWR, aventi una potenza totale di 3600 MWe, entrati poi in funzione nel 1984 (figura 3). L'isolamento consentì di utilizzare al sito di Cruas, caratterizzato da $a_g = 0.3g$, lo stesso progetto standardizzato degli altri impianti realizzati in siti con $a_g = 0.2g$. Il sistema di isolamento è composto da 3600 (900 per ciascuna unità) isolatori NB di sezione quadrata, di lato 500 mm e altezza di 65 mm, che riducono a 1 Hz la prima frequenza naturale orizzontale dell'isola nucleare (300.000 t, dimensioni in pianta 140x80 m).

Nel 1976 era stata iniziata dalla Framatome francese, in Sudafrica a Koeberg, circa 30 km a nord di Città del Capo, la costruzione di 2 PWR di 900 MWe, entrati in funzione soltanto nel 1985. Ai complessivi 1829 isolatori NB di questo impianto, di 700 mm di lato e 130 mm di altezza, sono sovrapposti isolatori a scorrimento (utilizzando l'ottone, materiale ad alto attrito, pari al 20%) per limitare gli sforzi nella gomma alle elevate deformazioni angolari e utilizzare il progetto standardizzato francese. I dispositivi a scorrimento, testati a distanza di 14 anni, hanno mostrato un aumento del coefficiente d'attrito di quasi il 70%, che li rende inattivi: ciò, però,

non è stato considerato un problema, in quanto si è anche verificato che la parte in gomma degli isolatori è in grado di sostenere le deformazioni di progetto.

Un'ulteriore applicazione francese dell'isolamento sismico avrebbe dovuto riguardare il PWR di Karun River in Iran, ma questa realizzazione è stata interrotta nel 1978, a progetto già licenziato, a seguito della rivoluzione khomeinista.

Si noti, infine, che le applicazioni francesi dell'isolamento sismico nel settore nucleare non si limitarono ai reattori, ma riguardarono anche:

- tre piscine di decadimento del combustibile irraggiato (di forma ad U) a La Hague, nei pressi del Canale della Manica, protette nel 1980 da 364 NB di lato 700 mm ed alti 130 mm, tali da ridurre la prima frequenza naturale a 0,8 Hz;
- il laboratorio STAR del centro di ricerca di Cadarache del Commissariato per l'Energia Atomica Francese (Commissariat à l'Energie Atomique o CEA), situato nel sud-est della Francia, con PGA = 0,32 g al SSE;
- un edificio di due piani della marina militare francese (24x13 m in pianta) a Tolone, contenente scorie radioattive, sismicamente isolato nel 1981 con 32 NB di diametro 400 mm e 20 NB di diametro 500 mm;
- un impianto di arricchimento dell'uranio, isolato recentemente, coperto da segreto militare.

Altre applicazioni dell'isolamento sismico a strutture nucleari già ultimate riguardano un impianto di riprocessamento del combustibile nucleare nel Regno Unito, basi missilistiche nell'Unione Sovietica (ai fini della protezione dalle vibrazioni indotte da possibili esplosioni atomiche nei pressi delle basi) e, più recentemente, una *Nuclear Fuel Related Facility* in Giappone, unica applicazione in quel paese.

A Cadarache è in costruzione il Jules Horowitz (100 MWth), un moderno reattore per prove sui materiali (d'irraggiamento) e di ricerca e sviluppo sul combustibile nucleare, ed è prevista la costruzione, con isolamento sismico, della macchina di prova per la fusione nucleare ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*).

È in fase di progettazione il reattore 4S (*Super Safe, Small and Simple*), sviluppato da Toshiba-Westinghouse, che dovrebbe vedere la prima applicazione con

un'unità da 10 MWe a Galena in Alaska, con un sistema di isolamento composto da 20 isolatori elastomerici con inserti in piombo, che conferisce alla struttura una frequenza di 0.5 Hz. Il progetto del sistema di isolamento deve seguire le prescrizioni della *Japan Electric Association Guide JAEG 4614-2000, Technical Guideline on Seismic Base Isolated System for Structural Safety and Design of Nuclear Power Plants*. Al riguardo va ricordato che, tra il 1987 e il 1996, il *Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI)* ha sviluppato uno studio su *Verification Test of the FBR Seismic Isolation*, pubblicando un *Draft Technical Guidelines for Seismic Isolation of fast breeder Reactors*. Da questi la Toshiba ha anche sviluppato le linee guida per il controllo di qualità e manutenzione dei dispositivi di isolamento. Il progetto 4S non ha ancora avuto l'approvazione della Nuclear Regulatory Commission.

Un team inizialmente guidato dalla Westinghouse (che però ha recentemente abbandonato l'iniziativa), ha sviluppato IRIS (*International Reactor Innovative and Secure*) che, su proposta dell'ENEA, prevede un sistema di isolamento sismico messo a punto in collaborazione con il Politecnico di Milano e l'Università di Pisa e composto da 99 HRDB, con modulo tangenziale della gomma $G = 1.4 \text{ N/mm}^2$, diametro compreso tra 1.000 e 1.200 mm e altezza della gomma $t_e = 100 \text{ mm}$, pari allo spostamento in presenza dell'evento di spegnimento in sicurezza SSE ($PGA = 0.3g$). Modelli in scala degli isolatori sono anche stati testati, mostrando segni di cedimenti soltanto per deformazioni pari al 300% quelle di progetto.

Reattori veloci

Il comportamento sismico dei reattori veloci è molto complesso, a causa dell'architettura dell'impianto che prevede la presenza sia di strutture molto rigide che flessibili. Infatti, i progetti più recenti (elencati in questo paragrafo) prevedono la soluzione isolamento sismico, che consente di soddisfare i requisiti dei reattori di IV generazione e di standardizzare la progettazione dell'impianto, in modo indipendente dal sito e, quindi, dall'intensità sismica.

Negli anni 80 la General Electric-Hitachi Nuclear Energy sviluppò l'ALMR, un reattore al sodio, sponsorizzato dallo U.S. Department of Energy (DOE) e il reattore modula-

re S-PRISM (*Power Reactor Innovative Small Module* 41, 5 MW per ciascun modulo), entrambi dotati di isolamento sismico.

La Argonne National Laboratory (ANL) sta sviluppando il reattore STAR-LM (*Secure Transportable Autonomous Reactor-Liquid Metal*) per il quale è in corso uno studio per l'isolamento anche in direzione verticale con frequenza di 1.1 Hz.

Il Korea Atomic Energy Research Institute sta sviluppando il KALIMER (*Korea Advanced LIquid METal Reactor*), un reattore raffreddato a sodio, economicamente competitivo, intrinsecamente sicuro e resistente alla proliferazione, dotato di isolamento sismico. In Giappone negli anni 90 fu dato avvio agli studi per l'isolamento sismico dei reattori veloci con il DFBR (*Demonstration Fast Breeder Reactor*).

Una nuova generazione di reattori veloci è in corso di sviluppo, con un sistema di isolamento sismico composto da LRB con diametro di 1600 mm; modelli in scala di questi isolatori sono stati testati sulla tavola vibrante della E-Defense of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention in Giappone. Come per il reattore 4S, il riferimento normativo è quello delle *Technical Guidelines on Seismic Base Isolation System for Structural Safety and Design of Nuclear Power Plants*.

Agli anni 90 risalgono anche i primi studi per l'isolamento sismico dell'EFR (*European Fast Breeder Reactor*). Il sistema prevedeva l'isolamento orizzontale per l'intera struttura e quello verticale per il solo reattore.

Attualmente è in corso di sviluppo l'ESFR (*European Sodium Fast Reactor*) nell'ambito del European Collaborative Project CP-ESFR. Obiettivo del progetto, nel quale l'ENEA è responsabile della task *Design measures for consequence mitigation of seismic loads*, è la messa a punto di linee guida e raccomandazioni per la riduzione della vulnerabilità sismica.

È infine da notare che è stata presentata alla Commissione Europea una proposta progettuale, coordinata da ENEA, per l'applicazione dell'isolamento sismico a reattori nucleari di IV generazione raffreddati a piombo. Il progetto (SILER: *Seismic-Initiated events risk mitigation in LEad-cooled Reactors*) si propone, fra l'altro, di apportare modifiche all'attuale normativa per gli isolatori sismici in modo da renderla estendibile agli impianti nucleari e di qualificare isolatori e giunti in scala piena in severe condizioni dinamiche tridirezionali. ●