

L'isolamento sismico degli impianti a rischio di incidente rilevante

Numerosi terremoti violenti colpiscono varie aree del pianeta, con intensità ben superiori a quelle previste per la progettazione delle strutture. Tra queste un'attenzione particolare meritano gli impianti industriali a rischio di incidente rilevante, sono particolarmente esposti a causa del numero e della complessità delle strutture e dei componenti critici. Per questi sono necessarie tecniche antisismiche, come l'isolamento sismico, in grado di fornire una protezione completa, anche in caso di eventi estremi, superiori a quelli di progetto

DOI 10.12910/EAI2015-085

■ M. Forni

Introduzione

Gli impianti chimici, petrolchimici e le centrali nucleari, sono strutture estremamente complesse, formate da numerosissimi componenti con le più diverse caratteristiche dinamiche, strettamente interconnessi al fine del corretto funzionamento dell'impianto stesso. La progettazione e la verifica antisismica di sistemi così complessi richiede ovviamente uno sforzo superiore rispetto a quello dei comuni edifici, anche a causa della possibilità di incidenti rilevanti, in grado cioè di arrecare ingenti danni non solo alle persone ma anche all'ambiente circostante. L'isolamento sismico, con la sua capacità di abbattere significativamente le accelerazioni orizzontali e di rendere uniforme il moto della sovrastruttura durante il terremoto, è certamente una tecnologia molto attrattiva per questo tipo di impianti. Fra l'altro, l'isolamento sismico consente di standardizzare il progetto, rendendolo praticamente indipendente dal sito di costruzione (e questo è certamente utile per impianti destinati a essere realizzati in tutte le parti del mondo). Dal punto di vista strettamente tecnico, lo svantaggio dell'isolamento sismico è principalmente dato dallo spostamento relativo tra la parte isolata ed il terreno (o gli edifici adiacenti) e la conseguente necessità di prevedere un opportuno spazio (*gap*) fra le due parti. Negli impianti industriali, il gap sismico è spesso attraversato

da reti impiantistiche, in particolare tubazioni, contenenti fluidi infiammabili o pericolosi, spesso anche in temperatura e pressione. Per limitare questo problema, per il quale sono comunque già disponibili giunti di dilatazione per ogni esigenza, conviene estendere il più possibile la zona isolata. Mentre in una centrale nucleare è facile riconoscere un'*isola* contenente tutti i componenti critici ai fini della sicurezza, in un impianto petrolchimico, che è estremamente vasto, occorre isolare i singoli componenti critici (in genere serbatoi, vedi paragrafo seguente).

Numerosi progetti di ricerca e decine e decine di applicazione in casi reali, hanno ormai dimostrato non solo che l'isolamento sismico è una tecnica ormai matura per una vasta diffusione in ogni tipo di impianto, ma che anche il bilancio economico, qualora correttamente eseguito, è certamente positivo.

Nei prossimi capitoli verranno illustrati esempi di importanti applicazioni in campo petrolchimico e nucleare.

Contact person: Massimo Forni
massimo.forni@enea.it

Impianti petrolchimici

I serbatoi per lo stoccaggio di prodotti petrolchimici nelle raffinerie sono certamente i componenti più critici in caso di evento sismico. La tipologia di danno più comune è la fuoriuscita del liquido contenuto (serbatoi cilindrici, Figura 1) o la rottura delle colonne di supporto (serbatoi sferici, Figura 2). Nel “migliore” dei casi si avrà un forte inquinamento del terreno circostante, nel peggiore un incendio che potrebbe propagarsi ai serbatoi vicini, con danni sempre maggiori e con conseguente inquinamento atmosferico, nubi tossiche, ecc. Pertanto, l’isolamento sismico dei soli serbatoi comporterebbe già una decisiva riduzione del rischio di incidente rilevante in caso di terremoto.

Nei prossimi paragrafi verranno brevemente esaminate le problematiche principali delle due più diffuse tipologie di serbatoi e le possibili soluzioni, così come emerso dalle conclusioni del Progetto Europeo INDEPTH (Bergamo et al., 2007) e da altri progetti di ricerca effettuati dall’ENEA a partire dalla metà degli anni 90. Per maggiori dettagli ed approfondimenti si rimanda a Forri et al. (2001) e Martelli et al. (2002).

Serbatoi cilindrici

I serbatoi cilindrici servono per lo stoccaggio di grandi quantità di liquidi, sia grezzi che lavorati. Dal punto di vista strutturale, sono formati da lamiere “sottili” e sono più o meno ancorati al terreno (a volte solo “appoggia-



FIGURA 1 Incendio nella raffineria di Tupras, causato dal terremoto della Turchia del 1999

ti” oppure parzialmente interrati). Durante il terremoto la massa del liquido interno agisce sulle pareti cercando di sollevare il bordo nella parte in trazione e provocando una deformazione detta a “zampa di elefante” in quello in compressione (Figura 3). Fino ad accelerazioni del terreno di 0,25 g, risulta ancora conveniente (in termini economici) ancorare il serbatoi al terreno ed aumentare lo spessore delle pareti. Per accelerazioni comprese fra 0,25 e 0,5 g, l’isolamento sismico diviene competitivo nei confronti dell’irrobustimento tradizionale. È da notare che il costo dell’isolamento sismico non è dovuto solo agli isolatori (che comunque devono essere numerosi e piuttosto grossi a causa del notevole peso da sostenere), ma anche alla necessità di realizzare una spessa base rigida in cemento armato su cui appoggiare il serbatoio (non necessaria nel caso di fondazione convenzionale, che è sempre piuttosto blanda in questo tipo di strutture). Il costo di tale basamento può anche superare quello del serbatoio stesso (struttura, come si è detto, tutto sommato “semplice”) per cui la soluzione isolata non è in genere attrattiva per i gestori dell’impianto. Diverso è il caso dei serbatoi per lo stoccaggio di gas liquefatti (LNG tank), caratterizzati da un doppio contenimento (quello interno in acciaio criogenico, adatto a sopportare bassissime temperature) e dalla presenza di costose attrezzature per il raffreddamento del gas e del suo mantenimento allo stato liquido: in questo caso l’isolamento sismico serve anche a proteggere l’investimento.



FIGURA 2 Incendio in una raffineria, causato dal terremoto di Tohoku del 2011 (Giappone)

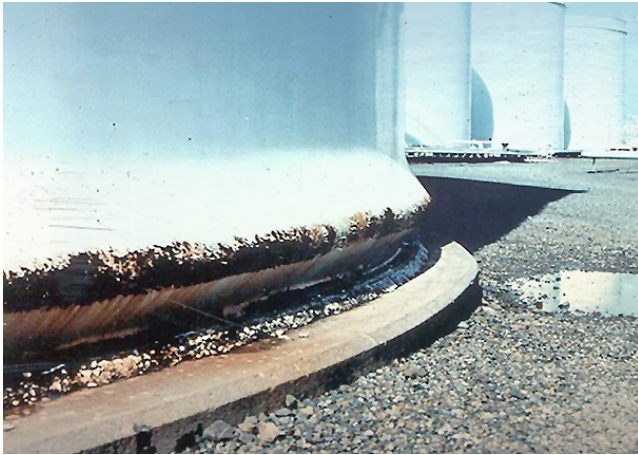


FIGURA 3 Tipica deformazione a “zampa di elefante” in un serbatoio cilindrico



FIGURA 4 Serbatoio LNG a Pampa Melchorita, Perù, isolato con dispositivi a pendolo scorrevole

La Figura 4 mostra il caso di un serbatoio LNG a Pampa Melchorita (Perù). I serbatoi LNG dotati di isolamento sismico sono circa una ventina e la loro realizzazione è iniziata negli anni 90.

Per accelerazioni superiori a 0,5 g l'isolamento sismico diviene l'unica soluzione tecnica possibile, in quanto servirebbero spessori di lamiera tali da non risul-

tare saldabili e ancoraggi estremamente complessi. Infine, l'isolamento sismico, unito a grossi spessori ed ancoraggi fra serbatoio e piattaforma di base, può fornire adeguata protezione sismica fino ad accelerazioni di 0,8-0,9 g. È da notare che, per eventi estremamente violenti, gli impianti petrolchimici restano comunque sottoposti a rischio di rotture, fuoriuscite ed incendi. Pertanto, la riduzione del rischio parte anche dalla scelta iniziale del sito di costruzione, che dovrebbe essere scelto in zone a bassa sismicità e lontano da centri abitati.

Sfere

I serbatoi sferici servono in genere per lo stoccaggio di GPL, propano, ammoniaca e altri gas liquefatti (conservati tipicamente a $8 \div 12$ bar e $-40 \div -60$ °C). Per limitare gli sforzi sulle pareti, le sfere possono essere semi-interrate. Più frequentemente, sono supportate equatorialmente (molto diffuso è il metodo Horton, che utilizza 11 colonne). Questa configurazione permette di rinforzare abbastanza semplicemente il serbatoio utilizzando controventi disposti a “X” fra le colonne (Figura 5) mentre rende abbastanza problematico l'inserimento dell'isolamento sismico, che richiederebbe la connessione rigida delle basi delle colonne per mezzo di telai o solettoni. Chi scrive non conosce esempi di serbatoi sferici isolati alla base delle colonne, nonostante che tale possibilità sia stata analizzata in dettaglio, anche con prove su tavola vibrante, nel corso del succitato progetto INDEPTH (Forni et al., 2006).

È piuttosto evidente che il metodo Horton non è particolarmente adatto per offrire resistenza nei confronti terremoti di forte intensità, a causa del significativo valore della massa (svariate migliaia di tonnellate) posta in posizione elevata. La presenza delle colonne provoca inoltre problemi di fatica sulle saldature a causa dei cicli termici cui sono sottoposte le pareti. Recentemente sono stati eseguiti molti retrofit sulle sfere Horton, volti ad eliminare le colonne ed appoggiare direttamente la sfera su un unico basamento di grosse dimensioni (come una gigantesca pallina da golf). A questo punto l'inserimento dell'isolamento sismico al di sotto del basamento è piuttosto semplice e, infatti, è già stato utilizzato in decine di applicazioni.



FIGURA 5 Retrofit con controventi su di un serbatoio sferico nella raffineria di Aspropirgos (Grecia)



FIGURA 6 Rimozione delle colonne in un serbatoio "Horton" e inserimento dell'isolamento sismico nel basamento

Sloshing

Il liquido contenuto nei serbatoi si mette in movimento durante il terremoto generando onde superficiali. Questo fenomeno (*sloshing*) è in parte positivo, in quanto evita che tutta la massa partecipi simultaneamente al moto sismico (essendo una parte in 'ritardo') e riduce quindi il carico inerziale agente sulle pareti che si avrebbe, ad esempio, nel caso di serbatoio completamente pieno e liquido confinato (configurazione che viene sempre evitata). Lo *sloshing* può comunque generare problemi nei serbatoi cilindrici in quanto l'onda superficiale potrebbe superare il bordo del serbatoio stesso e far fuoriuscire il liquido (Figura 7).



FIGURA 7 Fuoriuscita di liquido dalla sommità di un serbatoio cilindrico semi-interrato a causa dello *sloshing*



FIGURA 8 Danneggiamento del tetto di un serbatoio cilindrico a causa dello *sloshing*

Molti serbatoi infatti hanno solamente un tetto mobile (galleggiante) o comunque non adatto a sopportare grossi carichi impulsivi (Figura 8). Inoltre, negli LNG, il serbatoio interno che contiene il liquido criogenico non ha nessuna copertura. Occorre pertanto evitare fenomeni di accoppiamento fra la frequenza naturale dello *sloshing* e quella dell'isolamento sismico, al fine di evitare la formazione di onde di altezza significativa. Il rischio di accoppiamento è maggiore in serbatoi di piccole o medie dimensioni. Infatti, il periodo naturale dello *sloshing* in serbatoi di grande dimensioni può arrivare a 7-9 s, ben lontano dal periodo di 2 s tipico dell'isolamento sismico.

Impianti nucleari

Stato dell'arte

Negli anni 1983-84 sono entrati gradualmente in funzione i 4 reattori nucleari della centrale di Cruas, nel sud della Francia (Figura 9), primo esempio di applicazione dell'isolamento sismico a centrali nucleari. L'anno dopo toccava a due identiche unità realizzate a Koeberg (Sud Africa). La decisione di isolare questi impianti fu presa negli anni 70 (quando al mondo gli edifici dotati di questa tecnologia si contavano sulle dita di una mano) per non dover modificare il progetto standard dei PWR francesi, progettati per resistere ad un terremoto di riferimento con accelerazione massima di 0.25 g (contro i 0.3 g dei due siti succitati). Pertanto, le centrali nucleari sono state fra le primissime strutture su cui si è applicato l'isolamento sismico. In netto contrasto con questo brillante inizio, nei successivi 30 anni sono stati realizzati centinaia di reattori nucleari, nessuno con isolamento sismico (mentre nel frattempo gli edifici civili isolati sono passati da poche unità a oltre 15.000, come illustrato da Martelli et al., 2014). Le ragioni di questo brusco stop vanno ricercate nel fatto che la maggior parte degli impianti oggi in funzione sono costituiti da

reattori ad acqua, caratterizzati da un'architettura piuttosto robusta e compatta, in grado di resistere non solo ai relativamente bassi input sismici assunti a progetto fino a pochi anni fa (in genere 0.25 g), ma anche a significativi terremoti reali. Ne è un esempio la centrale Kashiwazaki-Kariwa, danneggiata dal severo terremoto di Niigata-Chuetsu-Oki del 2007, rimasta fuori servizio per 3 anni, senza comunque aver subito gravi danni. Hanno comunque giocato un ruolo negativo anche la mancanza di normativa specifica (tutt'ora carente) e il fatto che l'isolamento sismico non fornisce protezione in direzione verticale.

I recenti devastanti terremoti che hanno colpito varie zone del pianeta e i criteri di sicurezza sempre più stringenti adottati dai reattori di III e IV Generazione hanno fatto però aumentare notevolmente i valori di riferimento assunti per i terremoti di progetto. Inoltre, la verifica sismica è stata estesa anche in condizioni di "beyond design" per cui, anche per eventi estremi (fuori progetto), deve essere dimostrata l'integrità dell'impianto ed impedita la fuoriuscita di materiale radioattivo. Pertanto, oggi l'isolamento sismico è diventato praticamente una strada obbligata, soprattutto per i reattori veloci raffreddati a metalli liquidi (LMFR) caratterizzati dalla presenza di componenti flessibili, inclini ad amplificare l'eccitazione sismica. Questi reattori, in grado di produrre nuovo combustibile durante il normale funzionamento (reattori autofertilizzanti) saranno una scelta obbligata per



FIGURA 9 I quattro reattori della centrale nucleare di Cruas (Francia), i primi al mondo dotati di isolamento sismico (1983)

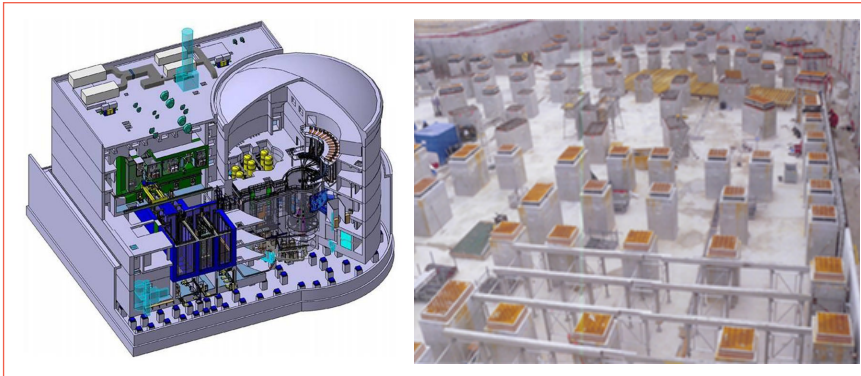


FIGURA 10 Schema del reattore sperimentale Jules Horowitz di Cadarache (Francia) e posa in opera degli isolatori sismici

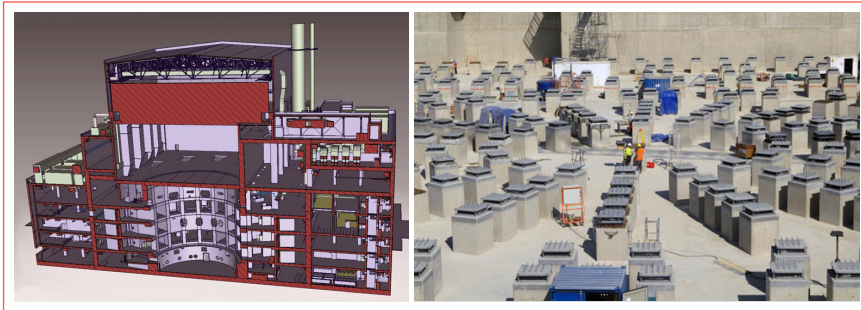


FIGURA 11 Schema del reattore a fusione ITER in costruzione a Cadarache (Francia) e posa in opera degli isolatori sismici

uno sviluppo sostenibile in un futuro non lontano. Come vedremo nel paragrafo successivo, praticamente tutti i nuovi progetti di reattori attualmente in fase di sviluppo prevedono l'isolamento sismico.

Ad oggi, sono comunque solo due i reattori in fase di costruzione con l'isolamento sismico, entrambi presso il centro di ricerche di Cadarache, nel sud della Francia: il reattore sperimentale Jules Horowitz (JHR, Figura 10) e il reattore a fusione ITER (Figura 11).

Nuovi progetti

A partire dagli anni 90 sono iniziate attività di ricerca e sviluppo riguardanti la possibilità di isolare sismicamente reattori veloci raffreddati al sodio quali l'ALMR (*Advanced Liquid Metal Reactor*), il PRISM (*Power Reactor Innovative Small Module*, poi divenuto S-PRISM) e lo

STAR-LM (*Secure Transportable Autonomous Reactor-Liquid Metal*) in USA, il KALIMER (*Korea Advanced Liquid Metal Reactor*) in Corea, il DFBR (*Demonstration Fast Breeder Reactor*) in Giappone e l'ESFR (*European Fast Breeder Reactor*) in Europa. Alcuni di questi progetti sono stati abbandonati, altri successivamente modificati e ancora in fase di sviluppo. Per maggiori informazioni si rimanda al lavoro di Forni e Poggianti, 2011.

Un grosso sforzo è stato fatto per il reattore ad acqua IRIS (*International Reactor Innovative and Secure*) sviluppato da Toshiba-Westinghouse con un notevole contributo italiano; per lo sviluppo del suo sistema di isolamento sismico si è arrivati fino alla costruzione e prova di isolatori prototipici (Forni et al., 2009). Anche il piccolo reattore 4S (*Super Safe, Small and Simple*, sviluppato sempre da Toshiba-Westinghouse e candidato ad essere realizzato in Alaska) prevede l'isolamento sismico. Al momento però questi due progetti sono stati "congelati". Sempre nel campo

dei reattori ad acqua è da citare lo studio effettuato da ENEA e ENEL, in collaborazione con EdF, per lo studio dell'isolamento sismico del reattore francese EPR (*European Pressurized Reactor*), che si pensava di realizzare in Italia in 4 esemplari su tre siti (prima dell'incidente di Fukushima e del referendum del 2012). L'isolamento sismico avrebbe permesso di adattare il reattore alla maggiore sismicità italiana senza modifiche significative al progetto originale (e di renderlo più sicuro).

Nell'ambito del progetto europeo SILER (*Seismic-Initiated events risk mitigation in LEad-cooled Reactors*), coordinato da ENEA (Forni et al., 2014) è stato sviluppato il sistema di isolamento sismico dei reattori raffreddati a piombo MYRRHA (*Multi-purpose hybrid research reactor for high-tech applications*) e ELSY (*European Lead-cooled System*). MYRRHA non è un

reattore di potenza ma il primo prototipo mondiale di “bruciatore” di scorie nucleari, la cui costruzione è prevista in Belgio. ELSY invece è la prima versione del prototipo europeo di reattore al piombo, sviluppato da Ansaldo con una forte collaborazione e sostegno da parte di ENEA.

In SILER, prototipi in scala piena dell'isolatore progettato per ELSY (del tipo HDRB - *High Damping Rubber Bearing*) sono stati realizzati e sottoposti a severe prove sperimentali con eccitazioni tri-direzionali fino a rottura, fornendo ottimi risultati. Per MYRRHA è stato sviluppato un isolatore in gomma naturale con nuclei di piombo, realizzato in scala piena e testato fino allo spostamento di progetto.

Il progetto ELSY si è poi evoluto in ALFRED (*Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator*), destinato a divenire il dimostratore di questa tecnologia e la cui costruzione è prevista in Romania. Il sistema di isolamento sismico di ALFRED (simile a quello di ELSY) è stato progettato da ENEA nell'ambito del Work Package 8 (*Seismic Studies*) del progetto europeo ESNII Plus. Nello stesso WP8, sotto il coordinamento di ENEA, è in fase di progettazione anche il sistema di isolamento sismico del reattore ASTRID (*Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration*), per il quale



FIGURA 12 Isolatore in gomma ad alto smorzamento armato con piastre d'acciaio (Ø 1,3 m) realizzato dal partner FIP nell'ambito del Progetto SILER per l'isolamento sismico del reattore ELSY
Per gentile concessione di FIP-Industriale

è prevista la costruzione e la qualifica sperimentale di isolatori prototipici in neoprene (simili a quelli utilizzati per il JHR e per ITER). Per maggiori informazioni sull'isolamento di questi due reattori si rimanda al lavoro di Poggianti et al. (2015).

I succitati progetti SILER e ESNII Plus hanno dimostrato che l'isolamento sismico è in grado di fornire completa protezione sismica agli impianti nucleari, con ampi margini di sicurezza nei confronti di eventi impreveduti (*beyond design*). Inoltre, in SILER sono stati sviluppati non solo isolatori sismici di grosse dimensioni (Figura 12), adatti a sopportare elevati carichi verticali e grossi spostamenti orizzontali, ma anche gli elementi di interfaccia necessari per attraversare il gap che separa la parte isolata dal terreno o dagli edifici adiacenti (vedi paragrafo successivo).

Elementi di interfaccia

Abbiamo visto che l'isolamento sismico comporta la necessità di accettare significativi spostamenti orizzontali e prevedere un apposito spazio di separazione (gap) intorno alla parte isolata. Le reti impiantistiche che attraversano il gap dovranno essere dotate di appositi giunti di espansione in grado di assorbire gli spostamenti relativi fra le due parti in caso di sisma. Ovviamente cavi elettrici e piccole tubazioni (tipiche degli edifici civili) non creano particolari difficoltà. Diverso è il caso di grosse tubazioni contenenti liquidi infiammabili/tossici o ad elevata temperatura e pressione, tipici degli impianti industriali. Inoltre, anche lo stesso gap deve essere protetto non solo dagli agenti atmosferici, ma anche da possibili intrusioni e incidenti come allagamenti (anche alluvioni e tsunami) o incendi.

Giunti per tubazioni

Come discusso nel paragrafo dedicato agli impianti petrolchimici, in un impianto petrolchimico vengono in genere isolati singoli serbatoi; pertanto il problema più frequente è quello di dotare di giunti flessibili grosse tubature in ingresso/uscita, a volte anche a basse temperature e in pressione. Nell'ambito del già citato progetto INDEPTH sono stati sviluppati e testati su tavola vibrante con eccitazione tri-direzionale,

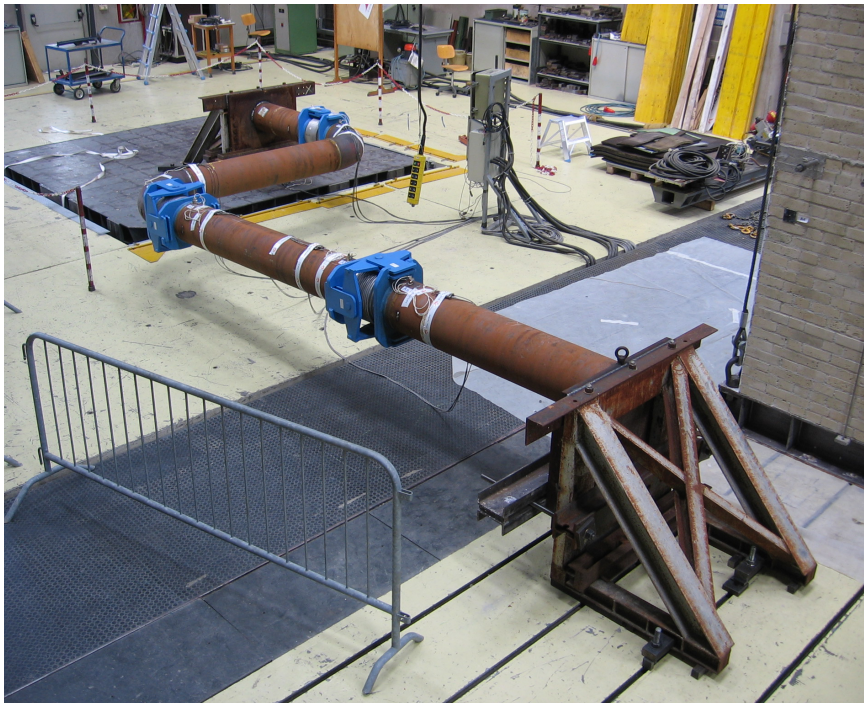


FIGURA 13 Giunti di espansione sviluppati nell'ambito del progetto INDEPTH dal partner BOA per assorbire spostamenti relativi fino a 80 cm in serbatoi isolati sismicamente in impianti petrolchimici



FIGURA 14 Giunti di espansione sviluppati nell'ambito del progetto SILER dal partner BOA e testati presso il laboratorio ELSA del JRC di Ispra. La corretta disposizione di 2 giunti permette di assorbire, nella tubazione che porta il vapore dal reattore ELSY alla turbina, spostamenti relativi orizzontali fino a 90 cm
Per gentile concessione di BOA e JRC Ispra

giunti prototipici installati su di un segmento di una grossa tubazione in scala piena (per liquidi a temperatura ambiente e non in pressione), in grado di compensare spostamenti fino a 80 cm (Figura 13).

Tale tecnologia è stata estesa, nell'ambito del già citato progetto SILER, ad una tubazione contenete vapore a 450 °C e alla pressione di 180 bar, rappresentante un segmento prototipico della linea che collega il reattore ELSY alle turbine, situate in un edificio non isolato adiacente. Le severissime specifiche di progetto richiedevano di accomodare lo spostamento in caso di terremoto estremo, tre volte superiore allo spostamento di progetto (90 cm).

Il giunto è stato testato presso il laboratorio ELSA del JRC di Ispra (Figura 14) in condizioni pseudodinamiche ed ha superato brillantemente il collaudo. La tubazione presa in esame nel progetto SILER costituisce ovviamente il caso più severo che si possa presentare in un reattore, quando l'isolamento è esteso a tutta l'isola nucleare.

La tubazione presa in esame nel progetto SILER costituisce ovviamente il caso più severo che si possa presentare in un reattore, quando l'isolamento è esteso a tutta l'isola nucleare.

Altri componenti

Gli isolatori sismici sviluppati nel progetto SILER sono stati testati fino al limite di rottura, prossimo ad una deformazione a taglio del 300%. Siccome lo spostamento assunto a progetto corrisponde ad una deformazione del 100%, questo comporta un margine di sicurezza di un fattore 3 in caso di evento inatteso. Si è ovviamente deciso di sfruttare tutto il margine di sicurezza a disposizione per lasciare l'edificio isolato libero di muoversi in caso di terremoto. Il gap antisismico viene pertanto ad avere una larghezza dell'ordine di grandezza di 1 m. In SILER è stato considerato il problema della protezione di un gap antisismico così ampio, che deve essere protetto da un sistema mobile in grado di compensare

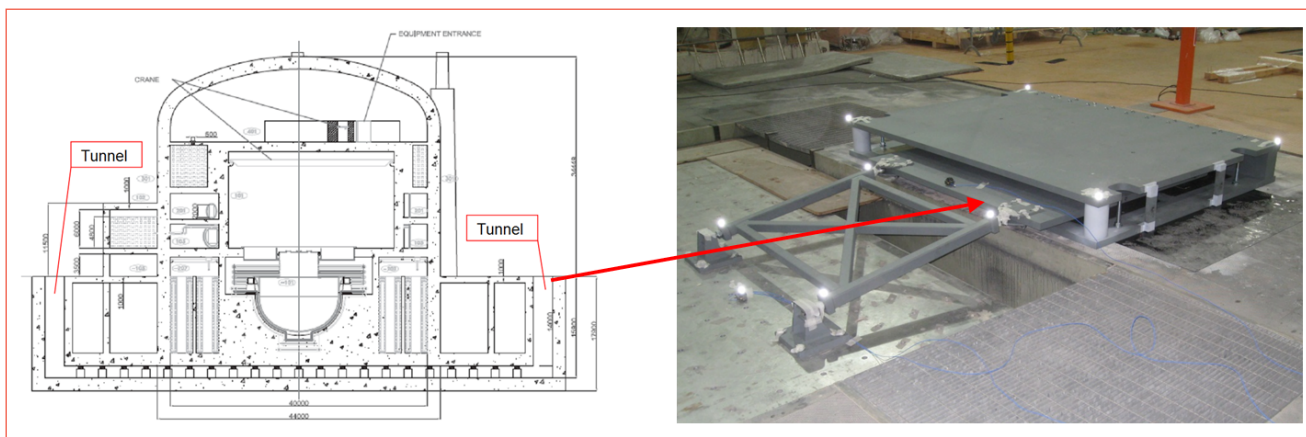


FIGURA 15 Copripiunto del gap sismico di ELSY, sviluppato dal partner MAURER e testato sulla tavola vibrante ENEA

spostamenti orizzontali bidimensionali di ± 90 cm fornendo contemporaneamente adeguata resistenza a urti e incidenti, e impermeabilità anche nei confronti di allagamenti (è stato considerato un'alluvione con 2 m di altezza del livello dell'acqua). Il copripiunto, sviluppato dal partner MAURER, è poi stato testato sulla tavola vibrante dell'ENEA (Figura 15).

Infine, in SILER è stata analizzata la possibilità di ammortizzare l'urto che si avrebbe fra l'edificio isolato ed il muro di contenimento del terreno in caso di eventi inattesi, molto al di sopra del limite di progetto. Si è dimostrato che tale compito può essere svolto da dispositivi simili ai *fender* utilizzati nei porti per evitare l'urto diretto fra la nave e la banchina. L'utilizzo di tali dispositivi, poco frequente anche in edifici civili, non è comunque mai stato preso in considerazione in impianti nucleari.

Costi

Impianti petrolchimici

Il problema dei costi di applicazione dell'isolamento sismico è particolarmente sentito negli impianti petrolchimici, dove la maggior parte dei serbatoi poggia direttamente sul terreno o comunque su fondazioni relativamente semplici, in quanto il carico è uniformemente distribuito su una grande superficie. La realizzazione di una doppia piastra fondazione di

grosso spessore e l'utilizzo di grandi isolatori sismici rende antieconomica l'applicazione di questa tecnologia a queste strutture, per la cui protezione sismica ci si affida all'irrobustimento convenzionale, accettando anche la perdita del componente in caso di terremoto. Ovviamente il rischio di fuoriuscite di liquidi pericolosi e di conseguenti incendi è alto. Come si è visto nel paragrafo agli impianti petrolchimici, fanno eccezione i più costosi serbatoi sferici e quelli per gas liquefatti (LNG), per i quali l'isolamento sismico risulta conveniente anche come protezione dell'investimento. Esistono oggi alcune decine di applicazioni, che rappresentano comunque una frazione bassissima del totale.

Centrali nucleari

Diverso è certamente il caso di una centrale nucleare, non solo per la possibilità di incidenti rilevanti potenzialmente più pericolosi, ma anche per l'elevato costo di realizzazione e la maggior compattezza rispetto all'impianto petrolchimico. In questo caso è infatti possibile proteggere l'intera isola nucleare (di estensione relativamente limitata) la cui massa è dello stesso ordine di grandezza dei serbatoi LNG (almeno per i reattori più piccoli), con un costo quasi trascurabile se paragonato a quello complessivo. È da notare che la maggior parte del costo aggiuntivo non è da attribuirsi agli isolatori sismici, ma alle opere civili necessarie al loro inserimento: doppia pia-



stra di fondazione e muro laterale per il contenimento del terreno, equivalenti a migliaia di metri cubi di cemento armato aggiuntivi.

Per le due centrali storiche di Cruas e Koeberg, il bilancio economico è stato certamente positivo perché, in assenza di isolamento, avrebbero dovuto essere interamente riprogettate tutte le strutture e tutti i componenti. Gli attuali reattori JHR e ITER costituiscono eccezioni perché, in quanto macchine sperimentali, hanno costi elevati (addirittura 'astronomici' nel caso di ITER) e non consentono di fare una valutazione realistica dell'incidenza del costo dell'isolamento sismico. Per il succitato reattore IRIS (Forni et al, 2009), caratterizzato da dimensioni ridotte (50 m di diametro), il costo è stato valutato in circa l'1% del complessivo. Tale valore è da considerarsi un ragionevole ordine di grandezza anche per impianti più grandi (anche se, al momento, non ci sono significativi dati disponibili per fare valutazioni complete).

Conclusioni

Le centrali nucleari sono state fra le primissime strutture oggetto di applicazione dell'isolamento sismico, non solo per l'efficace riduzione della componente orizzontale dell'accelerazione, ma grazie soprattutto alla possibilità di standardizzare il progetto e renderlo praticamente indipendente dalla sismicità del sito di costruzione. Tale possibilità costituisce un indiscusso vantaggio per impianti industriali complessi destinati ad essere realizzati in ogni parte del mondo e la cui progettazione richiede tempi lunghi e importanti investimenti.

L'isolamento sismico è una tecnologia senz'altro matura, ormai da anni, per applicazioni ad impianti a rischio di incidente rilevante, rallentata solo da considerazioni economiche, spesso incomplete e ingiustificate, e dall'assenza, per anni, di chiare normative. ●

Massimo Forni

ENEA, Laboratorio ingegneria sismica e prevenzione dei rischi naturali

abstract

Seismic isolation of plants at risk of a severe accident

More and more devastating earthquakes struck every year our planet. Many of these, though occurring in areas considered at high risk of earthquakes, far exceed the levels required by law. The industrial plants subjected to risk of severe accident, in particular petrochemical and nuclear power plants, are particularly exposed to this risk because of the number and the complexity of the structures and critical components of which they are composed. For this type of structures, anti-seismic techniques able to provide complete protection, even in case of unforeseen events, are needed. Seismic isolation is certainly the most promising technology of modern antiseismic as it allows not only to significantly reduce the dynamic load acting on the structures in case of seismic attack, but to provide safety margins against violent earthquakes, exceeding the assumed maximum design limit.

- Bergamo G., Castellano M. G., Gatti F., Marti J., Poggianti A., Summers P., (2007), "Seismic Protection at Petrochemical Facilities: Main Results from INDEPTH Project", *proc. of the 10th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibrations Control of Structures*, Istanbul, Turkey, May 28-31, 2007
- Forni M., Martelli A., Poggianti A., Spadoni B., Pugliese A., Sanò T., Addressi D., Ciampi V., Foraboschi F.P., (2001), "Development of Seismic Isolation and Energy Dissipation Systems for Large Storage Tanks of Liquefied Gas", *Fifth World Congress on Joint Bearings and Seismic Systems for Concrete Structures*, Rome, 7-11 October, 2001
- Forni M., Poggianti A., Bergamo G., (2006), "Shaking Table Tests On A Spherical Tank Mock-Up Provided With Seismic Isolation And Flexible Piping Connections", *Proceedings of PVP2006-ICPVT-11, 2006 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference*, July 23-27, 2006, Vancouver, BC, Canada
- Forni M., et al., (2009), "Seismic Isolation of the IRIS Nuclear Plant", *Proceedings of the 2009 ASME pressure Vessel and Piping Conference, PVP 2009*, July 26-30, 2009, Prague, Czech Republic
- Forni M., Poggianti A., (2011), "Seismic Isolation of Nuclear Power Plants", *The Thirteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*, Chania, Crete, Greece, 6-9 September
- Forni M., Poggianti A., Scipinotti R., Dusi A., Manzoni E., (2014), "Seismic isolation of lead-cooled reactors: The European project SILER", *Nuclear Engineering and Technology*, 46 (5), pp. 595-604
- Martelli A., Muzzarelli M., Forni M., Poggianti A., Spadoni B., (2002), "Valutazione dell'Applicabilità dell'Isolamento Sismico alla Protezione Sismica di Impianti Industriali (SI)", *Atti del Convegno VGR 2002 "Valutazione e Gestione del Rischio negli Insediamenti Civili ed Industriali"*, Seminario Annuale del GNDRCIE (Gruppo Nazionale per la Difesa dai Rischi Chimico, Industriali ed Ecologici), Pisa, Italy (October 2002)
- Martelli A., Clemente P., De Stefano A., Forni M., Salvatori A., (2014), "Recent Development and Application of Seismic Isolation and Energy Dissipation and Conditions for Their Correct Use", *15th European Conference on Earthquake Engineering (15ECEE)*, Istanbul, 24-29 August, 2014
- Poggianti A., Dusi A., Forni M., Manzoni E., Scipinotti R., (2015) "Seismic protection of two Advanced Fast Reactor Demonstrators: Alfred and ASTRID", *SECED 2015 Conference: Earthquake Risk and Engineering towards a Resilient World*, 9-10 July, Cambridge, UK