

SISTEMI INNOVATIVI PER LA PROTEZIONE SISMICA DI IMPIANTI A RISCHIO DI INCIDENTE RILEVANTE

V. CIAMPI*, M. CIUCCI**, G. GUIDI**

**Università di Roma, 'La Sapienza'*

*** ISPESL-DIPIA, Dip.to Insediamenti Produttivi ed Interazione con l'Ambiente*

SOMMARIO

Si fornisce un inquadramento dei sistemi innovativi per la protezione sismica delle strutture che sono stati messi a punto in anni recenti e hanno trovato applicazione soprattutto nelle costruzioni civili. Si discutono in particolare i sistemi di protezione di tipo passivo, e cioè l'isolamento sismico e la dissipazione passiva di energia, di cui sono ormai riconosciuti, insieme all'efficacia, la semplicità, l'affidabilità e il basso costo. Pur essendo le applicazioni ad impianti industriali e a loro componenti ancora abbastanza poco numerose, se confrontate a quelle in campo civile, non è difficile prevedere nel prossimo futuro un grande sviluppo di queste tecnologie proprio nel settore degli impianti industriali, in special modo per risolvere le problematiche degli impianti a rischio di incidente rilevante, sia nella progettazione dei nuovi impianti che nell'adeguamento degli impianti esistenti.

1. INTRODUZIONE

In anni recenti sono state messe a punto tecniche innovative per la protezione sismica delle strutture, con applicazioni soprattutto in campo civile, sia alle nuove costruzioni che per l'adeguamento di costruzioni esistenti: esse si basano sui concetti del controllo strutturale, nelle sue diverse forme. Particolarmente efficaci, per la loro semplicità, affidabilità e basso costo, appaiono le tecniche di controllo passivo, ed, in particolare, l'**isolamento alla base** e la **dissipazione passiva di energia**, che hanno trovato larga applicazione in molte aree ad elevato rischio sismico, specialmente in Giappone, in Nuova Zelanda e negli Stati Uniti. Le applicazioni ad impianti industriali e a loro componenti sono ancora abbastanza poco numerose, se confrontate a quelle in campo civile. Per quanto riguarda, in particolare, gli impianti a rischio di incidente rilevante, sono note applicazioni recenti dell'isolamento alla base per alcuni grandi serbatoi, contenenti sostanze quali ammoniaca e gas naturale liquefatto, in paesi extraeuropei, (Stati Uniti, Corea, ecc.). In Europa applicazioni sono state realizzate solo in Grecia (isolamento dei serbatoi di gas naturale liquefatto del terminale petrolchimico di Revythousa) ed in Svizzera (adeguamento mediante l'inserimento alla base di isolatori in gomma ad alto smorzamento HDRB, di serbatoi di ammoniaca a Visp); in quest'ultimo caso sono stati applicati isolatori sviluppati e prodotti dalla industria manifatturiera italiana.

In Italia sistemi di isolamento e dissipazione sono stati usati soprattutto, ed in gran numero, nella costruzione e nell'adeguamento sismico di ponti e viadotti; non mancano applicazioni, in numero molto più limitato, ad edifici civili, mentre sono quasi assenti le applicazioni agli impianti industriali. In particolare non esistono applicazioni ad impianti a rischio di incidente rilevante per l'ambiente, quali molti degli impianti chimici e petrolchimici. La criticità di questo tipo di impianti è, peraltro, dimostrata da eventi recenti, verificatisi in aree geograficamente vicine: basta citare, ad esempio, le gravi conseguenze ambientali che si sono manifestate in conseguenza dell'incendio del più grande impianto petrolchimico turco, la raffineria di Tupras a Korfez, causato dal terremoto che ha colpito Izmit, nell'agosto del 1999.

Il presente lavoro nasce dall'inizio di una collaborazione fra l'ISPESL e l'Università degli Studi di Roma 'La Sapienza', che ha lo scopo di approfondire lo studio dell'utilizzo dei sistemi di protezione sismica innovativi negli impianti industriali a rischio di incidente rilevante. L'ISPESL è interessata a queste tematiche per i suoi fini istituzionali di prevenzione e controllo, l'Università di Roma ha maturato negli ultimi anni una grande esperienza nello studio e nella proposta di sistemi di controllo passivo per la protezione sismica delle strutture.

Nel seguito del lavoro si fornisce un inquadramento delle tecnologie innovative che sono state proposte e/o effettivamente impiegate per la protezione sismica delle strutture e se ne discute l'estensione delle applicazioni al settore degli impianti industriali e dei loro componenti, con particolare riferimento agli impianti industriali a rischio di incidente rilevante.

A quest'ultimo proposito si premettono alcuni dati, significativi per comprendere la criticità del problema in Italia, che riguardano la attuale collocazione sul territorio nazionale di tali impianti, in aree riconosciute come sismicamente attive.

2. COLLOCAZIONE DELLE ATTIVITA' INDUSTRIALI A RISCHIO DI INCIDENTE RILEVANTE IN ZONE SISMICAMENTE ATTIVE DEL TERRITORIO ITALIANO

Le attività industriali a rischio di incidente rilevante presenti in Italia sono attualmente soggette al D. Lgs. 334/99 (Seveso II), che recepisce la Direttiva 96/82/CE relativa al controllo dei pericoli di incidenti rilevanti connessi con determinate sostanze pericolose. Se si confronta la localizzazione degli impianti per i quali esiste l'obbligo di notifica secondo il D.P.R.175/88 (Seveso I) con la classificazione sismica del territorio italiano, indicata in allegato alla Normativa Sismica vigente, si ricavano alcuni dati interessanti, [1], che fanno riflettere sulla rilevanza del problema.

La classificazione sismica sopra citata ha suddiviso il territorio nazionale in tre categorie in base al livello di sismicità:

- I categoria (S=12): aree ad elevata intensità sismica
- II categoria (S=9): aree a media intensità sismica
- III categoria (s=6): aree a bassa intensità sismica

Secondo tale classifica, 2960 comuni ricadono in aree a rischio sismico, pari al 36,6% del totale. Di questi 368 sono in I categoria, 2493 in II e 99 in III. In termini di superficie è classificato come sismico il 45,2% della superficie totale del territorio nazionale, di cui rispettivamente il 4,8% in I categoria, il 39,3% in II e l'1,1% in III. Per quanto riguarda il numero totale degli impianti industriali a rischio di incidente rilevante, soggetti pertanto all'art.4 (notifica) del D.P.R. 175/88, questo è di 320, 82 dei quali situati in zona sismica.

La Tabella 1 mette in evidenza il numero e la percentuale degli impianti nelle 3 categorie.

La Tabella 2 mostra invece la distribuzione degli impianti industriali nelle varie regioni italiane.

	I Categoria	II Categoria	III Categoria
Numero impianti	3	69	10
Percentuale	4%	84%	12%

Tabella 1.

Regione	N° impianti tot.	N° impianti in zona sismica	N° impianti in I cat.	N° impianti in II cat.	N° impianti in III cat.	% impianti in zona sismica
ABRUZZO	5	3	--	3	--	60%
BASILICATA	2	1	1	--	--	50%
CALABRIA	4	4	1	3	--	100%
CAMPANIA	11	11	--	1	10	100%
EMILIA-ROMAGNA	40	3	--	3	--	7,5%
FRIULI-VEN.GIULIA	7	2	1	1	--	28,6%
LAZIO	21	9	--	9	--	42,9%
LIGURIA	13	1	--	1	--	7,7%
LOMBARDIA	70	1	--	1	--	1,4%
MARCHE	7	7	--	7	--	100%
MOLISE	3	1	--	1	--	33,3%
PIEMONTE	27	1	--	1	--	3,7%
PUGLIA	18	2	--	2	--	11,1%
SARDEGNA	17	--	--	--	--	0%
SICILIA	22	21	--	21	--	95,5%
TOSCANA	18	13	--	13	--	72,2%
TRENTINO-ALTO ADIGE	2	--	--	--	--	0%
UMBRIA	5	1	--	1	--	20%
VAL D'AOSTA	--	--	--	--	--	--
VENETO	28	1	--	1	--	3,6%
ITALIA	320	82	3	69	10	25,6%

Tabella 2.

Si osserva che alcune regioni, in particolare nell'Italia centrale e meridionale, hanno una percentuale di impianti in zona sismica superiore al 50% (Abruzzo, Calabria, Campania, Marche, Sicilia, Toscana). La regione con il maggior numero di impianti in zona sismica è la Sicilia (21), seguita da Toscana (13), Campania (11) e Lazio (9). L'unica regione con impianti in III categoria è la Campania. La Lombardia, che è la regione con il maggior numero di impianti industriali a rischio di incidente rilevante, ne ha solo 1 in II categoria e pertanto presenta la più bassa percentuale di impianti in zona sismica.

3. INQUADRAMENTO CONCETTUALE DELLE TECNOLOGIE INNOVATIVE PER LA PROTEZIONE SISMICA DELLE STRUTTURE

Come già osservato le varie tecnologie innovative rientrano nel più vasto ambito del controllo strutturale, [2], che include sistemi passivi, attivi, ibridi e semi-attivi. Una raffigurazione efficace del quadro che ne deriva è fornita dallo schema seguente [fig.1]:

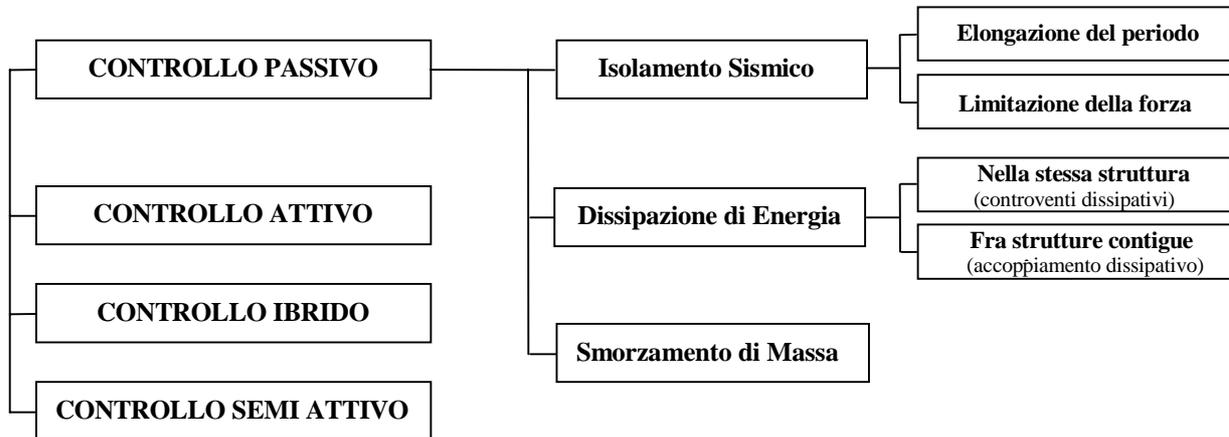


fig.1

Nei sistemi di *controllo passivo* speciali dispositivi, specificamente predisposti allo scopo e opportunamente collocati nella struttura, ne modificano le caratteristiche di rigidità e/o le capacità dissipative in senso favorevole ottenendone la riduzione della risposta dinamica alle azioni del sisma. I dispositivi agiscono passivamente, nel senso che non hanno bisogno di una sorgente esterna di energia per funzionare; essi esercitano sulla struttura forze di tipo reattivo che si sviluppano in risposta al moto della stessa.

Nei sistemi di *controllo attivo* una sorgente di energia esterna è invece elemento indispensabile. Essa viene usata per azionare un sistema di attuatori, i quali applicano alla struttura forze variabili nel tempo, allo scopo di contrastare le forze derivanti dalla azione esterna, per ottenerne riduzioni sostanziali della risposta dinamica; gli altri elementi indispensabili sono un sistema di sensori, distribuiti nella struttura in modo da misurarne, efficacemente e in tempo reale, dati significativi della risposta nella sua evoluzione temporale, ed un calcolatore che elabora questi dati e che, servendosi di sofisticati algoritmi, determina le forze di controllo e comanda gli attuatori che le applicano. Il sistema è complesso e richiede erogazioni notevoli di potenza durante l'azione di controllo.

Per *controllo ibrido* si intende di solito un sistema di controllo che usa in maniera combinata sistemi di controllo attivi e passivi.

Infine i sistemi di controllo *semi-attivo* sono sistemi basati sull'utilizzo di dispositivi analoghi a quelli del controllo passivo, con la differenza di presentare, però, caratteristiche meccaniche regolabili nel tempo. La regolazione, durante il fenomeno vibratorio, di queste caratteristiche costituisce l'operazione di controllo; il vantaggio rispetto al controllo attivo sta nel fatto che questa regolazione richiede solo modeste erogazioni di potenza, ordini di grandezza più basse di quelle che si usano nel controllo attivo. Restano necessari il sistema di sensori, per il monitoraggio della risposta, e il calcolatore, per l'elaborazione dei dati e la gestione dell'algoritmo di controllo che governa la regolazione nel tempo dei parametri dei dispositivi.

L'esperienza acquisita ha di fatto selezionato come praticabili, per applicazioni di protezione sismica, i soli sistemi passivi e semi-attivi. Lasciando da parte questi ultimi che, a fronte del vantaggio di richiedere piccole erogazioni di potenza, mantengono comunque una elevata complessità di gestione e manutenzione, si fa riferimento, nel seguito, ai soli sistemi di controllo passivo. Questi ultimi si possono classificare, a loro volta, in tre categorie: *Isolamento Sismico*, *Dissipazione di Energia*, *Smorzamento di Massa*.

Il funzionamento dei sistemi di controllo passivo si comprende bene se si tiene conto di alcuni semplici risultati della dinamica dell'oscillatore ad un grado di libertà soggetto a moto della base, (il sisma nel nostro

caso); questi risultati sono sinteticamente ed efficacemente espressi in termini di spettri di risposta di grandezze significative, ad esempio forze e spostamenti. Come è noto, l'oscillatore elastico ad un grado di libertà è il modello più semplice per descrivere il comportamento dinamico di una struttura. Suoi parametri caratteristici sono la massa, m , la rigidità, k , e il coefficiente di smorzamento viscoso, c . Quando l'oscillatore è soggetto ad un moto impresso alla base, descritto da una storia temporale di accelerazioni, o accelerogramma, la sua risposta dipende solo dal periodo proprio delle oscillazioni libere, T , ($T = 2\pi\sqrt{m/k}$), e dallo smorzamento, espresso come rapporto ad uno smorzamento critico, $\xi = cT/4\pi m$. Quest'ultimo parametro esprime, in maniera sintetica e cumulativa, un insieme di fenomeni a carattere dissipativo, di solito presenti in una struttura reale, che assicurano che, dopo che è cessata la causa, le vibrazioni si esauriscano, più o meno rapidamente a seconda dei valori più grandi o più piccoli del parametro. Poiché di solito interessano soltanto i valori massimi delle grandezze, piuttosto che l'intera storia temporale, la risposta ad un dato accelerogramma (terremoto) si considera ben caratterizzata da diagrammi, che vengono definiti spettri di risposta, in cui, in funzione del periodo proprio dell'oscillatore, T , che compare in ascissa, e per diversi valori dello smorzamento ξ , sono riportati in ordinata i valori massimi di grandezze significative della risposta, e cioè, ad esempio, accelerazioni assolute, (leggibili anche come forze di inerzia per unità di massa), e spostamenti.

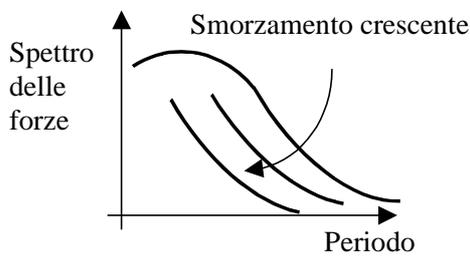


fig.2

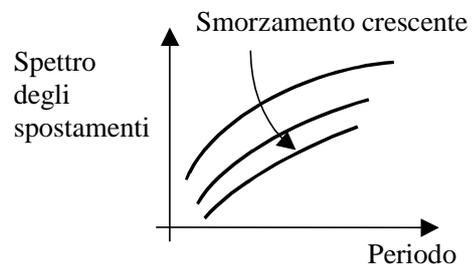


fig.3

L'esame congiunto dello spettro di risposta delle forze, (o accelerazioni), e di quello degli spostamenti, per un tipico terremoto, (un esempio qualitativo di tali spettri è riportato nelle figg.2 e 3), mostra che esiste una zona di periodi per i quali le forze sismiche sono massime, per poi decrescere significativamente al crescere del periodo, mentre gli spostamenti crescono sempre al crescere del periodo. La risposta, sia in termini di forze che di spostamenti massimi, si riduce invece sempre, per qualsiasi periodo, al crescere dello smorzamento ξ . Tenendo conto del fatto che il periodo proprio delle strutture reali cade di solito nella zona dello spettro cui corrispondono le massime forze, si comprende che i provvedimenti per ridurre la risposta strutturale possono consistere nello spostare il periodo verso i periodi alti, cui corrispondono forze basse, o nell'incrementare lo smorzamento, ovvero le capacità dissipative presenti nella struttura. Le strutture progettate in maniera tradizionale possono sopravvivere, senza collassare, ai terremoti violenti perché è previsto, e consentito, che esse cessino di comportarsi elasticamente e si danneggino più o meno gravemente. Il danneggiamento strutturale ha infatti il duplice effetto di rendere la struttura più flessibile, e quindi di aumentarne il periodo, e di provvedere meccanismi di dissipazione più efficaci, associati alla fessurazione e a rotture parziali di elementi strutturali e non strutturali.

Ciò premesso, i sistemi di **Isolamento Sismico** sono basati sulla possibilità di realizzare un certo livello di disaccoppiamento tra il moto della struttura e quello del terreno, per proteggere la struttura dagli effetti di danneggiamento del terremoto. A questo scopo viene creata, di solito alla base della struttura, cioè a livello della fondazione, (si parla allora più propriamente di Isolamento alla Base), o, talvolta, in altra posizione a diverso livello, una discontinuità che di fatto divide la struttura in due parti, che potremmo definire sottostruttura e sovrastruttura, tra le quali si inseriscono speciali dispositivi, che chiameremo **Isolatori**, capaci di trasmettere le forze verticali e caratterizzati da elevata flessibilità elastica per scorrimenti orizzontali. La presenza degli isolatori modifica favorevolmente la trasmissione delle vibrazioni tra sottostruttura e sovrastruttura, ottenendo l'effetto di ridurre le forze di inerzia sulla sovrastruttura. Ne derivano elevati spostamenti relativi nel dispositivo di isolamento che è necessario contenere entro limiti accettabili. Questo contenimento si può ottenere utilizzando una dissipazione aggiuntiva, che può essere presente nel dispositivo stesso di isolamento o può essere dato dall'aggiunta di un altro organo speciale, che chiameremo **Dissipatore**, e di cui sarà necessario parlare in seguito, a proposito dei sistemi di dissipazione di Energia.

I sistemi di isolamento sismico si possono ulteriormente classificare in due categorie principali: quelli che realizzano essenzialmente una *elongazione del periodo* per la struttura isolata e quelli basati sulla *limitazione della forza* trasmessa tra sottostruttura e sovrastruttura.

Nei sistemi che appartengono alla prima categoria gli isolatori sono organi a comportamento sostanzialmente elastico, molto flessibili in direzione orizzontale, e perciò capaci di spostare il periodo proprio della struttura verso zone dello spettro delle forze a valori notevolmente più bassi rispetto a quelli corrispondenti al periodo proprio della struttura non isolata. Un certo livello di smorzamento aggiuntivo è richiesto dalla necessità di limitare gli spostamenti relativi nell'isolatore; come già detto questo si può pensare incorporato nello stesso oggetto fisico dell'isolatore, o può essere demandato ad altro dispositivo speciale, posto in parallelo. Le figg. 4 e 5 forniscono l'evidenza grafica dei favorevoli effetti congiunti dello spostamento del periodo e dell'incremento della dissipazione.

Nei sistemi che appartengono alla seconda categoria la limitazione della forza trasmessa è affidata alla presenza nell'isolatore di un meccanismo di comportamento elasto-plastico o rigido plastico, con predeterminato valore limite della forza plastica che esso può fornire. Questo tipo di comportamento è di per se dissipativo; ne deriva un automatico effetto di contenimento degli spostamenti massimi; anche la progettazione dell'isolatore si potrà basare su concetti che chiamano in causa direttamente la dissipazione di Energia, rendendo meno determinante l'effetto di spostamento del periodo.

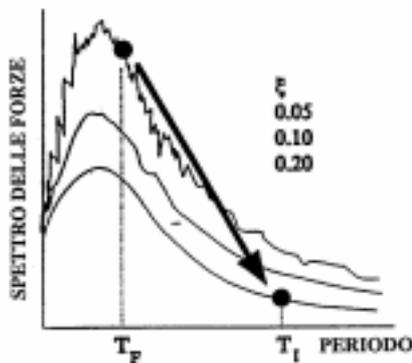


fig. 4

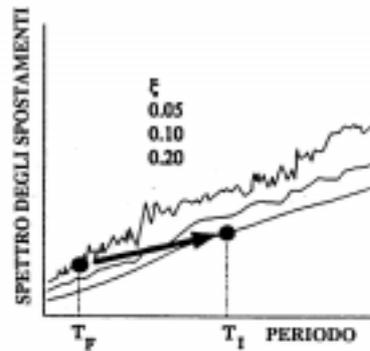


fig.5

I sistemi di controllo basati sulla *Dissipazione di Energia* utilizzano l'effetto favorevole di riduzione della risposta, sia in termini di forze che di spostamenti, indotto da un incremento artificiale delle capacità dissipative della struttura; tale incremento si ottiene mediante l'inserimento di speciali dispositivi che chiameremo *Dissipatori*, o Smorzatori. Questi dispositivi devono essere inseriti in opportune posizioni all'interno della struttura, dove sono attesi significativi spostamenti e velocità relativi, ed essere capaci di dissipare energia in modo stabile ed efficace, entrando in funzione, possibilmente, già per piccole ampiezze di vibrazione, ma comunque ben prima che gli elementi strutturali portanti abbandonino il campo del comportamento elastico e comincino a danneggiarsi per effetto del terremoto. In questo modo, tenendo separate le funzioni portanti, affidate agli elementi strutturali tradizionali, da quelle dissipative, affidate a dispositivi speciali, si può raggiungere il risultato di ridurre la risposta sismica, usando la dissipazione di energia, senza dovere accettare il danneggiamento della struttura.

Ai fini della classificazione è opportuno distinguere ulteriormente due casi, in base alla configurazione geometrica e alla posizione dei dissipatori:

- i dissipatori sono inseriti nell'ambito della *stessa struttura*, essendo collegati a punti di essa che durante il moto subiscono spostamenti e velocità relativi; il caso più tipico è quello dei cosiddetti controventi dissipativi, (fig.6), in cui i dissipatori sono inseriti in sistemi di controvento e dissipano energia nello spostamento relativo fra due piani successivi di una struttura intelaiata;
- i dissipatori sono inseriti fra *strutture contigue*, o parti strutturalmente indipendenti della stessa struttura, e dissipano energia nel moto relativo; questo presuppone che le due strutture/parti indipendenti abbiano caratteristiche dinamiche diverse, in modo da vibrare in maniera differenziata, (fig.7).

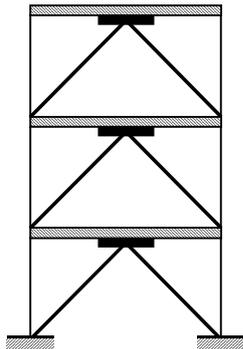


fig.6

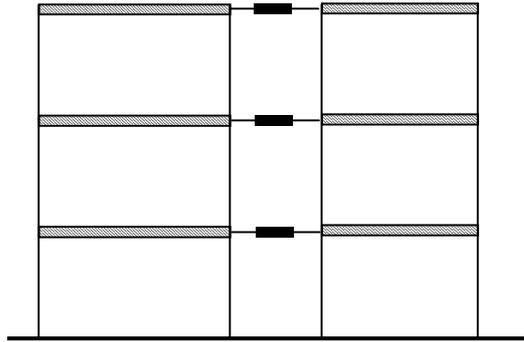


fig.7

Nei sistemi a **Smorzamento di Massa** il controllo della vibrazioni avviene per effetto della aggiunta di masse ausiliarie, opportunamente posizionate e collegate con speciali dispositivi alla struttura da proteggere. L'effetto di smorzamento del moto della struttura principale avviene come conseguenza del trasferimento di energia dalla struttura alla massa ausiliaria durante il moto. Il sistema è molto adatto a controllare vibrazioni indotte da azioni dinamiche aventi una sola frequenza dominante, e non così efficace in presenza di eccitazioni, quali i terremoti, che presentano un ampio spettro di componenti in frequenza. Lo smorzamento di massa è stato usato con successo soprattutto per il controllo delle vibrazioni indotte dal vento. In quel che segue non se ne parlerà ulteriormente.

4. SISTEMI DI ISOLAMENTO SISMICO E DI DISSIPAZIONE DELL'ENERGIA

I concetti alla base dei due sistemi di controllo passivo che si sono più affermati come tecniche di protezione sismica, l'isolamento sismico e la dissipazione aggiuntiva di energia, sono relativamente semplici e conosciuti da molto tempo. Sono note, ad esempio, proposte di sistemi di isolamento per proteggere gli edifici dal sisma, con relativo deposito di brevetti, che risalgono a più di un secolo fa. La nascita e lo sviluppo di applicazioni significative riguardano invece solo gli ultimi venticinque anni. Il motivo di ciò sta nella evoluzione tecnologica, che solo di recente ha consentito la messa a punto di **Isolatori** e **Dissipatori**, cioè degli elementi hardware essenziali di queste tecnologie, dotati dei giusti requisiti prestazionali e di comportamenti affidabili.

Gli **Isolatori** sono dispositivi di collegamento e appoggio che possono trasmettere elevate forze verticali e permettere grandi movimenti relativi, (dell'ordine di 20-40 cm), in almeno una o in entrambe le direzioni orizzontali, fornendo bassi livelli di forza di reazione orizzontale. Sono state proposte diverse tipologie di isolatori.

Gli isolatori elastomerici sono attualmente la tipologia più utilizzata; essi hanno forma parallelepipedica o cilindrica e sono realizzati in gomma naturale, o artificiale, rinforzata di solito con strati di lamine di acciaio per aumentarne la capacità portante e ridurre la deformabilità verticale. Essi sono caratterizzati da un comportamento pressoché elastico, con elevata flessibilità a taglio in direzione orizzontale. Per aumentarne le capacità dissipative si adoperano additivi nelle mescole in gomma, che possono portare lo smorzamento equivalente fino al 20% (isolatori elastomerici ad alto smorzamento, HDRB, High Damping Rubber Bearings), oppure si inserisce in un foro verticale cilindrico uno spinotto in piombo che, deformandosi insieme all'isolatore, si plasticizza e contribuisce in maniera rilevante alla dissipazione di energia (isolatori elastomerici con spinotto in piombo, LRB, Lead Rubber Bearings). (figg.8,9).

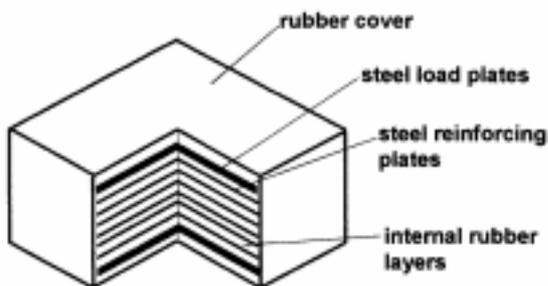


fig.8

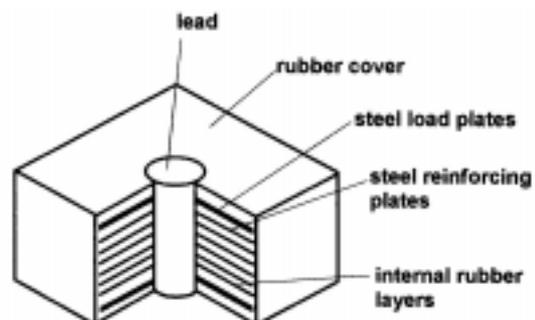


fig.9

Fra le altre tipologie vale la pena di citare anche gli isolatori realizzati dal contatto di due superfici che possono slittare l'una rispetto all'altra con basso coefficiente di attrito, (SB, sliding bearings), i materiali in contatto potendo essere, ad esempio, acciaio inossidabile e teflon, e le superfici di slittamento piane o curve e gli isolatori il cui funzionamento si basa sul rotolamento di cilindri o sfere (roller Bearings RB) interposte tra piastre a superficie interna piana o curva. Descrizioni dettagliate delle tipologie di isolatori proposti e utilizzati nelle applicazioni possono trovarsi in testi recenti dedicati all'isolamento sismico[3,4].

I **Dissipatori** sono dispositivi che hanno il compito di dissipare energia nel moto relativo di punti a cui sono collegati. La loro classificazione può esser fatta per tipologia di meccanismo di dissipazione su cui si basa il loro funzionamento. Una distinzione essenziale è quella fra dissipatori isteretici e dissipatori viscosi. I primi sono dispositivi il cui funzionamento dipende solo dagli spostamenti relativi, i secondi hanno un comportamento dipendente essenzialmente dalle velocità relative.

Tra i primi il gruppo più importante è quello dei dissipatori metallici, usualmente realizzati in acciaio a basso tasso di carbonio. L'energia viene dissipata per deformazioni plastiche associate a meccanismi di sollecitazione flessionali o torsionali di elementi strutturali di forma appropriatamente selezionata.

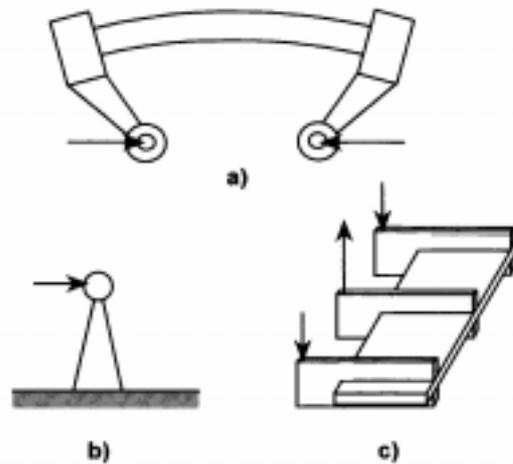


fig.10

La scelta della forma geometrica, in concomitanza con la scelta del tipo di sollecitazione, e quella del materiale dalle caratteristiche meccaniche più adatte, costituiscono la fase più delicata del progetto; lo scopo è di ottenere che le deformazioni plastiche si diffondano il più uniformemente possibile nell'intero volume dell'elemento, evitandone la localizzazione in zone ristrette; si assicura così un comportamento isteretico stabile sotto cicli ripetuti e si evita il collasso precoce per fatica oligociclica del dispositivo. Una vasta tipologia di dispositivi che realizzano questi requisiti è disponibile. Alcuni esempi di questi sono rappresentati in fig.10, che mostra, in particolare, due dispositivi flessionali a) e b), e uno torsionale, c).

Alla stessa classe dei dissipatori isteretici appartengono i dispositivi ad attrito. Essi utilizzano, per dissipare energia, l'attrito che si produce fra superfici accoppiate, in presenza di una forza normale di contatto. Il principio di funzionamento è molto semplice, la realizzazione molto economica e il ciclo dissipativo teorico altamente efficiente; permangono però perplessità non risolte legate alla incontrollabilità della stabilità nel tempo del coefficiente d'attrito fra superfici che possono restare a contatto per lunghissimi periodi senza scorrere reciprocamente.

I dispositivi viscosi utilizzano il comportamento viscoso di speciali solidi o fluidi per dissipare energia; questo comportamento è essenzialmente dipendente dalla velocità. Si possono citare, ad esempio, i dissipatori che utilizzano speciali solidi, polimeri o elastomeri ad alto smorzamento, il cui comportamento non è, però, puramente viscoso bensì visco-elastico, (fig.11), o quelli a fluido viscoso, costituiti da un pistone cilindrico che si muove in un fluido, (olio o fluido siliconico) (fig. 12)

Un elenco dettagliato e aggiornato della offerta tecnologica riguardante i Dissipatori si può trovare in [5,6].

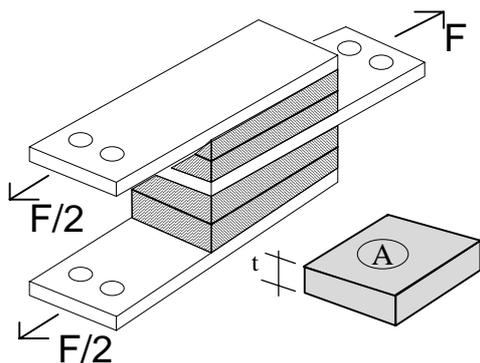


fig. 11

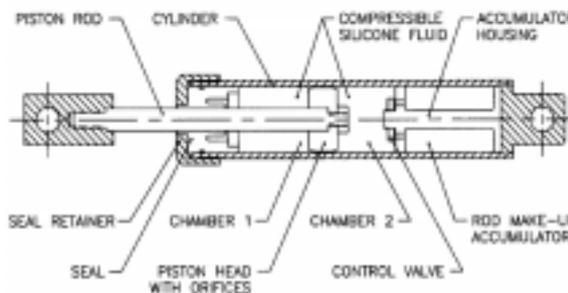


fig.12

La scelta dei sistemi di controllo passivo come strategia di protezione sismica per le strutture civili di nuova costruzione viene spesso motivata dalla necessità di fornire un alto livello di protezione a costruzioni strategicamente importanti (Ospedali, Caserme dei Vigili del Fuoco, Stazioni di Polizia etc.) o ad alto valori degli oggetti contenuti (Musei, Laboratori con macchinari ad alta tecnologia ed alto costo). Per la costruzione di nuovi edifici residenziali, non a carattere strategico, la filosofia più tradizionale di progettazione si ritiene in generale ancora valida, tenendo conto del fatto che i costi iniziali di costruzione con sistemi innovativi sono di solito più alti che per strutture convenzionali.

Diverso è il discorso che riguarda l'adeguamento. In questo secondo caso la realizzazione di un adeguamento strutturale che utilizza sistemi di controllo passivo può, in dipendenza delle circostanze, e specialmente quando le strutture esistenti sono molto deficienti rispetto al soddisfacimento delle verifiche sismiche, essere globalmente più conveniente di un adeguamento di tipo tradizionale, sia dal punto di vista del costo che dal punto di vista dei tempi di esecuzione dell'intervento e del disturbo che si arreca alle attività che si svolgono nella struttura da adeguare.

Nello scegliere il sistema di protezione passiva, per esempio fra l'isolamento e la dissipazione aggiuntiva di energia, bisogna tenere conto di tutta una serie di fattori che riguardano le peculiarità della struttura da proteggere; questo vale in particolare per i problemi di adeguamento per i quali la presenza di vincoli legati alla esistenza di una situazione di fatto può essere determinante nella scelta; di solito il problema dell'adeguamento si presenta come più difficile rispetto alla progettazione del nuovo.

La tipologia della costruzione e del sistema strutturale sono importanti in quanto l'isolamento è più adatto per strutture di non grande altezza e quindi non molto flessibili, mentre la dissipazione di energia funziona meglio per strutture più alte e più flessibili. Quando è molto importante la riduzione delle forze, in relazione ad esempio alla protezione degli oggetti contenuti l'isolamento sismico può essere la scelta migliore. L'applicazione efficace dell'isolamento sismico presuppone peraltro una buona conoscenza delle caratteristiche del sito della costruzione e del contenuto in frequenza del terremoto atteso. Quando sono attese componenti di grande ampiezza alle basse frequenze, (cioè per periodi elevati), come per esempio per suolo soffice, l'isolamento sismico, specie nella versione di elongazione del periodo, potrebbe essere addirittura controproducente (fig.13).

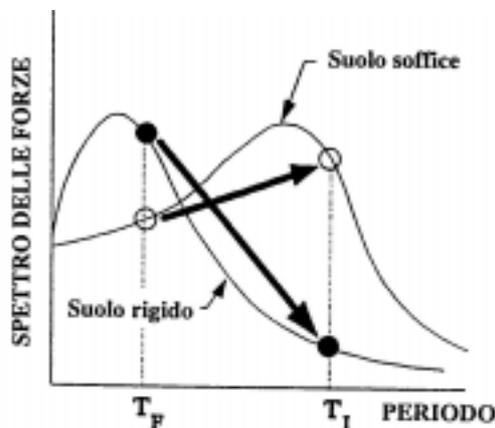


fig. 13

5. RICERCA E SVILUPPO IN ITALIA DI SISTEMI PASSIVI DI PROTEZIONE SISMICA

Le applicazioni dei sistemi passivi di protezione sismica si sono sviluppate in Italia, inizialmente, nel settore dei ponti. A tutt'oggi si contano in Italia alcune centinaia di ponti dotati di protezione passiva, per uno sviluppo in lunghezza di oltre 150 km, e già dal 1991 esistono delle Linee Guida pubblicate dalla Società Autostrade per il progetto preliminare di questo tipo di interventi. La maggior parte delle applicazioni esistenti si può classificare come isolamento sismico, nella versione con limitazione della forza trasmessa. I dispositivi sono, in gran maggioranza, a comportamento elastoplastico, basati sulla deformazione flessionale di elementi in acciaio di varie forme. Essi sono incorporati nel sistema di appoggio dell'impalcato su pile e spalle; il valore limitato, e predefinito, della forza plastica che si trasmette fra sovrastruttura, (impalcato), e sottostruttura, permette il controllo delle sollecitazioni massime al piede di pile e spalle, ed in fondazione.

Solo a partire dalla fine degli anni 80 hanno cominciato a svilupparsi anche applicazioni per tipologie diverse, in particolare nel settore degli edifici civili, con attenzione speciale a quelli a carattere strategico, (Caserme, Ospedali, ecc.), e a quelli ricadenti nel settore di interesse dei Beni Culturali. Le realizzazioni ad oggi esistenti in Italia in questo settore sono certamente rilevanti, anche se non tanto numerose, (solo alcune decine); questo si ritiene sia dovuto soprattutto all'effetto frenante della mancanza di normativa italiana ufficiale.

Si è sviluppato, in contemporanea, nell'ultimo decennio, intorno a queste tematiche, un grande interesse culturale ed è stato fatto un notevole sforzo di ricerca, teorica e sperimentale, cui hanno partecipato Università, altri Enti di ricerca, (quali ENEA, ENEL, ISMES), Enti Pubblici di controllo, Aziende produttrici di dispositivi, ecc.. Nel 1990 si è costituito come gruppo spontaneo, per iniziativa dei sopradetti vari soggetti interessati, il GLIS, Gruppo di Lavoro Isolamento Sismico, successivamente confluito nella Associazione Nazionale Italiana di Ingegneria Sismica, (ANIDIS). Il GLIS si propone lo scopo di favorire lo sviluppo coordinato degli studi teorici e sperimentali nel campo delle nuove tecnologie di protezione sismica, coordinare le attività di sviluppo della Normativa specifica e promuoverne l'aggiornamento, svolgere opera di divulgazione; esso ha promosso e organizzato, in particolare, in cooperazione con l'IAEA, International Atomic Energy Agency, una serie di Seminari Internazionali, a carattere specialistico, a cadenza biennale, a partire dal 1993, sulle tematiche del controllo delle vibrazioni sismiche, i cui Atti, cui appartengono, ad esempio, i lavori [9,13], costituiscono un riferimento bibliografico essenziale. L'attività di ricerca italiana più recente ha utilizzato finanziamenti sia nell'ambito di alcuni progetti MURST di interesse Nazionale che nell'ambito di progetti Europei. E' arrivata anche a conclusione una prima fase di sviluppo di Normativa specifica, predisposta da un gruppo di lavoro coordinato dal Servizio Sismico Nazionale, che ha portato alla pubblicazione di Linee Guida, [7]; pur non avendo ancora forza di Normativa ufficiale, esse sono state pubblicate con l'autorizzazione del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici e forniscono, finalmente, un importante riferimento per i progettisti.

Nell'ambito del notevole fermento di attività di ricerca e sviluppo, che si è avuto in Italia, in quest'ultimo decennio, il gruppo di ricerca dell'Università di Roma 'La Sapienza', coordinato dal primo autore di questo lavoro, ha avuto un ruolo importante, di cui si vuol fare menzione più dettagliata.

Le attività di ricerca del gruppo si sono sviluppate secondo le seguenti direzioni principali:

- la proposta e la sperimentazione in laboratorio di alcune tipologie di dissipatori, da applicarsi a varie situazioni strutturali, (ponti, edifici a telaio, edifici a piani sospesi, strutture contigue), ed, in particolare, come parte di sistemi speciali di controvento;

- la formulazione e la messa a punta di metodologie semplificate per la progettazione dei sistemi dissipativi, basate su concetti di bilancio energetico.

I principali risultati ottenuti sono sintetizzati in quel che segue.

Sul versante della sperimentazione fisica sono stati proposti alcuni nuovi tipi di dissipatori basati sulla flessione elastoplastica dell'acciaio, adatti in particolare ad essere inseriti in sistemi di controvento, e se ne è verificata l'efficacia. Un primo esempio è il dispositivo di fig.14; esso è stato ideato per essere inserito in strutture a maglia rettangolare, ai cui nodi è connesso per mezzo di elementi di controvento che restano perennemente in trazione, grazie all'effetto di richiamo elastico che il dissipatore, deformandosi, esercita sugli stessi, (fig.15). Il dissipatore di forma rettangolare, in similitudine geometrica con la maglia in cui è inserito, è ritagliato da una lastra piana di acciaio, e presenta una geometria ad altezza variabile, che è funzionale ad assicurare che la plasticizzazione si distribuisca uniformemente in tutte le sezioni, tenendo conto della variazione lineare antisimmetrica del momento flettente che si verifica in ciascuno dei suoi lati, nel corso della deformazione, [8]. Questo tipo di dissipatore è stato recentemente usato in un intervento di adeguamento sismico di un edificio monumentale, la Basilica di S.Maria di Collemaggio a L'Aquila, come parte di un sistema aggiunto di controventi, disposto in orizzontale a livello della copertura.

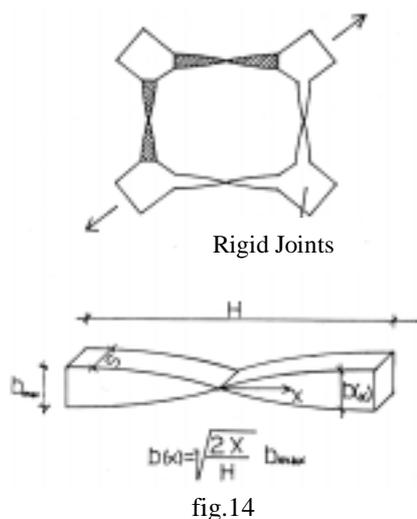


fig.14

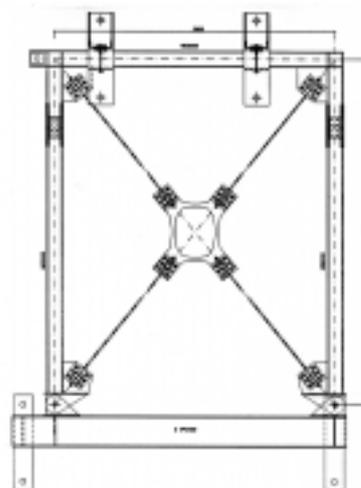


fig.15

Altri due esempi sono presentati in fig.16. Come nel caso precedente, i dissipatori sono ricavati dal taglio di una lastra di acciaio e si deformano per flessione elasto-plastica nel piano della lastra. La fig.17 mostra come essi si connettono, in un telaio a maglia rettangolare, agli elementi di controvento; in questo caso questi ultimi sperimentano sia la trazione che la compressione e devono perciò essere progettati in conseguenza.

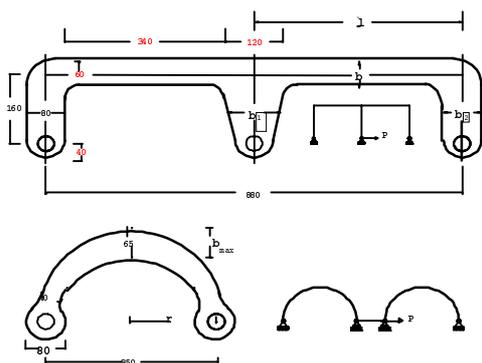


fig.16

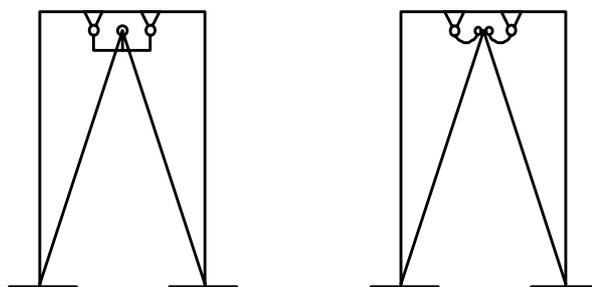


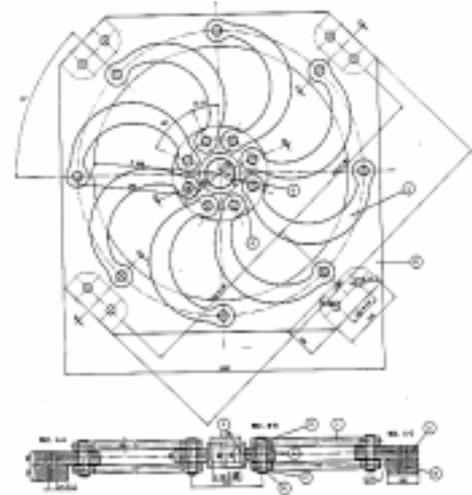
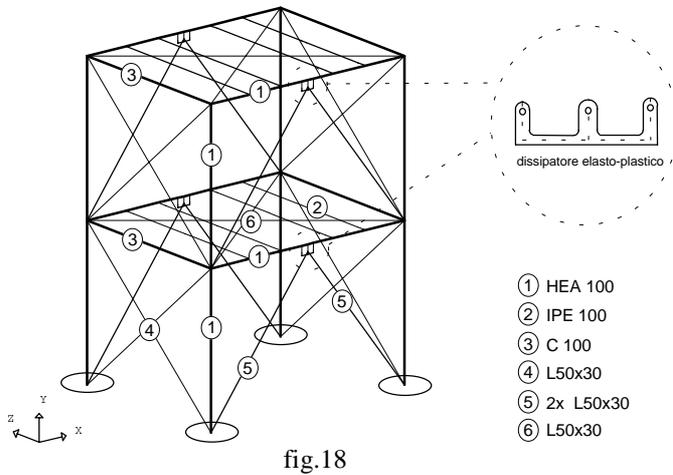
fig.17

I dispositivi sono stati utilizzati per prove dinamiche su tavola vibrante di un telaio in grande scala, a 2 piani, fig.18, [9]; e hanno trovato anche applicazioni nella protezione sismica dei ponti, [10]. Per quest'ultimo caso la disposizione di fig.19 permette di realizzare, ad esempio, un isolatore-dissipatore multidirezionale. Lo schema è stato usato in un lungo viadotto in Turchia, il quale era in corso di realizzazione da parte di un'impresa italiana quando si è verificato, con epicentro nelle immediate vicinanze, il terremoto dell'agosto 99; le campate già protette sono sopravvissute a quel terribile evento, di intensità ben maggiore di quella messa a base del progetto.

Altri interessanti risultati sono stati ottenuti, sempre a riguardo dei dissipatori a flessione elasto-plastica, investigando, attraverso la sperimentazione fisica, l'effetto di storie generiche di deformazione imposta sulla fatica oligociclica: si è pervenuti alla formulazione e validazione di un nuovo funzionale di danneggiamento per i dispositivi stessi, [11].

Sul fronte della messa a punto di metodologie di progettazione e verifica sismica per strutture che utilizzano sistemi dissipativi sono stati ottenuti buoni risultati nella comprensione generale del problema e nella definizione di metodi semplici di progetto, [12,13,14], sia per il caso dell'adeguamento a norma di costruzioni esistenti, (intesa come riconduzione a livelli di danno strutturale accettabile sotto terremoti violenti), sia nel caso in cui si desideri fornire una speciale protezione sismica a costruzioni di tipo strategico, nuove o preesistenti; l'effettuazione di una vasta indagine parametrica, di tipo numerico, su strutture a più gradi di libertà relativamente complesse, ha consentito di approfondire una serie di problemi legati all'effetto della distribuzione in elevazione ed in pianta dei dissipatori, soprattutto ai fini di una validazione piena delle metodologie semplificate di

progettazione e di verifica individuate; oltre alle applicazioni agli edifici si sono studiati infine anche aspetti del progetto di sistemi di dissipazione per strutture da ponte, [15].



6. POTENZIALITA' DI UTILIZZO DELLE NUOVE TECNOLOGIE DI PROTEZIONE SISMICA PER IMPIANTI INDUSTRIALI A RISCHIO DI INCIDENTE RILEVANTE

La filosofia del progetto in zona sismica, e delle conseguenti verifiche, per le strutture degli impianti industriali a rischio di incidente rilevante, dovrebbe essere molto diversa da quelle delle costruzioni residenziali, per le quali sono state pensate le Normative sismiche vigenti. Per queste ultime è riconosciuta tradizionalmente valida una filosofia basata su due livelli di azione sismica:

- la costruzione deve superare senza danni strutturali rilevanti un terremoto moderato (periodo di ritorno 50-100 anni);
- la costruzione, pur potendo subire danni strutturali rilevanti, non deve arrivare al collasso per terremoto violento (periodo di ritorno 500-1000 anni)

Nel rispetto di questa filosofia ha ancora senso per le costruzioni residenziali una progettazione basata sul concetto di duttilità strutturale, con la possibilità che ne consegue di effettuare verifiche di resistenza convenzionali sotto un solo livello di azioni.

Per gli impianti industriali la filosofia di progetto non può essere più direttamente legata a soli concetti di danneggiamento e di collasso strutturale ma deve mettere in conto il soddisfacimento di requisiti prestazionali più sofisticati, che potrebbero, ad esempio, esprimersi nel modo seguente:

- l'impianto deve rimanere pienamente funzionale a seguito di un terremoto moderato;
- l'impianto, pur potendo subire una sospensione della sua funzionalità, non deve dare luogo ad incidente rilevante, a seguito di un terremoto violento.

L'applicazione delle nuove tecnologie, di cui si è qui discusso, appare perciò particolarmente appropriata per gli impianti industriali, perché, come già per gli edifici a carattere strategico e per i monumenti, consente di gestire, con maggiore efficacia e consapevolezza, obiettivi di protezione speciali, non così immediatamente legati ai soli concetti di resistenza e collasso strutturali.

Altre specificità degli impianti industriali rendono particolarmente vantaggiosa l'utilizzazione delle nuove tecnologie.

Gli impianti industriali, pur presentando, infatti, una maggiore varietà di tipologie strutturali e di elementi costituenti, rispetto alle costruzioni civili, sono caratterizzati, di solito, da una più elevata standardizzazione dei singoli componenti. Questo fatto consente di utilizzare su larga scala i risultati di eventuali studi di ottimizzazione, nell'applicazione delle nuove tecnologie di protezione, svolti per tipologia di componente. Inoltre, per loro stessa natura, le tecnologie innovative sono in grado di ridurre fortemente la vulnerabilità sismica, senza introdurre complicazioni impiantistiche, e agevolando, allo stesso tempo, la standardizzazione.

Soprattutto negli interventi di adeguamento, la maggiore flessibilità configurazionale e libertà da vincoli funzionali e architettonici che le strutture degli impianti industriali hanno nei confronti di quelle delle costruzioni civili, consente un più facile inserimento dei sistemi e dei dispositivi di controllo.

Le considerazioni svolte dovrebbero far prevedere un grande sviluppo per le applicazioni delle nuove tecnologie alla protezione sismica degli impianti industriali. Le specificità richiamate, che sicuramente favoriscono un tale sviluppo, rendono però anche necessaria l'effettuazione di studi specifici, indirizzati a componenti tipici, prima che queste applicazioni possano diffondersi. L'esperienza proveniente dalle applicazioni alle costruzioni civili non è infatti immediatamente trasferibile, né può essere sufficiente per affrontare, in assenza di ulteriori specifiche indagini, situazioni e problematiche in gran parte inedite.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Bellagamba, S., Ciucci, M., Guidi, G., Iorio, R., Rinaldini, A., "Localizzazione delle attività industriali ad elevata pericolosità soggette al D.Lgs. 334/99", Rapporto tecnico ISPESL-DIPIA, 2000.
- [2] Housner G.W., et al, 1997, 'Structural control: past, present, and future' American Society of Civil Engineers, J.Eng. Mech., Vol 123, No 9, Special Issue, pp 897-971.
- [3] Skinner, R.I., Robinson, W.H., and McVerry, G.H., 1993, 'An introduction to seismic isolation', John Wiley 354pp.
- [4] Naeim, F. and Kelly, J.M., 1999, 'Design of seismic isolated structures', John Wiley, 289pp.
- [5] Soong, T.T. and Dargush, G.F., 1997, 'Passive energy dissipation system in structural engineering', John Wiley.
- [6] Constantinou, M.C., Soong, T.T. and Dargush, G.F., 1998, 'Passive energy dissipation systems for structural design and retrofit', Monograph, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, University at Buffalo, New York, 299pp.
- [7] Linee guida per la progettazione, esecuzione e collaudo di strutture isolate dal sisma, Presidenza del Consiglio Superiore dei LL.PP. - Servizio Tecnico Centrale, dicembre 1998.
- [8] Ciampi, V, Samuelli Ferretti, A, "Energy dissipation in buildings using special bracing systems", Proc. 9th Europ. Conf. on Erthq. Eng., Mosca 1990, Vol.3, pp. 9-18.
- [9] Ciampi, V, Paolacci, F, Perno, S, Decanio, G, Spadoni, S, 1997. "Earthquake simulator testing of an energy dissipation system for seismic control of buildings". International Post-SMiRT Conference Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibrations of Structures Taormina , Italy, August 25-27
- [10] Ciampi, V, Marioni, A, "New Types of Energy Dissipating Devices for Seismic Protection of Bridges", Proc. III World Congr. on Joint Sealing and Bearing Systems for Concrete Structures, Toronto, Oct. 1991, Vol.2, pp. 1225-1246.
- [11] Ciampi, V., Arcangeli, M., Perno, S., "Characterization of the Low-cycle Fatigue Life of a Class of Energy Dissipating Devices", Proc. of the 2nd Europ. Conf. On Struct. Dynamics, EURODYN 93, Trondheim, Norway, Vol. 1, pp. 137-144, 1993.
- [12] Ciampi, V., De Angelis, M., Paolacci, F., 1995. "Design of yielding or friction based dissipative bracings for seismic protection of buildings" Engineering Structures, Vol.17 n°5, 381-391
- [13] Ciampi, V., 1995. "Research and development of passive energy dissipation techniques for civil buildings in Italy". International Post-SMiRT Conference Seminar on Isolation, Energy Dissipation and Control of Vibrations of Structures Santiago, Chile August, 21 to 23.
- [14] Ciampi, V., De Angelis, M., 1996. "Optimal design of passive control systems based on energy dissipation for earthquake protection of structures". Proc. of the Third Conf. of the Europ. Assoc. for Struct. Dyn. Florence, June 5-8, Structural Dynamics - EURODYN '96, Augusti et al. (eds), 1996 Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410813 4, Vol. 1, pp. 525-532.
- [15] Ciampi, V., "A methodology for the design of energy dissipation devices for the seismic protection of bridges", Workshop on Seismic Protective Systems for Bridges., Technical Report MCEER-98-0015, pp. 89-104, 1998.