

PROTEZIONE SISMICA DI IMPIANTI A RISCHIO DI INCIDENTE RILEVANTE MEDIANTE SMORZATORI VISCOELASTICI

Mariano Ciucci¹, Sergio Bellagamba¹, Alessio Rinaldini¹, Fabrizio Paolacci², Andrea Arcangeletti³

¹ *ISPESL-DIPIA, Dipartimento Insediamenti Produttivi ed Interazione con l'Ambiente
Via Urbana, 167 - 00184 Roma tel.064714282 - e-mail:marianociucci@infinito.it*

² *Università di Roma Tre*

³ *Api Raffineria di Ancona*

SOMMARIO

Si fornisce un inquadramento dei sistemi innovativi per la protezione sismica delle strutture con particolare riferimento a sistemi di protezione basati sulla dissipazione passiva di energia, di cui sono ormai riconosciuti, insieme all'efficacia, la semplicità, l'affidabilità e il basso costo. L'attenzione viene posta sul comportamento di controventi dotati di smorzatori viscoelastici per la protezione sismica di strutture intelaiate, per i quali si propone una metodologia di progetto basata su considerazioni di carattere energetico. In particolare, analizzando la risposta sismica di un modello ad un grado di libertà, riproducente il comportamento di un telaio dotato di controventi dissipativi viscoelastici, questi ultimi modellati con un elemento di Maxwell, vengono costruiti spettri utili al progetto del sistema di controllo. Tale metodologia progettuale viene successivamente estesa a sistemi a molti gradi di libertà utilizzando un approccio di natura locale. Sono infine riportate delle considerazioni sulla potenzialità di utilizzo delle nuove tecnologie di protezione sismica, ed in particolare dei dissipatori viscoelastici, per impianti industriali a rischio di incidente rilevante

1. INTRODUZIONE

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, 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.

I sistemi innovativi per la protezione sismica a cui appartengono anche gli smorzatori viscoelastici, nella loro veste di sistemi dedicati a ridurre il danneggiamento delle strutture a seguito di un sisma, meritano un capitolo a parte nell'ambito della prevenzione degli eventi incidentali nelle imprese a rischio di incidente rilevante [1]. Benché gli impianti attualmente in esercizio dovrebbero ormai aver completato il processo di adeguamento al regolamento sismico evolutosi negli ultimi anni, e allo stato attuale soddisfino le esigenze di sicurezza richieste dalla normativa vigente, si avverte oggi la necessità di sperimentare nuovi approcci migliorativi nella protezione delle strutture produttive.

Il presente lavoro dopo aver fornito un inquadramento delle tecnologie innovative che sono state effettivamente impiegate per la protezione sismica delle strutture e aver discusso l'estensione delle applicazioni al settore degli impianti industriali e dei loro componenti, con particolare riferimento agli impianti industriali a rischio di incidente rilevante, analizza, nell'ambito dei meccanismi di dissipazione passiva, il comportamento dei dissipatori viscoelastici. Lo studio di tali dissipatori è favorito da un approccio progettuale alternativo, rappresentato dall'approccio energetico, il quale privilegia l'aspetto dissipativo e identifica la performance strutturale richiesta non più con la duttilità cinematica (propria di una progettazione tradizionale) ma con l'energia dissipata durante l'evento sismico, o con grandezze da essa derivate.

L'approccio energetico alla progettazione prevede dunque la valutazione della capacità dissipativa effettivamente disponibile nella struttura. Agendo sui termini dissipativi è possibile modificare i termini del bilancio energetico a favore della sicurezza strutturale, in particolare questa azione può essere ottenuta utilizzando dissipatori viscoelastici.

Il comportamento dei materiali viscosi è stato indagato con l'ausilio di semplici sistemi meccanici, ponendo particolarmente attenzione all'aspetto energetico del problema. Sulla base di precedenti indagini è stata poi proposta una metodologia di progetto di smorzatori viscoelastici basati su un indice energetico [2,3]. In

particolare è stato utilizzato un modello ad un grado di libertà riprodotto il comportamento di un telaio viscoelasticamente protetto, modellando il dissipatore con l'ausilio del semplice elemento di Maxwell. L'analisi della risposta ad accelerogrammi generati artificialmente ha permesso la costruzione di spettri di progetto con i quali è stato possibile effettuare una preliminare valutazione delle caratteristiche degli smorzatori. Si è quindi estesa tale metodologia di progetto a sistemi a molti gradi di libertà utilizzando un metodo di tipo locale.

E' stata infine valutata la potenzialità di utilizzo dei dissipatori per la protezione sismica dei principali elementi di impianti industriali a rischio di incidente rilevante.

A quest'ultimo proposito si premettono alcuni dati, significativi per comprendere la criticità del problema in Italia [4], 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 con la classificazione sismica del territorio italiano, indicata in allegato alla Normativa Sismica vigente, si ricavano alcuni dati interessanti, 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. Gli impianti industriali a rischio di incidente rilevante, soggetti pertanto all'art. 6 (notifica) del D. Lgs. 334/99, sono 1122, 322 dei quali situati in zona sismica.

Nell'ambito della citata normativa il gestore è tenuto ad adottare una politica di prevenzione degli incidenti rilevanti (art. 7) al fine di garantire un elevato livello di protezione dell'uomo e dell'ambiente, e per gli stabilimenti in cui sono presenti sostanze pericolose in quantità uguali o superiori a quelle indicate nell'allegato I, parti 1 e 2, colonna 3 è inoltre tenuto a redigere un rapporto di sicurezza (art. 8).

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

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

Si osserva che alcune regioni, in particolare nell'Italia centrale e meridionale, hanno una percentuale di impianti in zona sismica superiore al 50% (Basilicata, Calabria, Campania, Lazio, Marche, Sicilia, Toscana, Umbria). Le regioni con il maggior numero di impianti in zona sismica sono la Campania (67), la Sicilia (65), seguite da Toscana (39) e Lazio (37). Le uniche regioni con impianti in III categoria sono la Campania e la Puglia. La Lombardia, che è la regione con il maggior numero di impianti industriali a rischio di incidente rilevante, ne ha solo 2 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 DI TIPO PASSIVO

Come già osservato le varie tecnologie innovative rientrano nel più vasto ambito del controllo strutturale [5], che include sistemi passivi, attivi, ibridi e semi-attivi. Una raffigurazione efficace dei sistemi passivi 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.

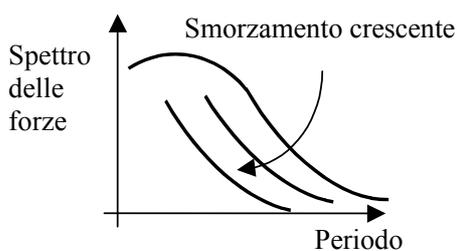


fig.2

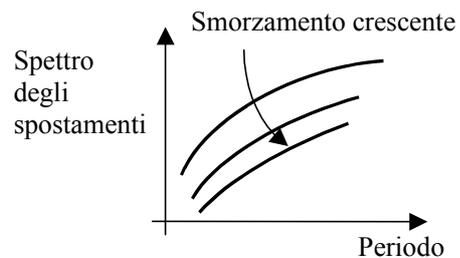


fig.3

Tra le tecniche ormai riconosciute come affidabili e praticabili ci sono l'**Isolamento alla base**, e i sistemi di controllo basati sulla **Dissipazione di Energia**. La prima tecnica agisce sulla struttura aumentandone il periodo proprio con conseguente riduzione delle forze (fig.2) ma con un aumento degli spostamenti. I dissipatori di Energia, la cui tecnica viene approfondita in questo lavoro, utilizzano invece l'effetto favorevole di riduzione della risposta, sia in termini di forze che di spostamenti (figg. 2 e 3), indotto da un incremento artificiale delle capacità dissipative della struttura [6,7]. Tale incremento si ottiene mediante l'inserimento di speciali dispositivi che chiameremo **Dissipatori**. Questi dispositivi inseriti in opportune posizioni all'interno della struttura, dove cioè sono attesi significativi spostamenti e velocità relativi, sono 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 escano dal campo elastico e comincino a danneggiarsi per effetto del terremoto. In definitiva, con l'ausilio di dispositivi speciali che incrementano artificialmente le capacità dissipative, si riduce la risposta sismica della struttura limitandone o al limite annullandone il danno nei suoi elementi portanti.

Ai fini della classificazione è opportuno distinguere 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.4a), 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.4b).

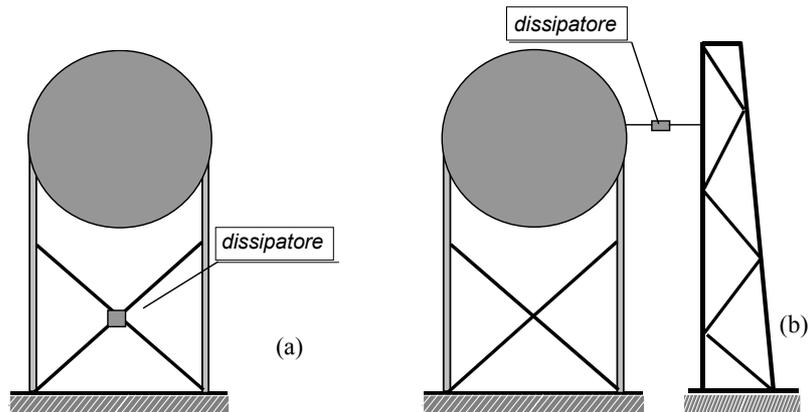


fig.4

4. SISTEMI DI DISSIPAZIONE DELL'ENERGIA: DISSIPATORI VISCOELASTICI

Con il termine viscosità si intende il comportamento di alcuni materiali che si manifesta tipicamente nella dipendenza delle tensioni dalla velocità di deformazione. Alcuni materiali presentano tutto uno spettro di caratteristiche meccaniche ai cui estremi sono collocate quelle puramente viscoso e quelle elastiche. I materiali così detti *viscoelastici* esibiscono entrambe queste caratteristiche.

Per fare degli esempi, i polimeri solidi, come ad esempio il nylon, il polistirene ed altri manifestano un comportamento tipicamente elastico con la presenza di leggere caratteristiche di viscosità. Altri materiali, come soluzioni di polimeri in fluidi viscosi presentano, al contrario, caratteristiche prettamente viscoso. I polimeri acrilici possono essere invece collocati in una posizione centrale dello spettro. Questi ultimi sono stati utilmente impiegati per la realizzazione di dispositivi ad elevata capacità dissipativa per la protezione sismica delle strutture [8].

La tipica configurazione geometrica di un dissipatore viscoelastico (VED) è rappresentata da una serie di strati alternati di materiale viscoelastico e piatti di acciaio (fig.5). Questa configurazione consente ad esempio l'inserimento del dissipatore in un controvento monodiagonale per la realizzazione di sistemi di controventamento dissipativo (fig.6).

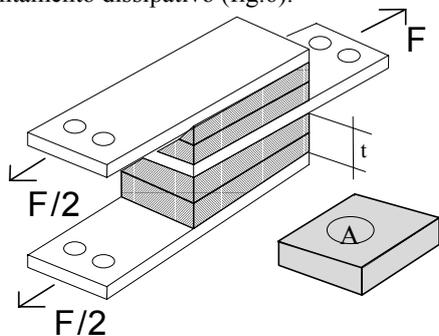


fig.5

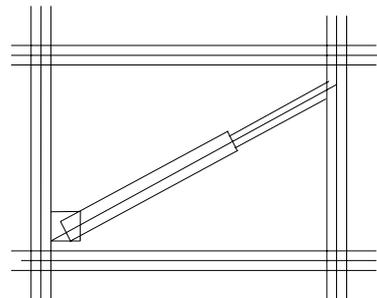


fig.6

Dato un materiale viscoelastico, caratterizzato dal modulo di carico $G'(\omega)$, ossia la sua rigidità elastica, e dal modulo di perdita $G''(\omega)$ ovvero dal fattore di perdita $\eta(\omega)=G''/G'$ che rappresentano entrambi la sua capacità dissipativa, il legame tensione(τ) - deformazione(γ), in presenza di una deformazione di tipo armonico $\gamma(t)=\gamma_0 \sin(\omega t)$ è il seguente:

$$\tau(t) = G'(\omega)\gamma(t) \pm G''(\omega)\sqrt{\gamma_0^2 - \gamma(t)^2} \quad (1)$$

E' importante sottolineare che sia il modulo di carico G' che il modulo di perdita G'' dipendono fortemente dalla frequenza e dalla temperatura. In quanto segue l'effetto della temperatura è stato trascurato.

Immaginiamo che tale materiale venga utilizzato per la realizzazione degli strati componenti il dissipatore di figura 5 che presentano spessore totale t ed area A . Moltiplicando ambo i membri della (1) per A otteniamo il legame forza (F)-spostamento(x) del dissipatore:

$$F(t) = K'(\omega)x(t) \pm K''(\omega)\sqrt{x_0^2 - x(t)^2} = K'(\omega)x(t) \pm K''(\omega)x_0\sqrt{1 - \eta^2} \quad (2)$$

dove:

$$K' = \frac{G' A}{t} \qquad K'' = \frac{G'' A}{t} \qquad \eta = \frac{G''}{G'} = \frac{K''}{K'} = \tan \delta$$

L'equazione (2) rappresenta nel piano $F-x$ un'ellisse (fig.7). In letteratura K' e K'' vengono spesso denominate rigidezza in fase e rigidezza non in fase. La ragione di ciò risiede nel fatto che il primo addendo rappresenta una componente elastica della risposta che come noto è in fase con lo spostamento. Il secondo addendo rappresenta invece una componente legata alla capacità dissipativa dello strato (componente puramente viscosa) che risulta

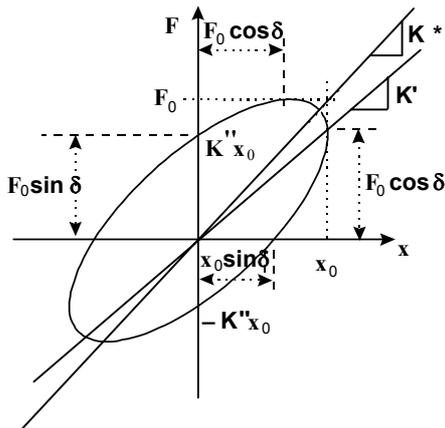


fig. 7

sfasata rispetto allo spostamento di un angolo pari a $\arct(\eta)$. Numerose indagini sperimentali hanno mostrato che nel campo di frequenze e spostamenti massimi, rappresentativi di strutture soggette a terremoti di elevata intensità, η assume valori compresi tra 0.8 e 1.4 [9].

L'energia dissipata in un ciclo, in funzione della frequenza, è data dalla semplice espressione

$$E_d = \pi x_0^2 K''(\omega) \quad (3)$$

E' dunque chiaro che l'azione dissipativa di un VED interviene a differenza di uno smorzatore elastoplastico, anche per piccoli spostamenti esplicando così la sua azione fin dall'inizio dell'azione sismica.

5. ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA DI STRUTTURE DOTATE DI VED

Il modello ad un grado di libertà illustrato in figura 8 può rappresentare schematicamente una struttura a telaio dotata di controvento dissipativo. L'input sismico è qui rappresentato da un set di 5 accelerogrammi artificiali della durata di 20 sec ciascuno, generati dallo spettro elastico al 5% di smorzamento della proposta di normativa CNR-GNDT per il suolo S2, uno dei quali è illustrato in figura 9.

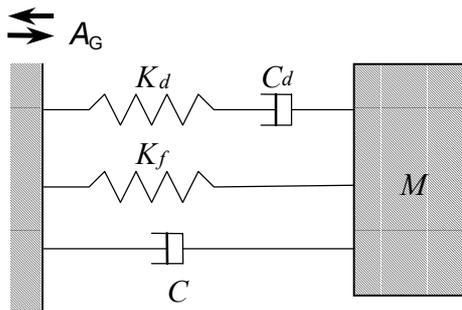


fig.8

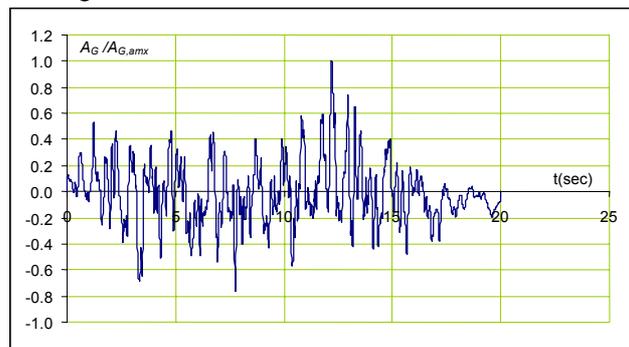
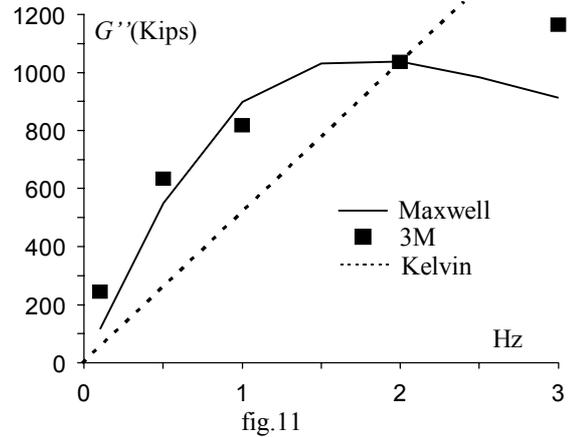
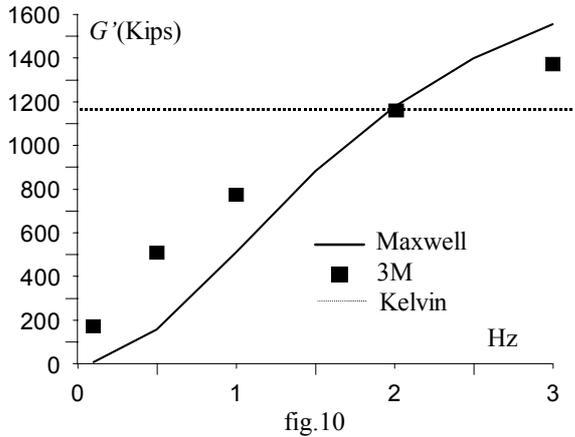


fig.9

La reazione strutturale del telaio si assume per semplicità di tipo elastico con periodo $T_f = 2\pi/\omega_f$. Il dissipatore è modellato con l'ausilio del semplice modello di Maxwell e si assume che il controvento tradizionale sia infinitamente rigido; l'organo di Maxwell che compare in figura 8 rappresenta pertanto sia il comportamento dell'intero controvento dissipativo che quello del solo dissipatore. Si considera infine presente nel sistema anche uno smorzamento viscoso aggiuntivo, pari al 5% dello smorzamento critico del solo telaio.

Nelle figure 10 e 11 sono illustrati, a titolo di esempio, gli andamenti sperimentali delle funzioni G' e G'' per un particolare smorzatore viscoelastico di produzione 3M, ricavati da una prova condotta a Berkeley [9], unitamente a quelli derivanti dai modelli di Kelvin e di Maxwell, calibrati per fornire esattamente i risultati sperimentali in corrispondenza della frequenza 2 Hz.



Il modello di Maxwell coglie decisamente meglio, in un campo sufficientemente ampio di frequenze, il comportamento sperimentale, specie per frequenze più basse di quella di calibrazione. Normalizzate le equazioni del moto rispetto alla massa totale e all'accelerazione massima al suolo, è conveniente descrivere il comportamento del sistema dissipativo con l'ausilio dei parametri adimensionali di seguito definiti:

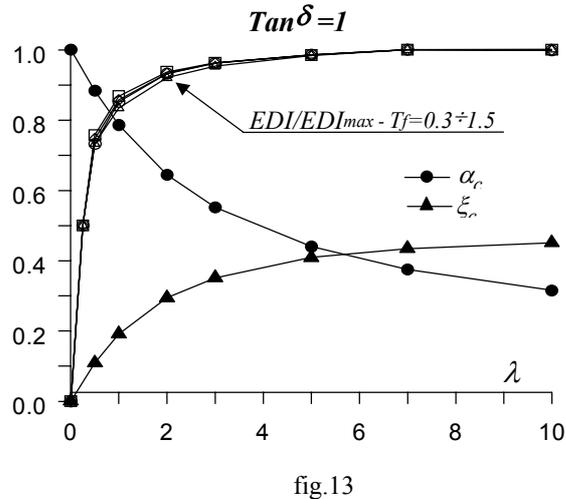
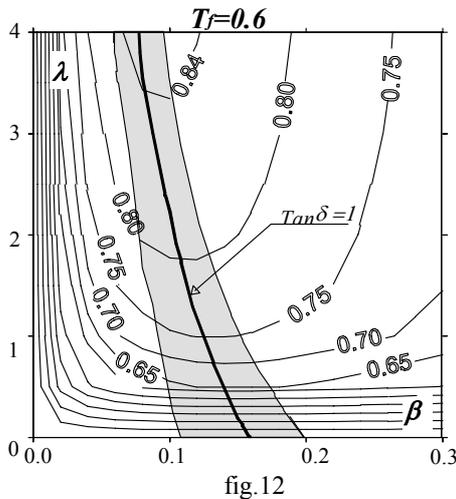
$$\lambda = \frac{K_d}{K_f} \quad \beta = \frac{C_d}{K_d} \frac{1}{T_f} \quad (4)$$

Studi effettuati hanno mostrato che i campi di variazione di λ e β ai quali corrispondono caratteristiche meccaniche ragionevoli sono: $\lambda=[0-4]$, $\beta=[0-0.2]$;

Tenuto conto del tipo di adimensionalizzazione dell'equazione del moto, quali parametri significativi della risposta, ottenuta come media delle risposte ai 5 accelerogrammi di cui sopra, si assumono, lo spostamento massimo ζ normalizzato allo spostamento della struttura priva di controventi ζ_0 , e la forza nella struttura stessa $\eta_i = F_d / (m A_{G,max})$ e nel dissipatore $\eta_d = F_d / (m A_{G,max})$, normalizzate entrambe rispetto alla massa totale (m) e alla accelerazione massima al piede ($A_{G,max}$).

Si introduce, inoltre, un indice energetico (*EDI*), rapporto tra l'energia dissipata dallo smorzatore e l'energia di input dell'azione sismica, alla cui massimizzazione è associato il significato di performance ottimale del sistema dissipativo [2,3,10]; esso costituisce pertanto la funzione obiettivo del problema di ottimizzazione che definisce il progetto dei dissipatori.

La figura 12 mostra nel piano λ - β le curve di livello dell'indice EDI. Si può osservare che il luogo dei massimi relativi dell'indice da luogo ad una curva che corrisponde alla condizione $\tan \delta = 1$.



Un limite superiore significativo per il parametro λ può essere individuato a partire da sezioni lungo la curva $Tan\delta=1$ delle superfici dell' EDI , (fig.13). Tale valore si riconosce essere all'incirca pari a 4, qualunque sia il periodo del telaio, dal quale le curve adimensionalizzate di EDI appaiono sostanzialmente indipendenti; esso è identificabile approssimativamente in corrispondenza del superamento del ginocchio, per valori dell'indice prossimi al massimo. In figura 13 sono anche rappresentati, per un utile riferimento, lo smorzamento equivalente ($\xi_c = \xi_c(\lambda, \beta)$) e l'effetto di modifica del periodo (α_c) corrispondenti; questi ultimi sono rigorosamente indipendenti da T_f . Si vede, ad esempio, che, per $\lambda < 4$, lo smorzamento non supera il 35%. Nelle figure 14 e 15 si osserva infine che, per valori di λ superiori a 4, la grandezza ζ/ζ_0 non subisce ulteriori significative riduzioni così come la forza totale $\eta_{II} = \eta_i + \eta_d$, entrambe risultando inoltre poco dipendenti dal periodo T_f .

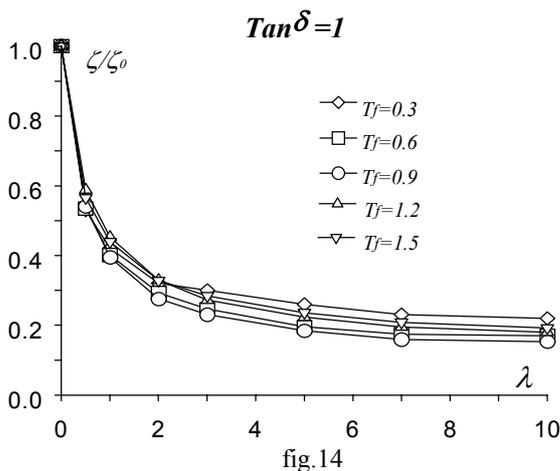


fig.14

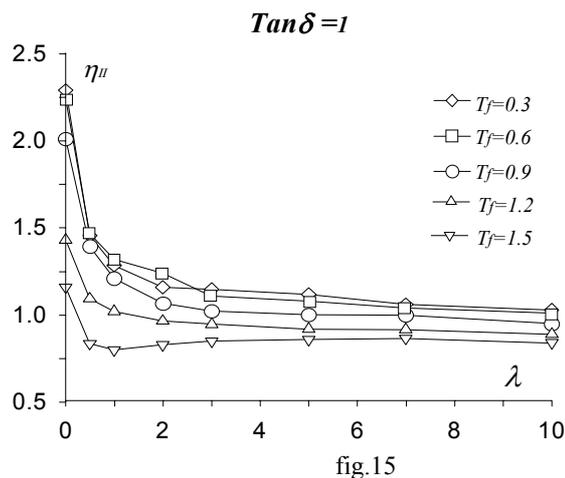


fig.15

Questi primi risultati, esemplificazioni di un comportamento più generale, portano alla conclusione che λ può essere scelto come parametro principale di progetto, potendo fissarsi preventivamente il valore di $Tan\delta$, o in alternativa del parametro β ; la prima scelta sembra, peraltro, essere la più appropriata, in quanto il fattore di perdita, per i materiali che vengono usualmente adoperati, risulta in genere ben definito, pochissimo dipendente dalla frequenza e molto prossimo all'unità.

Le numerose analisi numeriche effettuate, ipotizzando per il telaio un comportamento elastico lineare, hanno permesso la costruzione di spettri di progetto in forze, realizzati al variare del periodo del telaio T_f , per $Tan\delta=1$ e per fissato valore del rapporto EDI/EDI_{max} . Gli spettri possono essere utilizzati per il progetto della protezione sismica di strutture di rilevanza strategica come ad esempio gli impianti industriali a rischio di incidente rilevante.

I grafici, di seguito illustrati, sono stati realizzati per due valori del rapporto EDI/EDI_{max} pari rispettivamente a 0.9 e 0.95. Tale scelta contempera il rispetto del criterio di massimizzazione dell'indice EDI e l'esigenza di operare con rigidzze relative telaio-controvento e dimensioni del dissipatore accettabili. Ne corrispondono valori del parametro principale $\lambda \approx 1.2$ e $\lambda \approx 2$ rispettivamente, cui sono associati valori di smorzamento equivalente del 21% e 30% circa, (si veda fig.13), e riduzioni dello spostamento massimo, praticamente indipendenti dal periodo T_f , dell'ordine del 65% e 75%, (fig.14).

La figura 16 mostra l'andamento del taglio alla base η_{II} ; all'aumentare del periodo l'efficacia degli smorzatori, in termini di riduzione della forza, è massima nella zona piatta dello spettro di Normativa, per poi diminuire. Il confronto con lo spettro elastico mette in evidenza una riduzione massima del taglio alla base pari a circa il 45%, per il caso $EDI/EDI_{max}=0.95$; inoltre il taglio alla base della struttura diminuisce anch'esso all'aumentare del periodo e della percentuale di EDI_{max} (fig.17). Nella stessa figura 17 sono anche riportati i valori massimi corrispondenti della forza nel controvento, (η_d); questi non si verificano infatti contemporaneamente a quelli nella struttura, in quanto la presenza di un elemento viscoso puro nel modello di Maxwell, comporta uno sfasamento tra le reazioni strutturali dello smorzatore e della struttura principale.

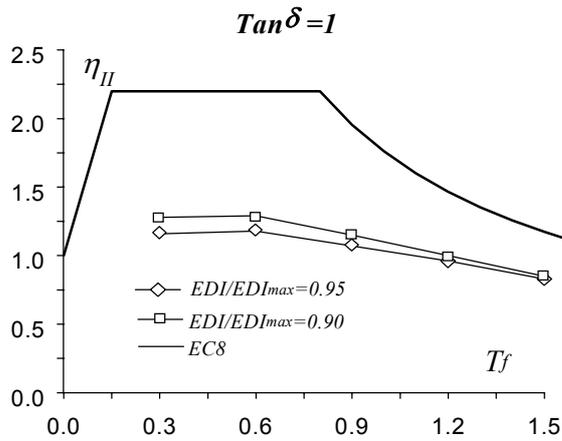


fig.16

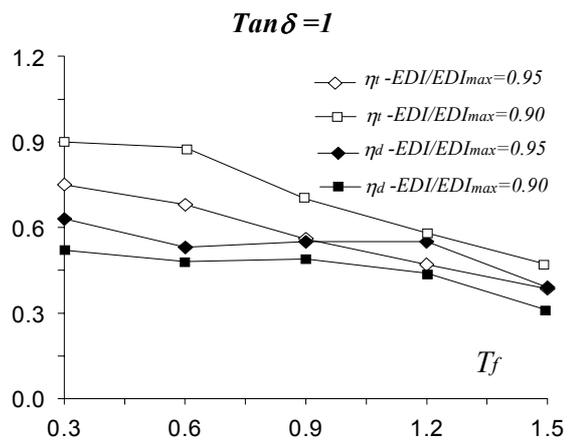


fig.17

Gli spettri in forza, sopra illustrati, permettono di effettuare la progettazione o la verifica della struttura, compresa la definizione dei dettagli strutturali del controvento dissipativo, che dipendono dalla forza massima η_d che ad esso compete.

Modellato il comportamento del materiale con l'elemento di Maxwell, e determinate le costanti di rigidezza e smorzamento ad esso associate attraverso un fitting non lineare dei dati sperimentali (G' e G''), è possibile esprimere, in funzione delle costanti su dette, i parametri dello smorzatore K_d e C_d e determinare di conseguenza il volume di materiale viscoelastico necessario. Essendo lo spessore degli strati di polimero legato all'entità della deformazione a taglio massima (γ), che viene in genere imposta per garantire l'ipotesi di viscoelasticità lineare, esso viene determinato usando la semplice relazione $t = \zeta/\gamma$. In tal modo l'unica grandezza dimensionale da definire risulta essere l'area A degli strati.

I risultati ottenuti per un sistema ad un gdl si possono agevolmente estendere anche a sistemi multi-piano. Un metodo semplice che sfrutta i risultati ottenuti per strutture ad 1 gdl consiste nell'applicare le relazioni costitutive (4) ad ogni piano della struttura, una volta nota la distribuzione di rigidezza lungo l'altezza del telaio; avremo così per l'i-mo piano:

$$K_{di} = \lambda K_t \quad C_{di} = \beta K_{di} T_f$$

dove λ e β sono i parametri adimensionali del controvento precedentemente descritti, T_f è il periodo del primo modo di vibrare della struttura multipiano non controventata e K_{di} è la relativa rigidezza al piano i-mo, la cui distribuzione lungo l'altezza è stata considerata costante.

La figura 18 mostra, ad esempio, per il caso di un telaio shear-type con periodo $T_f = 0.6$ sec, l'andamento degli spostamenti di piano per la configurazione con (C) e senza (NC) controventi dissipativi, evidenziando una riduzione uniforme lungo l'altezza pari circa al 50%. Un analogo comportamento si ha per il taglio globale di piano (struttura+controvento) per il quale la riduzione è di circa 30% (fig 19). Tali risultati sono legati alla elevata capacità dissipativa degli smorzatori viscoelastici il cui andamento, assieme alle altre componenti dell'energia, è illustrato in figura 20. Infatti l'energia dissipata rappresenta circa l'80% dell'energia di input sismico, mentre l'energia elastica associata alla struttura risulta assai limitata con conseguente limitazione del danno negli elementi portanti.

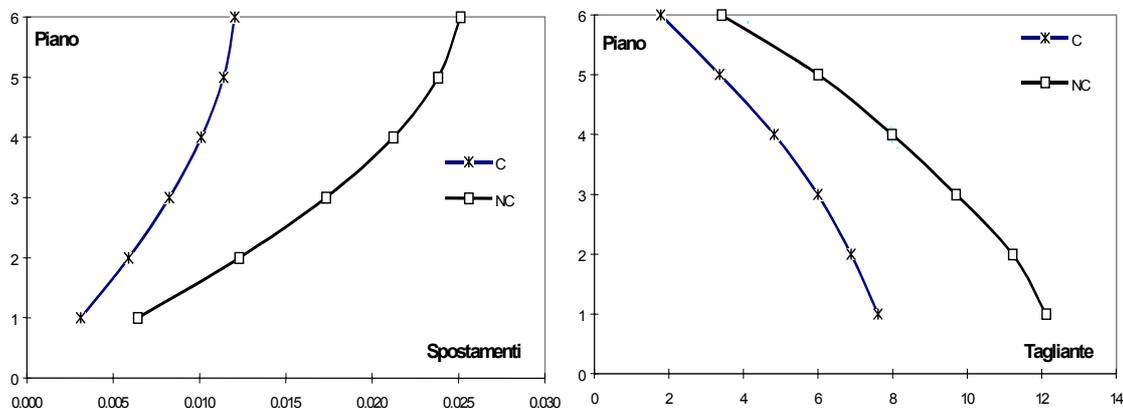


fig.18

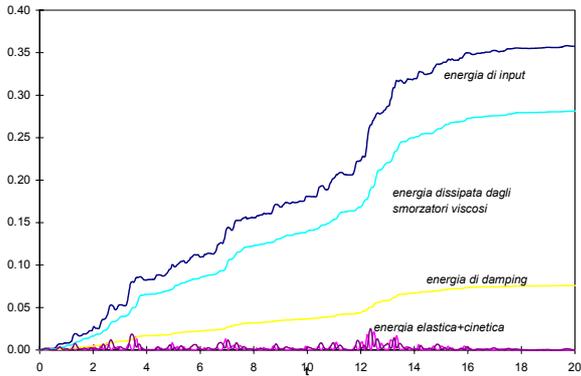


fig.20

fig.19

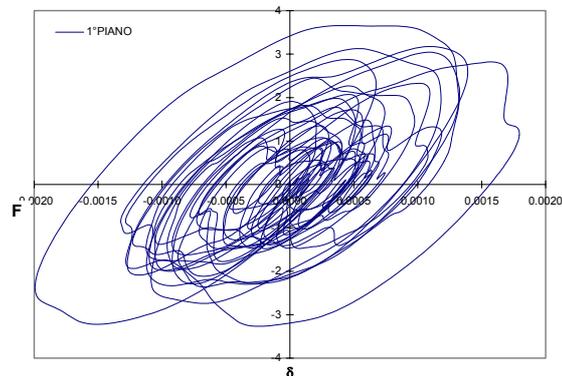


fig.21

A conferma di ciò la figura 21 che riporta un esempio di diagramma forza–spostamento, mostra come lo smorzatore dissipi l’energia in maniera stabile e controllata e come mantenga una elevata capacità dissipativa per tutta la durata dell’azione sismica.

Il metodo proposto che ha un evidente carattere locale, presenta il vantaggio della semplicità di applicazione ma non permette di correggere eventuali irregolarità in rigidità della struttura che si trasferiscono totalmente sulla distribuzione delle caratteristiche dei controventi dissipativi. Un metodo alternativo, ancora oggetto di studio, e denominato metodo globale, permette di scegliere la distribuzione dei controventi indipendentemente dalla struttura con l’obiettivo di uniformare il più possibile la risposta strutturale lungo l’altezza, pur mantenendo il livello di performance medio stimato attraverso il sistema ad 1 gdl.

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.

Benché gli impianti attualmente in esercizio dovrebbero ormai aver completato il processo di adeguamento al regolamento sismico evolutosi negli ultimi anni, e allo stato attuale soddisfino le esigenze di sicurezza richieste dalla normativa vigente, si avverte oggi la necessità di sperimentare nuovi approcci migliorativi nella protezione delle strutture produttive. Per gli impianti industriali, e per quelli petrolchimici in particolare, infatti, gli scenari di rischio a seguito di un sisma non possono essere legati unicamente ai concetti di danneggiamento e di collasso strutturale. Ne consegue, pertanto, che i criteri progettuali utilizzati nella realizzazione di nuovi impianti devono mettere in conto il soddisfacimento di requisiti prestazionali più sofisticati: in primo luogo la riduzione del rischio di incidente, limitando i danneggiamenti delle strutture e i conseguenti rilasci di sostanze pericolose per la salute umana e per l’ambiente, in secondo luogo il beneficio economico derivante dalla maggiore disponibilità degli impianti in termini di continuità produttiva. Tali requisiti potrebbero esprimersi ad esempio nel seguente modo:

- l’impianto deve rimanere pienamente funzionale e produttivo a seguito di un terremoto lieve o comunque limitare il blocco delle apparecchiature in caso di sisma di moderata entità e non devono verificarsi in nessun caso rilasci di sostanze pericolose;
- l’impianto, pur potendo subire una sospensione della sua attività in caso di sisma medio forte, deve essere in grado di riprendere la produzione nel più breve tempo possibile e comunque i danneggiamenti riportati non devono aver dato luogo a rilasci di sostanze pericolose;
- l’impianto, in caso di terremoto violento, non deve dar luogo a rilasci tali da generare un incidente rilevante.

L’esigenza di limitare i danni alle strutture e alle apparecchiature è tanto più sentita quanto più l’impianto riveste un ruolo strategico, come potrebbe essere quello di una centrale di produzione di energia elettrica, o quanto più l’impianto tratta sostanze pericolose e potenzialmente nocive per la popolazione in caso di rilascio.

Le strutture di un impianto petrolchimico possono essere raggruppate in alcune macrofamiglie caratterizzate da un modello comune. Con una rapida analisi si possono individuare i seguenti gruppi:

- Strutture in cemento armato (edifici civili, torri di raffreddamento, mura di recinzione ecc.);
- Serbatoi (dedicati allo stoccaggio, a tetto fisso o galleggiante, cilindrici e poggiati a terra su una fondazione);

- Serbatoi in elevazione (serbatoi di processo, sfere stoccaggio GPL, generalmente fissati a elementi in carpenteria metallica e fondazioni in c.a.);
- Colonne (colonne di distillazione, reattori, ecc., generalmente poggiati su una gonna in acciaio e fissati a terra su opportune fondazioni);
- Forni (strutture in carpenteria metallica dotate di platea di fondazione e che in genere supportano una ciminiera di alcune decine di metri);
- Apparecchiature rotanti di grandi dimensioni (compressori, turbine, alternatori, motori elettrici);
- Strutture in elevazione (pipe rack o incastellature con apparecchiature d'impianto, modellabili comunque come telai in acciaio con carichi applicati);
- Struttura a traliccio della torcia;
- Elementi piping (tubazioni di trasferimento su pipe rack e tubazioni di processo che collegano le apparecchiature di impianto).

Tralasciando in questa fase le possibili applicazioni al gruppo delle strutture in cemento armato, che poco si discosterebbero dai sistemi già sperimentati in campo civile, è interessante focalizzare l'attenzione su altre strutture caratteristiche degli impianti industriali.

I serbatoi, le colonne e i forni sono tipologie di struttura per le quali come tecnica di protezione passiva appare molto indicato l'isolamento alla base, senza però eliminare completamente l'opzione degli smorzatori viscoelastici. Tali strutture comunque hanno una conformazione tale da rendere abbastanza complessa la realizzazione di un modello matematico rappresentativo.

Sicuramente molto interessante è l'applicazione di sistemi di protezione sismica nella fondazione delle apparecchiature rotanti più grandi e costose. In genere tali elementi (compressori, turbine, ecc.) sono contemporaneamente fondamentali per il ciclo produttivo ed estremamente sensibili alle vibrazioni e per questo vengono sempre dotati di sofisticati sistemi di blocco per salvaguardarne l'integrità. Appare chiaro quindi come una riduzione netta delle sollecitazioni sismiche e degli spostamenti possa rappresentare un beneficio enorme per questo tipo di apparecchiature, sia per evitare l'intervento dei sistemi di sicurezza della macchina in caso di terremoto di lieve entità, che per tutelarne i componenti in caso di sisma di intensità più elevata.

Per quanto riguarda gli elementi di piping, non viene fatta una verifica sismica in quanto le sollecitazioni sulla tubazione causate dal sisma sono di molto inferiori a quelle derivanti dalle pressioni interne e dalle dilatazioni termiche. Le tubazioni inoltre, per assorbire gli enormi carichi che deriverebbero da un bloccaggio della dilatazione termica (una tubazione di 50 metri in acciaio al carbonio, passando dalla temperatura ambiente ad una temperatura di esercizio di 200°C, si dilata di quasi 11 cm), vengono lasciate libere di scorrere sui supporti e presentano dei bloccaggi solo dove le condizioni di carico lo permettono. I coefficienti di sicurezza assunti nel calcolo statico quindi, assieme all'elevata flessibilità che le strutture piping normalmente presentano, permettono di assorbire i carichi derivanti da un terremoto in modo più ampio rispetto ad una classica struttura rigida in cemento armato o in carpenteria metallica.

Un'analisi a parte potrebbe invece essere fatta per le tubazioni di collegamento tra strutture adiacenti (tra impianto e impianto o anche tra strutture separate all'interno dello stesso impianto). In tal caso infatti, la sollecitazione sull'elemento di tubazione viene aggravata dal fatto che le strutture portanti limitrofe in caso di sisma, possono oscillare con modi differenti e trascinare le tubazioni oltre il limite consentito dai loro gradi di libertà. In questo caso si intravede una possibile applicazione degli smorzatori sismici che, riducendo in valore assoluto le oscillazioni delle strutture, riducono anche le sollecitazioni sugli elementi di collegamento.

Per quanto riguarda i serbatoi in elevazione, soprattutto nel caso delle sfere di stoccaggio GPL, l'applicazione di sistemi di protezione sismica è di sicuro interesse visto l'elevato grado rischio connaturato alla struttura stessa che peraltro si presta bene ad essere modellata matematicamente.

Quella che sembra essere invece l'applicazione più semplice da immaginare, e anche più facile da realizzare in termini sia tecnici che economici, è l'inserimento di controventi dissipativi attrezzati con smorzatori viscoelastici nelle strutture in elevazione costituite da semplici telai in carpenteria metallica. In tal caso la semplicità di creare il modello matematico di un telaio in acciaio e dei carichi ad esso applicati, si associa ad un ampio ventaglio di situazioni reali e di relativi scenari di rischio, offrendo spunti applicativi molto interessanti. Sulle incastellature d'impianto sono infatti posizionate numerose apparecchiature che trattano idrocarburi ad elevata temperatura e a pressione e che vanno dai semplici scambiatori refrigeranti ad acqua, ai refrigeranti ad aria dotati di ventilatore, ai ribollitori a vapore, fino ad alcuni reattori di processo. In alcuni casi anche un'apparecchiatura delicata e costosa come una turbina a vapore di una centrale termica, per far posto al condensatore sottostante, potrebbe essere posizionata in quota su una soletta in c.a. ancorata a una struttura in elevazione. Anche in questo caso, durante un sisma, la riduzione delle oscillazioni della struttura è di fondamentale importanza, sia per evitare l'intervento dei sistemi di sicurezza della macchina in caso di terremoto di lieve entità, che per tutelarne i componenti in caso di sisma di intensità più elevata.

Un'altra applicazione molto interessante, sia per la tipologia di struttura, che per il grado di rischio connesso ad un suo danneggiamento, è la protezione della torcia di raffineria. Tale elemento infatti è realizzato con un traliccio in acciaio alto diverse decine di metri a sostegno di una tubazione sempre in acciaio dedicata a convogliare in luogo sicuro in quota e a bruciare gli stream gassosi che gli impianti devono rilasciare in caso di blocco o incidente secondo procedure prestabilite dai sistemi automatici di protezione. In caso di danneggiamento della struttura si potrebbero avere rilasci di gas in punti diversi dal bruciatore di testa con rischio di inquinamento ambientale o peggio ancora di innesco e danneggiamento ulteriore della struttura.

L'applicazione dei sistemi di protezione sismica negli impianti petrolchimici quindi, si propone non solo come sistema di salvaguardia della struttura su cui viene applicato, ma anche come utile strumento nella ricerca della riduzione complessiva del rischio legato all'esercizio dell'impianto. Pur non riuscendo ancora a quantificare con esattezza il contributo dato dallo smorzatore alla riduzione del rischio, possiamo però affermare con tranquillità che un miglioramento generale della situazione interviene e ciò, nel campo delle aziende a rischio di incidente rilevante, rappresenta sicuramente un punto di interesse e uno spunto per approfondire le ricerche.

L'altro aspetto da non dimenticare è poi il risvolto economico che deriva dall'introduzione di tali sistemi. Da un lato, infatti, l'adozione in fase di progetto delle tecniche di isolamento o di dissipazione passiva presenta modesti costi realizzativi, e i benefici che si ricavano in termini di continuità produttiva o di rapida ripresa delle attività anche a seguito di un sisma importante, garantiscono un rapido e sicuro ritorno dal capitale investito per la loro realizzazione. Mentre, l'estensione di tali sistemi a strutture preesistenti, benché dia luogo agli stessi benefici, richiede un impegno economico maggiore e la necessità di eseguire modifiche strutturali. 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 comunque 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. Si può quindi affermare che l'introduzione dei sistemi di protezione sismica negli impianti petrolchimici presenta sicuramente possibilità di sviluppo e interessanti applicazioni nell'ambito di nuove costruzioni o di grandi revamping, mentre nel caso di retrofitting, in considerazione del rapporto costi-benefici, trova giustificazione solo in caso di un adeguamento normativo.

7. CONCLUSIONI

Il presente lavoro si colloca nell'ambito della protezione sismica delle strutture a mezzo di sistemi di dissipazione dell'energia, facendo specifico riferimento ad una delle possibili applicazioni del controllo passivo: i controventi dissipativi viscoelastici.

Sono stati analizzati dissipatori di tipo viscoelastico nei quali la dissipazione di energia è presente in ogni fase del moto, per cui anche per piccoli spostamenti. Questo comporta che i materiali a comportamento viscoelastico presentino in genere capacità dissipative elevate.

Si è quindi proposta una metodologia per il progetto di controventi dissipativi viscoelastici, utili alla protezione sismica di strutture intelaiate. In particolare una estesa indagine numerica, sulla base di un oscillatore ad un grado di libertà, ha permesso di identificare i parametri globali ottimali del sistema di controventamento dissipativo, utilizzando un approccio di carattere energetico. Tale metodologia è stata successivamente estesa a sistemi a molti gradi di libertà, i cui risultati risultano in netto accordo con quanto previsto dalle analisi effettuate sull'oscillatore semplice.

E' stata infine verificata la potenzialità di utilizzo delle tecniche di protezione passiva, e in particolare dei controventi dissipativi viscoelastici, agli impianti industriali a rischio di incidente rilevante, per i quali 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, legati sia alla sicurezza che alla continuità produttiva.

8. RINGRAZIAMENTI

Desideriamo ringraziare il direttore del DIPIA ing. Giancarlo Ludovisi e l'ing. Raffaele Delle Piane per il prezioso supporto fornito alla realizzazione del presente lavoro.

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] Vincenzo Ciampi, Mariano Ciucci, Giambattista Guidi (2000) "Sistemi innovativi per la protezione sismica di impianti a rischio di incidenti rilevanti"- Atti del Convegno Nazionale " Valutazione e Gestione del Rischio negli Insediamenti Civili ed Industriali -VGR2k ", Pisa, 24-26 Ottobre 2000.

- [2] F.Paolacci, M.De Angelis, (2001), "Passive control of structures using viscoelastic devices", 7th International Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibrations of Structures, Assisi, Italy, October 2-5, 2001
- [3] F.Paolacci,V.Ciampi, M.De Angelis, (1998), "Optimal design of viscoelastic bracing systems for earthquake protection of buildings", Proceeding of the Eleventh European Conference on Earthquake Engineering, Paris, 6-11 September.
- [4] Mariano Ciucci, Rita Iorio, Sergio Bellagamba & Raffaele Delle Piane (2001):"Classificazione sismica del territorio nazionale secondo la L.1684/62. Localizzazione e protezione sismica delle attività industriali ad elevata pericolosità soggette al D.lgs 334/99", Atti del 7°Convegno di Igiene Industriale – Corvara Bolzano 21-23 Marzo.
- [5] 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.
- [6] Soong, T.T. and Dargush, G.F., 1997, 'Passive energy dissipation system in structural engineering', John Wiley.
- [7] 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.
- [8] Lai,M-L., (1995), Characteristic of viscoelastic materials and dampers as energy dissipation devices", A New Direction in Seismic Design, Tokyo, October.
- [9] Blondet,M., (1993), "Dynamic response of two viscoelastic dampers", Report to County of Santa Clara Construction Service Division, University of California at Berkeley, Dep. of Civil Eng.
- [10] 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 - EUROODYN '96, Augusti et al. (eds), 1996 Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410813 4, Vol. 1, pp. 525-532.

Tabella 1.

	I Categoria		II Categoria		III Categoria	
	art. 6	art. 8	art. 6	art. 8	art. 6	art. 8
Numero impianti	7	6	172	92	24	22
Percentuale	3,5%	5,0%	84,7%	76,7%	11,9%	18,3%

Tabella 2

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	
	art. 6	art. 8	art. 6	art. 8	art. 6	art. 8	art. 6	art. 8	art. 6	art. 8	art. 6	art. 8
ABRUZZO	12	8	5	3	--	--	5	3	--	--	41,7%	37,5%
BASILICATA	4	2	3	1	--	1	3	--	--	--	75%	50%
CALABRIA	5	6	5	6	3	3	2	3	--	--	100%	100%
CAMPANIA	44	28	40	27	--	--	19	5	21	22	90,9%	96,4%
EMILIA-ROMAGNA	66	46	18	2	--	--	18	2	--	--	27,3%	4,3%
FRIULI-VEN.GIULIA	20	11	12	3	4	2	8	1	--	--	60%	27,3%
LAZIO	44	35	24	13	--	--	24	13	--	--	54,5%	37,1%
LIGURIA	17	16	2	2	--	--	2	2	--	--	11,8%	12,5%
LOMBARDIA	144	113	1	1	--	--	1	1	--	--	0,7%	0,9%
MARCHE	8	7	8	7	--	--	8	7	--	--	100%	100%
MOLISE	3	4	1	1	--	--	1	1	--	--	33,3%	25%
PIEMONTE	80	38	--	1	--	--	--	1	--	--	--	2,6%
PUGLIA	26	24	9	6	--	--	6	6	3	--	34,6%	25%
SARDEGNA	22	28	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
SICILIA	33	34	32	33	--	--	32	33	--	--	97%	97,1%
TOSCANA	42	19	28	11	--	--	28	11	--	--	66,7%	57,9%
TRENTINO-ALTO ADIGE	12	8	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
UMBRIA	14	4	11	3	--	--	11	3	--	--	78,6%	75%
VAL D'AOSTA	2	2	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
VENETO	51	40	3	--	--	--	3	--	--	--	5,9%	--
ITALIA	649	473	202	120	7	6	172	92	24	22	31,1%	25,4%