

L'INCIDENZA DEI RISCHI NATURALI NELL'ANALISI DEL RISCHIO PER GLI IMPIANTI SEVESO. SISTEMI AVANZATI DI PROTEZIONE SISMICA: IL CASO DELL'ACCOPIAMENTO STRUTTURALE

Ciampi V.¹, De Angelis M.¹, Di Cave S.², Luccone L.G.²

¹Dip. Ing. Strutturale, Università di Roma "La Sapienza", via Eudossiana 18, Roma, 00184

²Dip. Ing. Chimica, Università di Roma "La Sapienza", via Eudossiana 18, Roma, 00184

SOMMARIO

Nell'ultimo ventennio diverse catastrofi naturali, Giappone (Kobe 1995), Turchia (Kocaeli 1999), Florida (2005), hanno evidenziato che i disastri di origine naturale sono in grado di provocare dei danneggiamenti di notevole importanza agli impianti industriali causando nella maggior parte di casi il rilascio di sostanze pericolose e situazioni di emergenza molto difficili da gestire. L'importanza di approfondire scientificamente tutti gli aspetti di protezione rispetto a questi eventi è, poi, fondamentale per due ordini di motivi: da un lato la necessità di adeguare le procedure di analisi di rischio anche ad eventi iniziatori di tipo naturale; dall'altro lato, dato che molti dei danni strutturali osservati hanno evidenziato che le normative progettuali correnti non tengono conto in modo completo dei possibili effetti delle sollecitazioni di origine naturale, e in particolare quelle sismiche, sulla configurazione strutturale reale, la necessità di riformulare delle norme di progettazione tenendo conto delle azioni dinamiche. Nel presente articolo verranno esaminate le criticità di alcune fra le più comuni apparecchiature e sistemi di tubazioni degli impianti di processo e in particolare i dispositivi di protezione basati sull'accoppiamento di strutture dotate di diverso periodo caratteristico.

1.0 CONTESTUALIZZAZIONE DEL RISCHIO NATURALE PER GLI IMPIANTI INDUSTRIALI

Nonostante l'uomo conviva ormai da secoli con le calamità e con i rischi naturali e che ci sia una certa pressione legislativa, almeno negli ultimi decenni, per quanto riguarda la costruzione di insediamenti civili in zone che presentano una certa vulnerabilità sismica o idrogeologica, per ciò che concerne le installazioni industriali domina ancora, nella maggior parte dei casi e nell'impostazione della pianificazione d'area vasta, una certa superficialità e non conoscenza degli effetti dei fenomeni naturali. Anche dal punto di vista scientifico esistono pochi studi dell'impatto dei fenomeni naturali sulle installazioni industriali. Un improvviso ed esteso cambiamento di mentalità si è avuto a seguito del terremoto di Izmit in Turchia nell'agosto del 1999 [1]: l'opinione pubblica, la dirigenza politica, gli enti di normazione e gli stessi gestori degli impianti hanno maturato la consapevolezza che il rischio naturale dovesse essere parte integrante del complesso processo di analisi del rischio per l'attività industriale dal momento che le conseguenze, acute e nel tempo, sono state gravissime per l'uomo, per l'ambiente e per la stessa economia di una nazione; inoltre, è stato evidente che i metodi di progettazione tradizionale per le apparecchiature e i componenti, in special modo quelli con un approccio unicamente di tipo statico e in zone a media e alta sismicità, possono essere non sufficientemente conservativi. La tabella 1 tratta da [2] mostra l'incidenza del rischio naturale sul totale degli incidenti industriali presenti nei database commerciali più accreditati.

Tabella 1. Gli incidenti industriali che hanno avuto come causa un evento naturale

Sorgente	Incidenti di origine naturale	Numero totale degli incidenti	Percentuale di incidenti di origine naturale (%)
EPA	5	103	5
MARS	5	121	4
FATCS (TNO)	154	16200	1
MHIDAS (HSE)	105	5500	2

Tabella 2. Analisi degli effetti delle varie tipologie di eventi naturali

Evento	Commenti
Valanghe, frane	L'analisi storica ha mostrato che siti in prossimità di versanti presentano una probabilità di essere coinvolti da fenomeni di movimenti di terra piuttosto elevata.
Erosione costiera	Il fenomeno dell'erosione costiera deve essere considerato per i nuovi insediamenti e valutato ogni due anni per i vecchi.
Siccità, scarsità di piogge	Ci possono essere seri problemi di disponibilità di acqua di raffreddamento per l'impianto e per gli impianti antincendio.
Allagamento	Impatto di masse d'acqua provenienti da fiumi, laghi, mare. In alcuni casi – tempeste, tornados, tsunami – l'acqua può essere trasportata anche dal vento o da onde meccaniche generatesi in seno all'acqua stessa.
Tornado, uragani e venti violenti	Generazione di missili, possibilità di spegnimento della torcia, impossibilità per gli operatori di lavorare in situ, impossibilità di gestire gli azionamenti manuali, scarsa visibilità specialmente in zone prossime a deserti, i fenomeni ventosi sono quasi sempre associati a trasporto di quantità d'acqua che viene scagliata sugli impianti.
Nebbia	La nebbia può diventare concausa di eventi incidentali. Aumenta la probabilità di accadimento. Deve essere prevista illuminazione franginebbia.
Gelate	Le gelate possono compromettere le fondazioni delle apparecchiature, le tubazioni per fluidi a temperature di solidificazione prossime a 0 °C.
Grandine	In alcune zone i chicchi di grandine possono raggiungere dimensioni considerevoli. Essi diventano veri e propri missili contro le apparecchiature.
Alte temperature estive	Specialmente negli ultimi anni si sono registrati innalzamenti generalizzati delle temperature medie estive. Anche i picchi massimi sono aumentati.
Fulmini	Le apparecchiature più alte e quelle più vulnerabili dovrebbero essere protette.
Basse temperature invernali	Le basse temperature invernali possono causare stress termici e infragilimento specialmente sui serbatoi di stoccaggio.
Piogge intense	Piogge intense innalzano il livello delle superfici d'acqua. Si ricade nel punto <i>allagamenti</i> .
Tempeste di sabbia	Sono frequenti negli impianti in zone desertiche o limitrofi a esse. Le tempeste di sabbia possono provocare danneggiamenti agli impianti.
Assestamenti e consolidamenti del terreno	Bisogna valutare attentamente la natura e le proprietà dei terreni su cui sono posate le fondazioni. I controlli devono essere ripetuti a scadenze fisse. Si potrebbero verificare fenomeni di liquefazione o di assestamento che potrebbero danneggiare le fondazioni e di conseguenza gli impianti.
Tsunami (onde anomale)	Alcuni siti industriali costieri potrebbero risentire gli effetti di eventi incidentali del tipo tsunami. Si possono generare onde a livello della costa alte fino a 15 m. Il fenomeno deve essere studiato, valutato e incluso nei piani di emergenza interno ed esterno.
Attività vulcanica	Impianti in prossimità di vulcani attivi sono soggetti al rischio di colate laviche. Le distanze di attenzione dipendono fortemente dal tipo di vulcanismo del vulcano. Le colate laviche possono raggiungere distanze anche di decine di chilometri dal punto di emissione (dipende dalla fluidità del magma). I fenomeni vulcanici sono sempre accompagnati dalla proiezione di lapilli incandescenti e cenere che in pochi minuti possono raggiungere notevoli distanze.
Terremoti	Gli impianti, le apparecchiature e i componenti in zone particolarmente sismiche possono essere soggetti, in caso di terremoto, ad azioni tali da causare la perdita di funzionalità o addirittura il collasso con gravi e difficilmente controllabili rilasci di sostanze pericolose.

Le analisi di rischio relative agli impianti di processo sono state tradizionalmente focalizzate su eventi incidentali in seno all'impianto stesso aventi come cause iniziatrici anomale deviazioni dalle condizioni di esercizio nominali. Negli anni '90, grazie anche alla nuova impostazione data dalla direttiva Seveso II, si è cominciato a considerare gli "effetti domino". Assai pochi studi sono stati invece finora condotti sull'incidenza di eventi calamitosi naturali quali terremoti, alluvioni, tempeste, fulminazioni, tornados, come cause iniziatrici di incidenti singoli o in cascata nell'ambito di impianti ad alto rischio intrinseco (vedi tabella 2) quali quelli di processo anche se l'interrogazione dei database mostra un'incidenza del rischio naturale tutt'altro che trascurabile (tabella 1) in termini di frequenza di accadimento e soprattutto in termini di magnitudine dei danni. Si comincia solo da poco a parlare di "Natech", cioè di una nuova branca dell'ingegneria della sicurezza che si occupa degli effetti di fenomeni naturali su beni tecnologici [3,4]. Showalter e Mayer [4] hanno mostrato che nel periodo che va dal 1980 al 1999, negli Stati Uniti ci sono state più di 300 emergenze Natech e di queste ben 228 erano dovute a terremoti, 26 a tornados, 20 a tempeste, 16 a inondazioni e 15 a fulminazioni.

2.0 ANALISI DEL COMPORTAMENTO SISMICO DEGLI IMPIANTI INDUSTRIALI

In questo paragrafo vengono qui esaminate le criticità di alcune fra le più comuni apparecchiature e sistemi di tubazioni degli impianti di processo e vengono anche indicati gli effetti di alcuni dispositivi capaci di smorzare o controllare il trasferimento delle sollecitazioni sismiche alle strutture stesse. Il sisma è uno degli eventi naturali più temuti in quanto non sempre prevedibile e d'altra parte capace di conseguenze catastrofiche. Finora l'unico accorgimento adottato nella progettazione delle apparecchiature di processo è consistito in uno specifico irrobustimento strutturale tale da poter resistere il più possibile alle sollecitazioni di origine sismica. Un punto di partenza essenziale per analizzare le criticità è comunque quello di iniziare dai danneggiamenti osservati nei sismi accaduti, mediandoli pure con analisi delle vulnerabilità, con la finalità di identificare, per quella determinata tipologia strutturale, delle grandezze di riferimento da monitorare e dei relativi indicatori di pericolo. Per analizzare il danno si può procedere nel seguente modo: in primo luogo si possono considerare le condizioni per cui si può avere il collasso locale o globale della struttura, che sicuramente corrispondono a una interruzione della lavorazione e al rilascio delle sostanze trattate, e in seconda battuta si possono analizzare tutte quelle situazioni, strutturalmente secondarie, che presentano una perdita di integrità strutturale via via decrescente e valutarne le conseguenze dal punto di vista della sicurezza del processo.

2.1 Il rischio sismico in Italia

Una stima del ministero dell'Ambiente attesta che dal 1997 al 2003 i danni materiali provocati da calamità naturali ammontano a 32 miliardi di euro, dei quali circa la metà dovuti ad eventi sismici e la maggior parte della restante metà a eventi di natura idrogeologica. Nel territorio italiano alcuni degli eventi naturali riportati nella tabella 2, come per esempio i tornados e le tempeste di sabbia, sono poco probabili mentre altri come le catastrofi legate al rischio idrogeologico e sismico rappresentano un serio aspetto da prendere in considerazione nella pianificazione territoriale. Per quanto riguarda specificamente la vulnerabilità ai terremoti la situazione è che il 45,2% del territorio nazionale è di natura sismica. La classificazione sismica presente nell'Ordinanza 3274/2003 ha diviso il territorio nazionale in quattro categorie basate sul livello di sismicità: I categoria (S=12): aree a elevata sismicità; II (S=9): aree a media intensità sismica; III (S=6): aree a bassa intensità sismica; IV, aree a intensità sismica praticamente trascurabile. Per quanto riguarda gli impianti a rischio di incidente rilevante la distribuzione per categoria desumibile da dati pubblici a seconda dell'entità del pericolo in base alla quantità delle sostanze stoccate secondo gli articoli 6 e 8 del D.Lgs. 238/05 è illustrata nella seguente tabella.

Tabella 3. Distribuzione degli impianti a rischio di incidente rilevante per categoria sismica

	I categoria		II categoria		III categoria	
	Art. 6	Art. 8	Art. 6	Art. 8	Art. 6	Art. 8
Numero impianti	8	7	169	83	19	19
%	4,1	6,4	86,2	76,1	9,7	17,4

Degli oltre mille impianti a rischio di incidente rilevante ben il 32% si trova in zona sismica, alcuni sono situati in zone altamente sismiche come la Sicilia orientale che presentano una alta concentrazione di impianti. Nel paragrafo 4 verranno esaminate le criticità di alcune fra le più comuni apparecchiature e sistemi di tubazioni degli impianti di processo.

2.2 Applicazione delle tecniche di isolamento sismico agli impianti industriali

Gli impianti industriali sono a tutti gli effetti un sistema complesso ed è proprio questa complessità del layout fitto di molteplici connessioni, apparecchiature e componenti unita alla complessità del funzionamento che può essere schematizzato come localmente seriale nel senso che le operazioni di processo vengono realizzate con un preciso iter e a determinate condizioni al contorno e dove la crisi di un elemento si può tradurre come un fuori servizio dell'intero sistema ad amplificare la

vulnerabilità sismica dell'impianto. È importante, poi, osservare che rispetto all'ambito civile nell'ambito industriale c'è una diversa richiesta prestazionale. Infatti, nel primo caso la filosofia di progetto in zona sismica è tipicamente basata su due livelli di azione sismica:

- La costruzione deve superare senza danni un sisma moderato;
- La costruzione, pur potendo subire danni anche elevati, non deve arrivare al collasso per effetto di un sisma di elevata intensità.

Queste indicazioni valide per le costruzioni civili, non possono essere ritenute valide anche per gli impianti industriali che esigono il soddisfacimento di requisiti prestazionali più sofisticati che potrebbero, per esempio, esprimersi nel seguente modo:

- L'impianto deve rimanere funzionante a seguito di un sisma di moderata intensità;
- L'impianto, pur potendo subire una sospensione della sua funzionalità, non deve dare luogo ad incidente rilevante, a seguito di un sisma violento (stato limite ultimo).

Le applicazioni ad apparecchiature e componenti di impianti industriali sono di fatto ancora poco diffuse: nell'ultimo decennio si sono registrate singole e isolate applicazioni per impianti a rischio di incidente rilevante limitate all'isolamento alla base di serbatoi di medie e grosse dimensioni. In particolare vanno menzionati i casi di isolamento alla base mediante isolatori elastomerici per serbatoi di gas naturale liquefatto (GNL) e per serbatoi di ammoniaca. In tabella 4 è presentato un primo tentativo di associare a ogni apparecchiatura, specificando le criticità e il danno possibile, le tecniche di controllo applicabili. Per quanto riguarda la descrizione tecnica e analitica dei dispositivi e delle tecniche di protezione sismica per gli impianti industriali si rimanda a precedenti pubblicazioni [5,6] dei medesimi autori del presente articolo.

3.0 CONFIGURAZIONI STRUTTURALI TIPICHE DEGLI IMPIANTI INDUSTRIALI

Una schematizzazione delle apparecchiature tipiche dell'industria di processo dal punto di vista delle loro caratteristiche strutturali è la seguente.

3.1 Apparecchiature a struttura snella

Sono apparecchiature di forma tipicamente cilindrica caratterizzata da un elevato rapporto altezza/diametro (tipicamente da 5:1 fino a 20:1 ed eccezionalmente anche oltre), che in relazione alla loro funzione si devono ulteriormente distinguere per modalità di installazione e sistemi di vincolo in:

- Recipienti a sviluppo verticale, direttamente ancorati ad un unico basamento a terra e liberi per tutta l'altezza; questa categoria annovera tipicamente le colonne, molti reattori, molti forni metallurgici, ciminiere autoportanti. Per tutte queste apparecchiature la concentrazione di massa è in genere non grande in virtù di una limitata presenza interna di materiali densi;
- Recipienti a sviluppo verticale, ancorati ad un unico basamento a terra e dotati di vincoli supplementari in posizioni elevate; rientrano in questa categoria talune colonne particolarmente sottili e talune torce, che vengono ingabbiate in strutture reticolari, nonché la maggior parte delle torce e alcuni camini, che vengono sostenuti da uno o più ordini di strallature. La massa complessiva è molto limitata in relazione al volume avendosi al loro interno elevati gradi di vuoto ovvero fluidi gassosi;
- Recipienti a sviluppo orizzontale, sostenuti da due o più appoggi a sella a loro volta fondati al terreno; questa categoria comprende tipicamente i serbatoi di processo e i piccoli e medi serbatoi di stoccaggio pressurizzati, gli scambiatori di calore a fascio tubiero, i forni e gli essiccatori a tamburo rotante.

3.2 Apparecchiature a struttura tozza poggiate direttamente sul suolo

Sono quelle apparecchiature caratterizzate da dimensioni confrontabili nelle tre direzioni e da una elevata concentrazione di massa che viene scaricata in maniera uniformemente distribuita sulla fondazione senza generazione di momenti al vincolo. Si possono distinguere le seguenti tipologie:

- Serbatoi di stoccaggio di grandi dimensioni per liquidi; si tratta di recipienti cilindrici ad asse verticale con rapporto altezza/diametro compreso fra 2:1 e 0,2:1; il fondo è circolare piano

uniformemente appoggiato su una fondazione semplice, mentre la chiusura superiore è costituita da un tetto fisso a falda conica saldato al mantello, oppure da un tetto galleggiante sostenuto dallo stesso liquido immagazzinato; lavorano esclusivamente a pressione atmosferica. La capacità di contenimento varia da poche decine di m³ fino a 200.000 m³. A pieno carico possono presentare una notevole concentrazione di massa. In caso di vibrazioni indotte l'insorgenza di onde nel liquido (sloshing) provoca ulteriori pressioni asimmetriche sulla parete cilindrica che strutturalmente risulta molto sottile rispetto al diametro;

- Grosse macchine operatrici; rientra in questa classe una vasta serie di macchine generalmente dotate di organi meccanici in movimento (pompe, compressori, centrifughe) ma anche statiche.

3.3 Apparecchiature a struttura tozza sostenute in elevazione da elementi snelli discreti

Rientrano in questa categoria alcune specifiche apparecchiature sia di processo che di stoccaggio, quali:

- Recipienti sferici destinati a lavorare sotto pressione. Si tratta essenzialmente di serbatoi di stoccaggio per gas liquefatti, che sono sostenuti sollevati da terra mediante una successione circonferenziale di pilastri metallici saldati al mantello sferico in corrispondenza del piano equatoriale e fondati su singoli plinti collegati fra loro da cordoli in cemento armato. La capacità di contenimento di questi serbatoi arriva comunemente a 5-6000 m³ ma esistono casi fino a 10.000 m³. Il baricentro alto e la snellezza dei pilastri fanno sì che l'instaurarsi di forze orizzontali quali quelle indotte dai sismi determini sollecitazioni flessionali abnormi sui pilastri stessi facilitandone il collasso;
- Serbatoi cilindrici ad asse verticale per lo stoccaggio di gas liquefatti criogenici. La configurazione generale di questi serbatoi, operanti a pressione atmosferica con capacità fino a 25.000 m³, è perfettamente analoga a quella dei grandi serbatoi per liquidi ordinari, richiamata nella categoria precedente. Il fondo non poggia uniformemente sul terreno ma è sostenuto poco al di sopra di esso da una griglia di pilastrini in cemento aventi anch'essi funzione isolante. In caso di sollecitazione da parte di forze orizzontali la limitata altezza dei pilastrini può condurre al collasso per taglio degli stessi;
- Forni di processo e caldaie. Hanno una configurazione semplice e compatta standardizzata nelle forme a scatola con una o più celle di combustione (per le maggiori potenzialità) e cilindrica ad asse verticale (per le potenzialità medio/piccole). Si tratta di strutture in ogni caso di dimensioni e masse significative che devono essere tenute sollevate da terra per la presenza di bruciatori e tubazioni sul fondo che richiedono accesso e manutenzioni; esse sono pertanto supportate da file parallele di pilastri metallici o in cemento armato. L'altezza di tali pilastri (2-3 m) determina in essi, nel caso di sollecitazioni orizzontali, effetti sia di flessione che di taglio. Sostanzialmente simile è la configurazione delle caldaie per la produzione del vapore d'acqua.

3.4 Linee di tubazioni

Benché le tubazioni costituiscano le più tipiche strutture snelle, se ne fa un breve richiamo soprattutto per puntualizzare la complessità che sul piano strutturale può assumere la loro configurazione complessiva dovuta talvolta a forme bi- e tridimensionali con bracci di flessione molto corti, talvolta a vincoli derivanti dalla riunione in fasci e reti o ancora da vincoli espressamente imposti per guidare le deformazioni di origine termica. Ma i punti maggiormente sensibili delle tubazioni sono rappresentati dalle giunzioni flangiate che richiedono guarnizioni deformabili e dall'elevato numero di componenti accessori di linea che su di esse è necessario installare e che costituiscono punti singolari di variazione di resistenza (quali compensatori di dilatazione a soffiato, smorzatori di vibrazioni, eccetera) oppure concentrazioni di masse (quali strumenti di misura, valvole, eccetera a loro volta flangiati). È proprio in corrispondenza di questi elementi di discontinuità strutturale che anche nel normale esercizio si verificano con una certa frequenza trafileamenti con fuoruscita dei fluidi convogliati e tali effetti possono essere fortemente esaltati dalla sovrapposizione di sollecitazioni vibrazionali o comunque cicliche quali quelle di origine sismica.

Tabella 4: Effetti del sisma sulle varie tipologie di apparecchiature di processo, sistemi di monitoraggio e tecniche di protezioni applicabili

Tipologia strutturale	Apparecchiature critiche	Danneggiamenti tipici osservati dovuti al sisma	Altri danneggiamenti possibili	Grandezze di riferimento da monitorare	Indicatori di pericolo	Tecniche di protezione applicabili
Apparecchiature a struttura verticale snella "libere" e ingabbiate	Colonne Reattori Camini Torce	Perdita di fluidi da connessioni flangiate (per esempio per colonna di distillazione: alimentazione, riflusso, al condensatore) Snervamento dei bulloni d'ancoraggio e perdita di stabilità della colonna		Mantenimento dell'assetto della colonna rispetto alle tubazioni ad essa connesse	Perdita di contenimento: rilascio di miscele infiammabili e/o esplosive o tossiche	Collegamento della struttura verticale snella con una struttura adiacente con diverso periodo caratteristico Irrigidimento mediante gabbie reticolari dotate di elementi dissipativi (Accoppiamento dissipativo)
Apparecchiature a struttura tozza poggiata al suolo	Serbatoi di grandi dimensioni a tetto fisso e a tetto galleggiante	Fenomeno del buckling Rottura all'interfaccia fondo-mantello in corrispondenza della saldatura Tetto galleggiante contro il mantello Cedimento del terreno attorno e sottostante il serbatoio con conseguente collasso dello stesso	Perdita totale di contenimento a seguito di eccessivi stress sul mantello	Geometria del serbatoio, stato delle superfici. Interfaccia fondo mantello	Perdita di contenimento: una quantità anche minima di sostanza infiammabile può generare un incendio che può coinvolgere il serbatoio stesso (impingement) e per effetto domino altri serbatoi limitrofi	L'isolamento alla base riduce il buckling e la sollecitazione all'interfaccia fondo-mantello. Per la sollecitazione residua si può prevedere un irrigidimento del mantello in corrispondenza del tetto e del fondo Elementi dissipativi distanziatori Tetto-mantello Tecnica tradizionale: consolidamento terreno mediante palificazione
Apparecchiature a struttura tozza sostenute in elevazione da elementi discreti	Sfere Forni di processo Serbatoi criogenici isolati da terra Serbatoi piezometrici in calcestruzzo	Cedimenti del mantello in corrispondenza dell'attacco delle zampe dovuti a deformazioni delle zampe stesse che determinano una sollecitazione diretta contro l'involucro Collasso della struttura causata dal cedimento di una o più zampe Cedimento della struttura di sostegno, possibile collasso del camino sovrastante, possibile distacco delle tubazioni vincolate o sospese, possibile distacco del refrattario	Perdite di sostanza (fluido di processo che viene riscaldato e combustibile) da tubazioni. Si possono generare situazioni di non controllo dei limiti di esplosività all'interno del forno	Stato di tensione nelle zampe e nei controventi Assetto del forno e degli accessori, stato dei pilastri di sostegno del forno	Perdita di contenimento. Rottura di uno o più controventi, cedimento delle zampe Perdite di contenimento, sversamenti di sostanza infiammabile, variazione dei parametri di controllo quale la pressione su i sistemi DCS	Controventi dissipativi Collegamento della sfera con una struttura di diverso periodo caratteristico Isolamento dissipativo Controventi dissipativi Tecniche di isolamento alla base Collegamento dissipativi sfera con struttura ausiliaria di diverso periodo Isolamento alla base degli elementi di supporto o dell'interfaccia elementi di supporto/fondo Controventi dissipativi Accoppiamento dissipativo

4.0 TECHICHE DI PROTEZIONE DI STRUTTURE ADIACENTI IN IMPIANTI

Negli impianti dell'industria di processo è frequente che, a livello di disposizione delle unità operative, apparecchiature di processo come colonne, reattori, serbatoi e/o raggruppamenti di varie apparecchiature e componenti funzionali su rack si trovino relativamente vicine tra loro. Queste situazioni sono molto interessanti poiché permettono l'applicazione della metodologia di controllo dell'accoppiamento dissipativo [6] delle strutture, la quale ha già mostrato in diversi studi di carattere teorico-numerico e anche sperimentale, la propria efficacia nella riduzione della risposta dinamica [8,9]. La situazione strutturale assunta ad oggetto del presente caso studio è tipica e ricorrente in impianti industriali, ed è costituita da un colonna *Vacuum Flash* facente parte di un impianto di *Thermal Cracking* di una raffineria (figura 1).

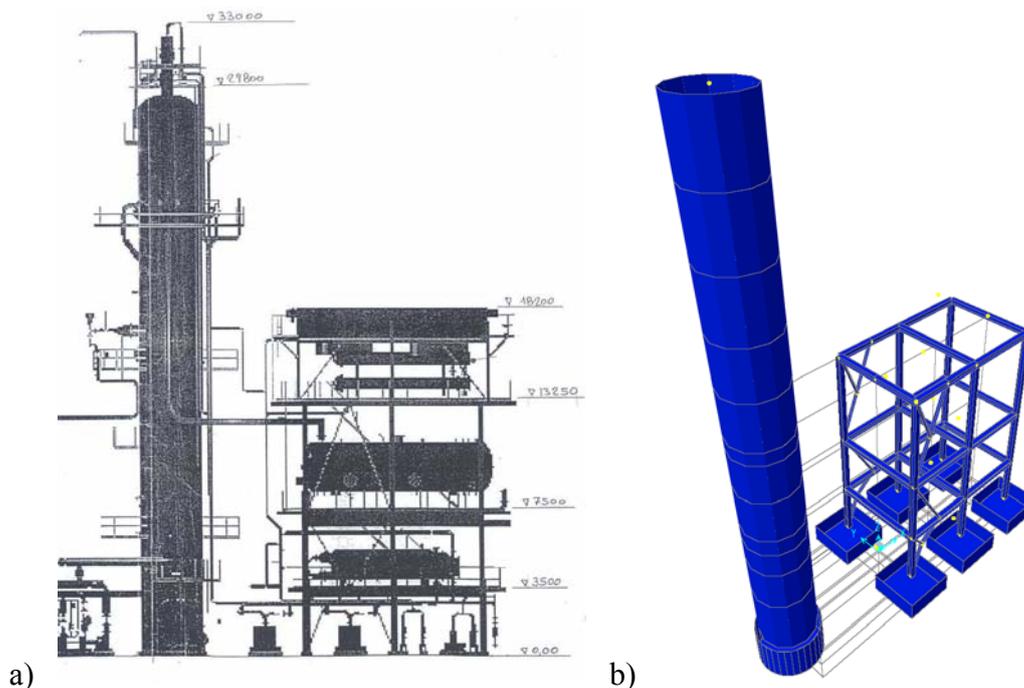


Figura 1. Vista d'insieme della colonna e del telaio: a) foto, b) modello 3D agli elementi finiti

La colonna è costituita, ai fini della modellazione strutturale, da un cilindro cavo in acciaio in parete sottile, alto circa 28 m, di diametro di circa 3.20 m e spessore variabile da 20 a 12 mm. Affiancato a tale colonna, ad una distanza di circa 7 m e ad essa collegato da un certo numero di tubazioni, si trova un telaio in acciaio di tre piani usato per sostenere apparecchiature di servizio all'impianto. In particolare il telaio, che ha ingombro in pianta di 9 x 5.50 m e altezza complessiva di circa 18 m, al primo livello (quota 3.50 m) sostiene un generatore di vapore, al secondo livello (quota 7.50 m) sostiene un gruppo da vuoto e infine al terzo livello (quota 13.25) sostiene altre apparecchiature. Il telaio è formato a sua volta da due telai, distanziati di 5.50 m, a due campate a ritzi pendolari, la cui resistenza alle azioni orizzontali è garantita soltanto dai controventi. Nell'altra direzione sono presenti tre telai ad una campata a nodi rigidi, con interasse di 4.50 m, caratterizzati da una più elevata rigidità e resistenza alle azioni orizzontali. Per le fondazioni delle due strutture si è assunto che siano formate da una unica piastra in c.a. molto rigida, cui sono fissati sia il telaio che la colonna.

I possibili incidenti a seguito di un evento sismico sono legati al verificarsi di perdite di contenimento in corrispondenza di connessioni flangiate (alimentazione, riflusso, al condensatore, nelle tubazioni in generale, ecc.) o il danneggiamento strutturale della colonna (ad esempio in corrispondenza delle unioni alla base), con conseguente rilascio nell'ambiente di miscele infiammabili e/o tossiche. Ciò può avvenire ben prima che le strutture di sostegno raggiungano il limite del collasso.

A tale proposito gli indicatori di pericolo, che permettono di identificare le grandezze di risposta che devono essere limitate durante l'evento sismico, sono di fatto rappresentati dal mantenimento dell'assetto della colonna e del telaio fra loro e rispetto alle tubazioni ad essi connesse. Ciò indica chiaramente che oltre ad una verifica in termini di resistenza ultima delle strutture (collasso), è necessario effettuare una verifica in

termini di spostamenti massimi dell'insieme. Dal punto di vista strutturale appare evidente l'esigenza di non mobilitare la duttilità strutturale, ma di considerare lo stato limite ultimo quale uno stato limite elastico, cioè considerare la struttura in sicurezza soltanto se in assenza totale di danno strutturale.

Ciò è ulteriormente richiesto dalla considerazione che sia la colonna che il telaio, quest'ultimo almeno nella direzione debole X, sono in pratica strutture isostatiche che hanno una limitata capacità di assorbire il danneggiamento, potendo contare solo sulla duttilità di sezione degli elementi (alla base) che plasticizzano per primi, e non sulla duttilità di struttura attivabile solo in presenza di risorse iperstatiche.

4.1 Modellazione delle strutture

La modellazione del sistema strutturale, e le relative analisi lineari e non lineari, sono state effettuate mediante il programma di calcolo agli elementi finiti SAP2000.

Tabella 5. Modellazione masse: a) colonna, b) telaio

H	$M_x = M_y$	M_t
<i>m</i>	<i>kNs²/m</i>	<i>kNms²</i>
0	6.45	16.698
3.50	11.06	28.626
6.00	14.61	37.803
7.50	5.4	13.974
8.50	7.84	20.279
11.00	10.64	27.522
13.25	6.72	17.382
14.00	7.5	19.41
16.60	11.65	30.129
19.20	12.54	32.447
22.20	13.44	34.764
25.20	13.44	34.764
28.20	6.72	17.382
Totale	128.01	

a)

H	$M_x = M_y$	M_t
<i>m</i>	<i>kNs²/m</i>	<i>kNms²</i>
3.500	96.1	890.6
7.500	128.1	1187.4
13.250	96.1	890.6
Totale	320.3	

b)

Per l'acciaio considerato si ipotizzano i seguenti parametri deformativi e di resistenza: Modulo di elasticità normale: $E = 206000 \text{ N/mm}^2$; Modulo di elasticità tangenziale: $G = 80000 \text{ N/mm}^2$; Coefficiente di Poisson: $\nu = 0.3$; Resistenza ultima a rottura: $f_t = 510 \text{ N/mm}^2$; Resistenza a snervamento: $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$; Resistenza di calcolo: $f_d = 355 \text{ N/mm}^2$, per spessori $t = 40 \text{ mm}$; Tensione ammissibile: $\sigma_{adm} = 240 \text{ N/mm}^2$, per spessori $t = 40 \text{ mm}$. Per quanto riguarda lo smorzamento strutturale, questo è stato convenzionalmente assunto pari al 3% dello smorzamento critico per i primi due modi in ciascuna delle direzioni principali.

La colonna è stata modellata con elementi trave monodimensionali a sezione tubolare. Per quanto riguarda la modellazione delle masse, si è considerato che in esercizio la massa totale della colonna sia pari a 128 tonnellate, di cui 24 t attribuibili ai fluidi. In particolare per quanto riguarda la massa attribuibile ai fluidi, 7.235 t sono attribuibili alla fase liquida, ipotizzata concentrata a quota 6.000 m, e la restante parte 16.765 t è attribuibile al vapore, ipotizzata equamente distribuita a partire dalla quota 7.500 m. La massa attribuibile alle strutture, 104 t, tiene conto di tutte le apparecchiature installate nella colonna (piatti, tubazioni, ecc.), ed è stata equamente distribuita lungo tutta l'altezza della colonna. La tabella 5a riporta la distribuzione risultante delle masse traslazionali (M_x e M_y) e rotazionali (M_t) e la quota a cui sono posizionati i corrispondenti nodi.

Il telaio è stato modellato con elementi trave monodimensionali con sezione a doppio T del tipo HEA. Per quanto riguarda la modellazione dei controventi inseriti nel telaio in direzione Y, data la loro snellezza (sono costituiti da due profili L110x10 affiancati), se ne considera un modello valido in grandi spostamenti, in cui si considerano attivi soltanto i controventi tesi. Gli impalcati si considerano rigidi nel proprio piano.

Per quanto riguarda la modellazione delle masse si assume che la massa totale del telaio in esercizio (comprensivo quindi di apparecchiature installate) è pari a 320.2 t, di cui 165.8 t da attribuire alle attrezzature installate. Queste ultime masse si considerano permanentemente installate sul telaio nella

condizione di esercizio. Per quanto riguarda la distribuzione delle masse nel piano, queste si considerano simmetricamente disposte rispetto al baricentro geometrico della pianta del telaio; pertanto il baricentro delle masse coincide con il centro geometrico della pianta del telaio. Gli impalcati sono considerati rigidi nel proprio piano; le masse traslazionali, M_x e M_y , e rotazionali, M_r , sono riportate nella tabella 5b.

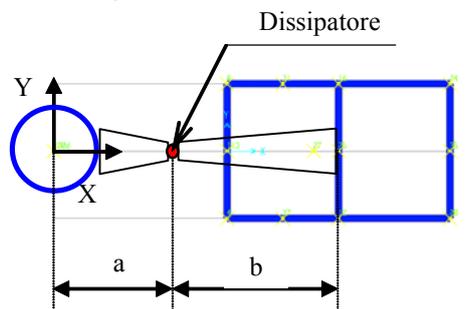


Figura 2. Pianta colonna-telaio con posizione dissipatore

Per quanto riguarda il posizionamento reciproco di telaio e colonna, quest'ultima risulta disposta in corrispondenza del piano medio del telaio, e la distanza fra il baricentro della colonna e quello del telaio è di $a+b=11\text{m}$ (figura 2). Nella modellazione si è assunta trascurabile la rigidità e resistenza delle condutture e tubazioni che collegano fra loro e col terreno le due strutture.

4.2 Analisi dei risultati

Nelle analisi numeriche lineari e non-lineari l'accelerazione convenzionale massima del suolo a_g si è assunta pari a 0.35 g che, per le strutture di classe 2 ("industrie con attività pericolose per l'ambiente", D.M. 14.09.05 p.2.5), rappresenta il valore di riferimento per la zona sismica 2.

Ai fini della funzionalità e sicurezza degli impianti e delle apparecchiature (comprese le tubazioni ed in generale le apparecchiature di contenimento dei fluidi), appare significativo valutare gli spostamenti rispetto al terreno di colonna e telaio, gli spostamenti relativi fra le due strutture, e le accelerazioni assolute. In particolare le grandezze sono riferite alle sommità della colonna e del telaio, e all'altezza intermedia della colonna in corrispondenza della sommità del telaio; lo spostamento relativo fra le due strutture è valutato in corrispondenza del terzo piano del telaio (quota 13.250 m).

I risultati ottenuti mostrano una incompatibilità con i requisiti di sicurezza e funzionamento delle attrezzature. Infatti gli spostamenti orizzontali della colonna (struttura sufficientemente rigida) sono relativamente modesti, dell'ordine di 8 cm, quelli del telaio sono, invece, assolutamente incompatibili con le attrezzature installate, poiché dell'ordine di 34 cm in direzione X e 26 cm in direzione Y. Anche gli spostamenti relativi fra le due strutture (35 e 28 cm rispettivamente in direzione X ed Y) sono tali da compromettere i collegamenti. Anche le accelerazioni assolute raggiungono valori decisamente alti (e difficilmente compatibili con la richiesta di assenza di danno e mantenimento in funzionalità delle apparecchiature installate), specialmente per la colonna che subisce accelerazioni di oltre 1.35 g in sommità, ma anche per il telaio che mostra accelerazioni di 0.8 e 1.2 g rispettivamente in direzione X ed Y.

In conclusione dalle analisi numeriche è emerso chiaramente che: *i*) i valori degli spostamenti e delle accelerazioni assolute risultano decisamente incompatibili con le attrezzature e le apparecchiature installate; *ii*) l'elemento critico del sistema, dal punto di vista della resistenza strutturale, è costituito dal telaio.

Si è pertanto valutato il valore massimo delle accelerazioni al suolo a_g che non producono danni strutturali nel telaio; in particolare è risultata nella direzione X pari a 0.068g , mentre nella direzione Y pari a 0.120g .

Dai risultati ottenuti appare evidente che lo studio dell'intervento di miglioramento della sicurezza dell'impianto, per mezzo di collegamenti dissipativi, avrà il duplice scopo di innalzare il valore massimo dell'accelerazione al suolo che non produce danni nel telaio, e di rendere compatibili spostamenti ed accelerazioni con l'agibilità e il funzionamento delle apparecchiature senza dar quindi luogo a incidente rilevante.

4.3 Proposta e progettazione dell'intervento mediante collegamento dissipativo

La proposta di intervento consiste nel collegare le due strutture all'altezza del terzo livello del telaio. Si ipotizza che il collegamento venga effettuato mediante un dissipatore in acciaio elastoplastico bi-direzionale.

Il modello non lineare isteretico assunto per il dissipatore è quello di Bouch-Wen [9]. In termini realizzativi, il dissipatore si collegherà alle due strutture per mezzo di travi reticolari da assumersi in questa fase come infinitamente rigide nel piano orizzontale. Schematicamente la situazione descritta e la posizione del dissipatore nel piano X-Y è mostrata nella figura 2. Il posizionamento del dissipatore e le caratteristiche meccaniche in termini di rigidità e resistenza, sono state oggetto di ottimizzazione.

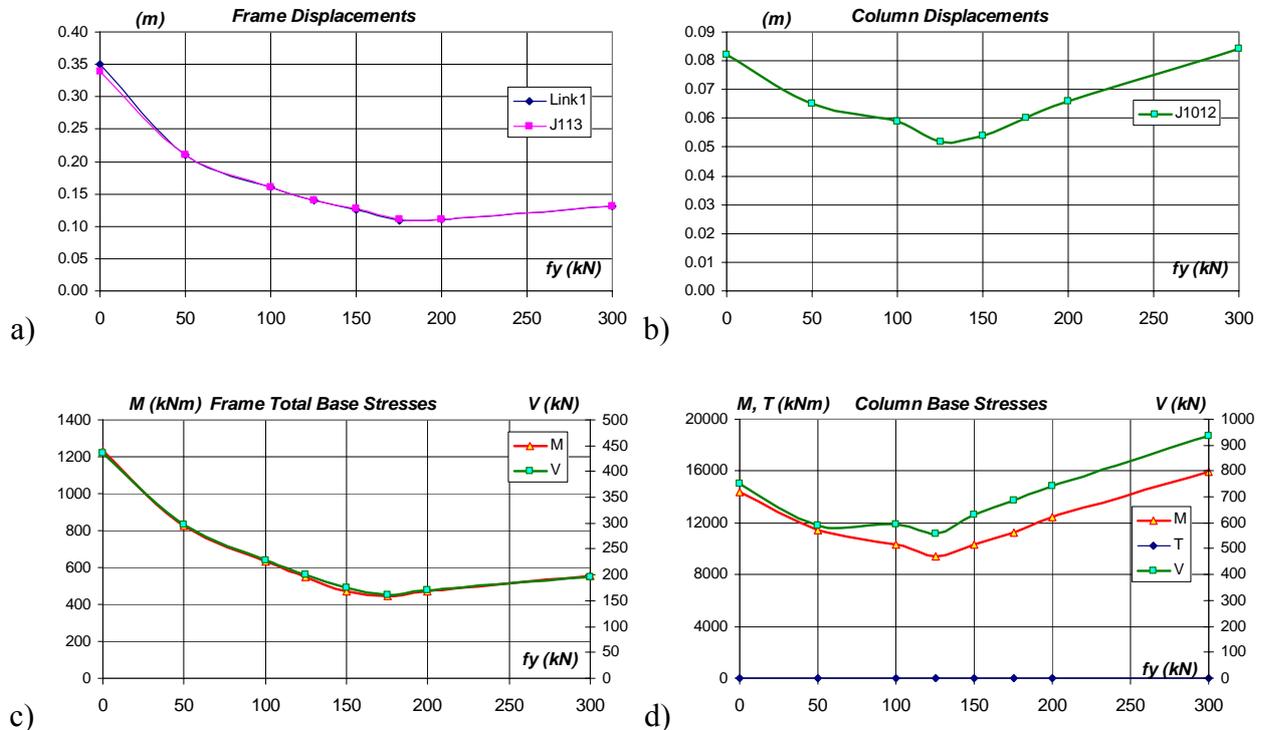


Figura 3. Grandezze di risposta al variare di f_y . Sisma in direzione X

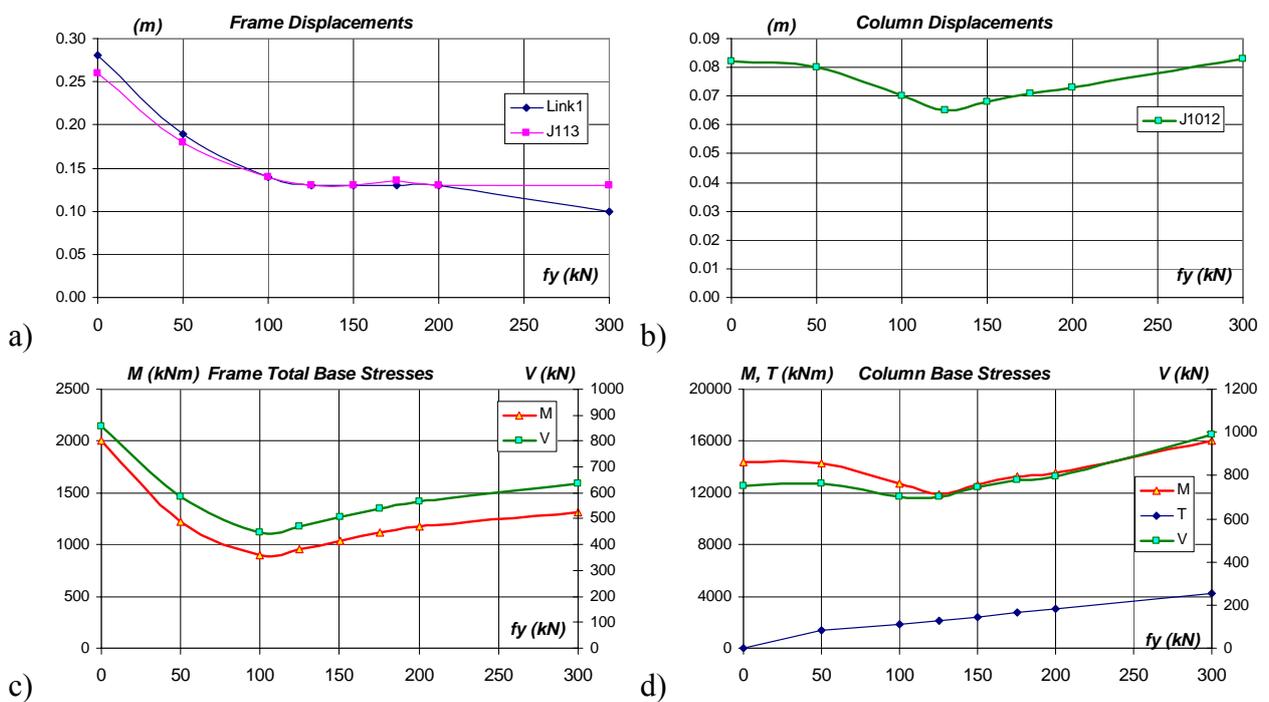


Figura 4. Grandezze di risposta al variare di f_y . Sisma in direzione Y

Mentre nella direzione X il posizionamento del dissipatore non modifica il comportamento piano del sistema colonna-telaio nella direzione Y (figura 4) il sistema non avrà un comportamento piano nella direzione X in quanto verranno trasmessi sia alla colonna che al telaio dei momenti torcenti. Poiché l'elemento più critico è il telaio, appare opportuno disporre il sistema di controllo in modo da conferire proprio ad esso le sollecitazioni aggiuntive dovute alla torsione più basse possibili, pertanto si è assunto $b = 0$.

Nel progettare le caratteristiche meccaniche del dissipatore si è utilizzato un metodo di progetto semplificato basato sulla massimizzazione di un opportuno indice energetico [8]. Applicando tale metodo nelle due direzioni, e considerando per il dissipatore una rigidità elastica iniziale $k = 30000$ kN/m e un incrudimento dell'1%, si è ottenuto $f_{y,opt} = 160$ kN per la direzione X, e $f_{y,opt} = 100$ kN per la direzione Y. Tali valori sono stati verificati mediante analisi numeriche di tipo parametrico.

Le figure 3 e 4 pertanto riassumono, rispettivamente per sisma in direzione X ed Y, gli andamenti delle grandezze di risposta per la colonna e il telaio, in funzione del valore assunto per la soglia di plasticizzazione f_y . In particolare le figure (a) riportano gli spostamenti del telaio (*J113*) e quelli relativi fra telaio e colonna (*Link1*); le figure (b) riportano invece lo spostamento in sommità della colonna (*J1012*); le figure (c) riportano le somme dei tagli V e momenti M alla base del telaio ed infine le figure (d) riportano il taglio (V), momento flettente (M) e torcente (T) alla base della colonna.

In entrambe le direzioni è possibile apprezzare l'efficacia del collegamento dissipativo, al variare della forza di plasticizzazione, sia per la colonna che per il telaio. Si osserva in particolare che per la direzione X le sollecitazioni minime per il telaio si ottengono per $f_y = 175$ kN (figura 3c); in corrispondenza di questo valore, le sollecitazioni del telaio risultano ridotte del 65% rispetto alla situazione non controllata, mentre lo spostamento in sommità del telaio e lo spostamento relativo fra colonna e telaio sono addirittura ridotti del 70% (figura 3a). L'osservazione delle altre figure mostra che tali significativi benefici in termini di sicurezza del telaio si accompagnano a riduzioni anche nelle sollecitazioni (figura 3d) e spostamenti (figura 3b) della colonna (rispettivamente nell'ordine del 20-25%). Considerazioni del tutto analoghe possono essere effettuate anche per sisma in direzione Y, (figura 4), in tal caso il valore ottimale della forza di plasticizzazione f_y è pari a 100 kN (figura 4c); le corrispondenti riduzioni in termini di sollecitazioni e spostamenti del telaio (figure 4c e a) sono pari al 50-55%; le sollecitazioni (figura 4d) e spostamenti (figura 4b) della colonna, in corrispondenza del valore ottimale di f_y sono pari rispettivamente al 10% e 15% rispetto alla situazione non controllata.

L'efficacia dell'intervento di controllo mediante il collegamento dissipativo si è valutata innanzitutto verificando la risposta strutturale (e il conseguente livello di sicurezza) che si ottiene in corrispondenza dell'azione sismica di riferimento, 0.35g, confrontando quindi tali risultati con i corrispondenti ottenuti in assenza di collegamento. Dal confronto con quanto riportato per il caso in assenza di collegamento, si osserva come gli spostamenti in sommità del telaio si riducano da 34 cm e 26 cm, rispettivamente in direzione X ed Y, a 11 cm e 14 cm, con riduzioni addirittura del 70% e del 50% rispettivamente. Anche gli spostamenti in sommità della colonna si riducono dal valore di circa 8 cm (per entrambe le direzioni) in assenza di collegamento, ai valori di 6 e 7 cm rispettivamente in direzione X ed Y, con miglioramenti del 25% e 15% rispettivamente. Per quanto riguarda, inoltre, gli spostamenti relativi fra le due strutture, questi passano da 35 e 28 cm nelle due direzioni a 11 e 14 cm, con riduzioni di oltre il 70% ed il 50%.

È evidente che gli spostamenti ottenuti nel caso di collegamento dissipativo, di gran lunga diminuiti soprattutto per il telaio, sono in questo caso decisamente più compatibili con le apparecchiature e le tubazioni installate nell'impianto. Lo stesso si può affermare per quanto riguarda le accelerazioni assolute che risultano praticamente invariate per la colonna in sommità, ma che si riducono sensibilmente per il telaio da 0.8g e 1.2g nelle due direzioni a 0.5g e 0.8g rispettivamente (con riduzioni del 30-40% circa).

Per quanto riguarda il telaio si osserva che, come il caso di assenza di collegamento, per il sisma di riferimento, 0.35g, le verifiche non sono soddisfatte. Ciò che è però importante osservare è che l'impegno degli elementi del telaio è sensibilmente ridotto rispetto al caso di assenza di collegamento dissipativo. Infatti, per sisma in direzione X (direzione "debole" del telaio), l'impegno si è ridotto di circa il 60%, mentre per sisma in direzione Y si è ridotto di circa il 50%. Appare quindi evidente il miglioramento nella sicurezza del telaio dovuta al collegamento dissipativo proposto.

4.4 Valutazione della resistenza massima del telaio con collegamento dissipativo

Analogamente a quanto fatto nel caso senza collegamento, appare utile concludere anche questa discussione sulla sicurezza dell'impianto una volta adeguato con il collegamento dissipativo proposto, con la valutazione

della massima resistenza del telaio per azioni sismiche, valutata per mezzo della massima accelerazione del sisma di progetto per la quale si realizza la condizione di assenza di danno. In particolare si è ottenuto come valore limite di a_g nella direzione X 0.20g, mentre nella direzione Y 0.28g. Le corrispondenti forze ottimali di plasticizzazione del dispositivo dissipativo ottenute sono di 100 kN e 80 kN rispettivamente nella direzione X e Y. Dal confronto con le corrispondenti accelerazioni a_g ottenute in assenza di collegamento, appare evidente l'efficacia del collegamento dissipativo nell'aumentare la resistenza sismica del telaio. Infatti con il collegamento dissipativo installato, il telaio è in grado di sopportare, senza danno, eccitazioni sismiche ben 3 volte maggiori nella direzione X (quella "debole" del telaio), mentre nell'altra direzione (direzione Y) può sopportare sismi 2.3 volte maggiori.

5.0 CONCLUSIONI

Il caso studio ha mostrato l'applicabilità e l'efficacia dell'uso di tecniche di controllo passivo, basate sull'accoppiamento dissipativo di strutture adiacenti, nel campo degli impianti industriali, nell'applicazione ad una situazione strutturale tipica e ricorrente costituita da una colonna di distillazione (colonna di *vacuum flash*) affiancata da un telaio che sostiene apparecchiature di servizio del processo.

In particolare è stata dimostrata l'efficacia del collegamento dissipativo con benefici in termini sia di sicurezza rispetto al collasso delle strutture, sia di una sostanziale e generalizzata riduzione degli spostamenti ed accelerazioni rispetto alla situazione non controllata, il che aumenta decisamente la sicurezza dell'impianto rispetto a possibili malfunzionamenti o perdite di contenimento che potrebbero innescare incidenti rilevanti pur senza che le strutture portanti giungano a collasso.

RIFERIMENTI

1. Cruz, A.M., Steinberg, L.J., Vetere-Arellano A.L., Nordvik, J.P. and Pisano, F. State of the Art in Natech (Natural Hazard Triggering Technological Disasters) in Europe, DG Joint Research Centre, European Commission and United Nations International Strategy for Disaster Reduction, Ispra 2004.
2. Ineris, Risques naturels et environnement industriel, France, 2001
3. Vetere-Arellano, A.L., Cruz, A.M., Nordvik, J.P. and Pisano F., Proceedings: NEDIES Workshop Analysis of Natech (Natural Hazard Triggering Technological Disaster) Disaster Management. Report EUR 21054 EN, DG Joint Research Centre, European Commission, Ispra 2004.
4. Showalter, P. and Myers, M., Natural disasters as the cause of technological emergencies: A review of the decade 1980-1989, Natural Hazards Research Working Paper 78. Boulder, CO: Natural Hazards Research and Applications Information Center, University of Colorado 1992.
5. Moat, A.M., Morrison A.J.T. and Wong S., Performance of Industrial Facilities during 1999 Earthquakes: Implications for Risk Managers, EuroConference 2000 "Global Change and Catastrophe Risk Management: Earthquake Risks in Europe", Laxenburg, Austria 2000.
6. Ciampi, V. and Addessi, D., Ongoing studies for the application of innovative anti-seismic techniques to chemical plant component in Italy, 7th International Seminar on seismic Isolation, passive Energy Dissipation and Active Control of Vibration of Structures, Assisi, 2001.
7. Ciampi, V., De Angelis, M., Di Cave S., Lucone, L.G. and Ciucci, M., Passive control for seismic protection of critical components in industrial process plants, In: 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, BC, Canada, paper n. 1836, 2004;
8. Basili, M., De Angelis, M. and Ciampi, V., Dimensionamento ottimale di dispositivi dissipativi isteretici a collegamento di strutture adiacenti sottoposte ad eccitazione alla base, Meccanica Stocastica 04, Convegno nazionale del gruppo AIMETA di meccanica aleatoria e affidabilità strutturale. Pantelleria, 2004.
9. Ciampi, V., De Angelis, M. and Renzi E., Passive and semi-active control of the seismic response of structures, In: Recent Research Developments in Structural Dynamics, Editor: A. Luongo. Research Signpost, Kerala, India, p.225-254, 2003.
10. Wen, Y.K., Method for Random Vibration of Hysteretic Systems, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 102, No. EM2, 1976.