

UN CASO STUDIO DI UN SISTEMA DI ISOLAMENTO SISMICO PER UN SERBATOIO DI STOCCAGGIO DI GAS LIQUEFATTO

A. MARTELLI, M. FORNI, A. POGGIANTI *
T. SANO', A. PUGLIESE **
V. CIAMPI, D. ADDESSI ***

*ENEA, **ANPA, ***Università di Roma 'La Sapienza'

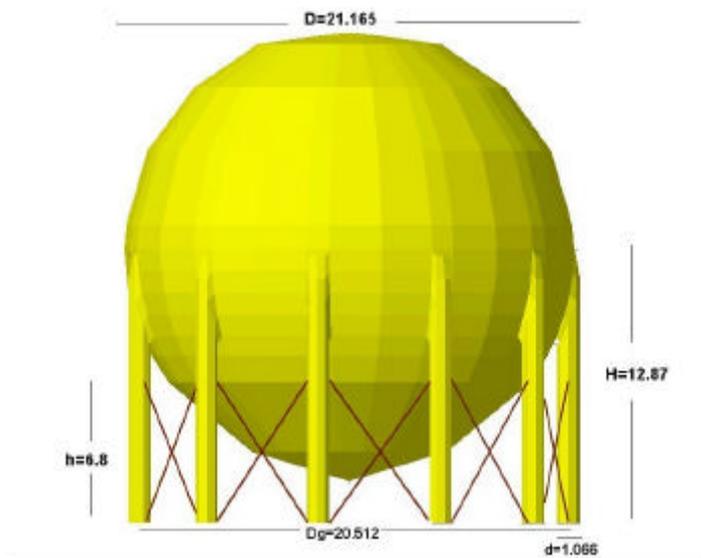
Obiettivo del presente lavoro è l'analisi dell'applicabilità di tecniche di protezione speciale in ambito sismico ad un componente tipico di un impianto industriale. In particolare, si analizzano e si confrontano differenti soluzioni basate sulla logica del controllo passivo della risposta strutturale ai sismi. Tali soluzioni prevedono l'impiego di isolatori collocati alla base della struttura, ovvero di dispositivi di dissipazione disposti alla base, o all'interno di essa. Al fine di individuare la tecnica di protezione più efficace relativamente al caso studio, si eseguono analisi preliminari su modelli semplificati ad un solo grado di libertà, che forniscono indicazioni approssimate riguardanti il controllo delle forze e degli spostamenti ottenuto mediante l'utilizzo dei diversi sistemi. Si presentano, successivamente, i risultati di analisi più accurate agli elementi finiti che confermano le indicazioni ottenute con le analisi semplificate e forniscono informazioni più dettagliate riguardo ai valori delle sollecitazioni e delle deformazioni locali.

1. INTRODUZIONE

In questo lavoro si riferisce sui risultati di un programma di ricerca condotto in collaborazione dall'ANPA, dall'ENEA e dall'Università di Roma 'La Sapienza', nell'ambito di un progetto biennale dal titolo 'Valutazione dell'applicabilità dell'Isolamento Sismico alla Protezione Sismica di Componenti di Impianti Industriali', proposto al Gruppo Nazionale per la Difesa dai Rischi Chimico, Industriale ed Ecologico e finanziato dal CNR. In particolare, nel primo anno di attività, il programma si è articolato nelle seguenti fasi: identificazione di un componente tipico, analisi del componente, definizione dei criteri di scelta del moto vibratorio di progetto, definizione dei requisiti strutturali e funzionali del sistema di isolamento sismico.

Come componente tipico di cui studiare il comportamento al sisma, si è scelto un serbatoio in acciaio per butano liquefatto. Mediante analisi semplificate su modelli equivalenti ad un solo grado di libertà, supportate da modellazioni più sofisticate agli elementi finiti, si sono indagati e si sono messi a confronto diversi sistemi di protezione, basati sul controllo passivo della risposta strutturale al sisma. In particolare, si sono considerati i sistemi di isolamento alla base, di tipo convenzionale e non, e i sistemi basati sull'incremento della dissipazione energetica all'interno delle strutture.

2. DESCRIZIONE DEL COMPONENTE



Allo scopo di analizzare e confrontare le potenzialità e le possibilità applicative di alcuni interventi di protezione speciale in ambito sismico di componenti di impianti industriali, si è scelto, come oggetto delle indagini, un serbatoio sopraelevato in acciaio per lo stoccaggio di gas allo stato liquefatto. La struttura è costituita da un corpo sferico sostenuto da undici colonne cilindriche, collegate mediante controventi a croce di tipo tradizionale. In figura 1 è riportato lo schema del serbatoio, nel quale sono indicate le dimensioni adottate per esso. Le caratteristiche geometriche della struttura sono le seguenti:

Figura 1. Schema del serbatoio.

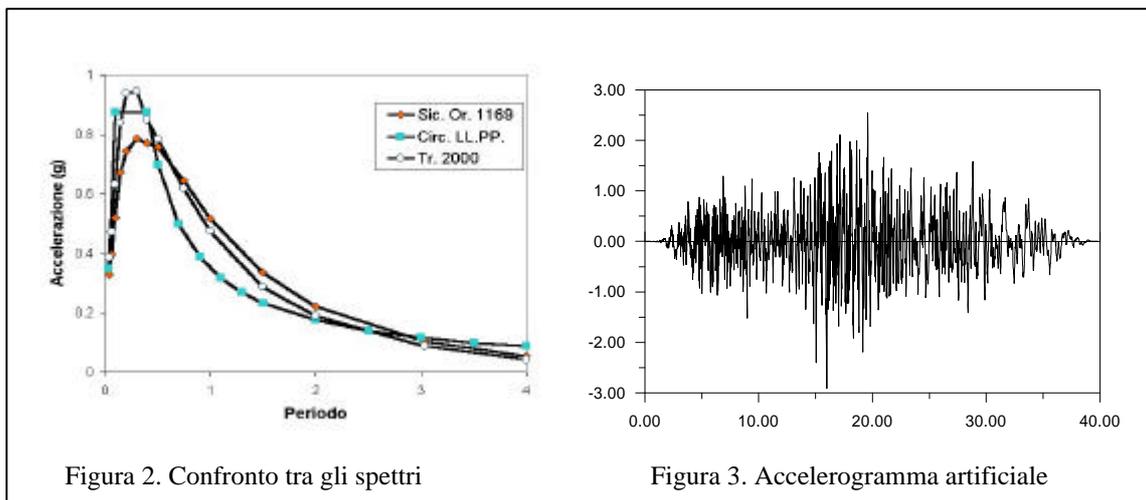
- diametro esterno del serbatoio	$D = 21.165 \text{ m}$
- diametro della circonferenza contenente i centri delle colonne	$D_g = 20.512 \text{ m}$
- spessore della lamiera del serbatoio	$s_s = 0.022 \text{ m}$
- distanza del centro della sfera dal suolo	$H = 12.870 \text{ m}$
- diametro esterno delle colonne	$d = 1.0660 \text{ m}$
- spessore della lamiera delle colonne	$s_c = 0.0095 \text{ m}$
- altezza delle colonne	$L = 12.500 \text{ m}$
- quota delle diagonali	$h = 6.810 \text{ m}$
- area delle diagonali	$A_d = 9.62E-4 \text{ m}^2$

3. DEFINIZIONE DELLE AZIONI

Si assume che la struttura in oggetto sia soggetta al carico verticale dovuto al peso proprio e al liquido in essa contenuto, e all'azione del sisma. Per quanto riguarda le azioni verticali, si considerano tre diverse condizioni di carico, relative ai casi di serbatoio vuoto, pieno al 40% e pieno al 80%. Assumendo che il gas contenuto nel serbatoio sia butano liquefatto, caratterizzato da una densità γ pari a 6 kN/m^3 , in corrispondenza delle tre condizioni di carico si hanno i seguenti valori del peso:

- serbatoio pieno al 80% (condizione 1): $P = 26520 \text{ kN}$
- serbatoio pieno al 40% (condizione 2): $P = 14810 \text{ kN}$
- serbatoio vuoto (condizione 3): $P = 3100 \text{ kN}$

Per quanto riguarda la definizione dell'azione sismica, si fa riferimento alle "Linee guida per la progettazione, esecuzione e collaudo di strutture isolate dal sisma" redatte dal Servizio Tecnico Centrale della Presidenza del Consiglio Superiore [1]. Le indicazioni fornite dalle Linee guida si confrontano con quelle adottate in altri paesi tecnologicamente avanzati per la progettazione di componenti in zona sismica o di altre strutture strategiche o a particolare rischio. Occorre, innanzitutto, stabilire l'evento sismico in base al quale progettare l'intervento di protezione, ossia definire il periodo di ritorno del moto vibratorio. Poiché la normativa italiana non fornisce indicazioni a proposito, si è deciso di far riferimento ai codici industriali degli USA per gli impianti di stoccaggio e, in particolare, alla National Fire Protection Association (NFPA). Essa prescrive un periodo di ritorno $T_r = 10000$ anni, corrispondente ad una probabilità di superamento dell'evento sismico dello 0.5% in 50 anni. Il passo successivo consiste nella scelta del sito dove si suppone collocata la struttura in esame. Nel caso specifico, si ipotizza che il serbatoio sia situato in una zona della Sicilia orientale, per la quale si effettua un'analisi di hazard. La valutazione dell'hazard utilizzato si basa sul metodo introdotto dal Cornell (1968) [2]. I calcoli si eseguono mediante il codice numerico SESRISK III sviluppato da Bender e Perkins (1987) [3].



In figura 2 è riportato il confronto tra lo spettro in corrispondenza di $T_r = 2000$ (probabilità di superamento del 2.5% in 50 anni), quello della circolare del Ministero dei Lavori Pubblici relativo ad un suolo rigido di seconda categoria e il massimo storico registrato nel sito scelto (Sicilia orientale del 1169) [4]. Poiché lo spettro del massimo storico è molto simile a quello delle Linee guida, si è deciso di utilizzare quest'ultimo e gli accelerogrammi artificiali con esso compatibili, di cui uno è riportato, come esempio, in figura 3. Quattro dei sei accelerogrammi generati hanno una durata di circa 40 s, gli altri due di circa 20 s. Il picco massimo è di 0.25 g. Gli accelerogrammi devono, inoltre, essere moltiplicati per il fattore di importanza $I = 1.4$, prescritto dalla normativa italiana per strutture a rischio.

4. ANALISI DI DIVERSI SISTEMI DI PROTEZIONE SISMICA

4.1. Analisi dinamica semplificata del serbatoio

Al fine di caratterizzare gli aspetti salienti del comportamento dinamico del serbatoio in analisi ed evidenziare gli effetti di potenziali interventi di protezione sismica, è lecito, almeno in una fase preliminare, modellare la struttura mediante un oscillatore semplice ad un solo grado di libertà (figura 4), coincidente con lo spostamento in direzione orizzontale del corpo sferico. La valutazione dell'efficacia dei diversi interventi, nel migliorare il comportamento nei confronti del sisma della struttura in esame, si effettua confrontando i valori che alcune grandezze di risposta globali assumono nei vari casi. In particolare, si porranno a confronto i valori del taglio alla base e dello spostamento relativo subito dalla massa, valutati sull'oscillatore semplice descritto in figura 4, il quale viene integrato con elementi rappresentativi di comportamenti reologici di base che modellano, in relazione della tecnica di intervento analizzata, il sistema di protezione introdotto nella struttura. Le caratteristiche meccaniche dell'oscillatore equivalente sono determinate nel seguente modo:

- la massa $m_s = P/g$, essendo P il peso della struttura e g l'accelerazione di gravità, è una grandezza variabile in corrispondenza delle tre diverse condizioni di carico verticale assunte. Si ha, dunque:
 - condizione 1: $m_s = 2704 \text{ kN}\cdot\text{s}^2/\text{m}$
 - condizione 2: $m_s = 1510 \text{ kN}\cdot\text{s}^2/\text{m}$
 - condizione 3: $m_s = 316 \text{ kN}\cdot\text{s}^2/\text{m}$
- la rigidezza K_s è pari a quella dell'insieme delle undici colonne cilindriche di sostegno. Per la valutazione della rigidezza della singola colonna, si assume uno schema statico a mensola con glifo all'estremità opposta all'incastro, ipotizzando bloccata la rotazione in corrispondenza della testa della colonna. La lunghezza equivalente della mensola si valuta ipotizzando che la massa della struttura sia collocata a metà dell'altezza della zona di collegamento tra il corpo sferico e le colonne. Si assume, quindi, una lunghezza equivalente pari a 10.30 m. I controventi di irrigidimento vengono modellati mediante aste reagenti solo a trazione. Poiché la presenza dei controventi rende il contributo di ciascuna colonna dipendente dalla direzione dell'azione sismica, la rigidezza dell'insieme viene valutata proiettando il contributo di ciascun controvento nella direzione ipotetica assunta per il sisma. Dividendo la rigidezza complessiva, valutata sommando tutti i differenti contributi proiettati lungo la direzione del sisma, per il numero totale delle colonne, si ottiene una rigidezza fittizia media, uguale per tutte, pari a $K_s \cong 16 EI_r / L^3 n_{\text{colonne}} = 148825 \text{ kN/m}$, essendo il modulo elastico dell'acciaio $E = 2.1\text{E}+7 \text{ kN/m}^2$, il momento d'inerzia della sezione anulare della colonna I_r

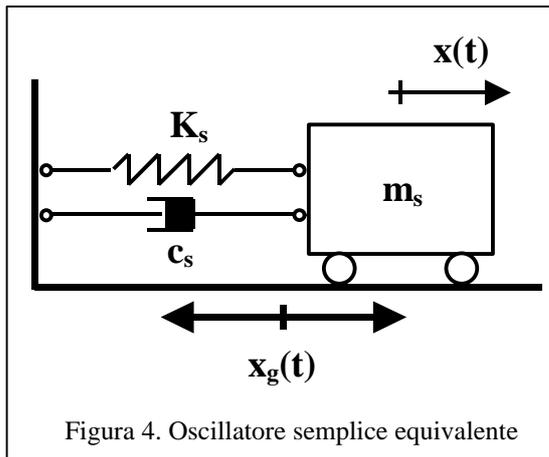


Figura 4. Oscillatore semplice equivalente

$$= 4.4\text{E}-3 \text{ m}^4, \text{ e } n_{\text{colonne}} = 11.$$

- si considera la presenza di una percentuale di smorzamento strutturale ξ_s pari al 2%, dalla quale, in maniera convenzionale, si ricava il valore della costante di smorzamento $c_s = 2 m_s \omega_s \xi_s$.

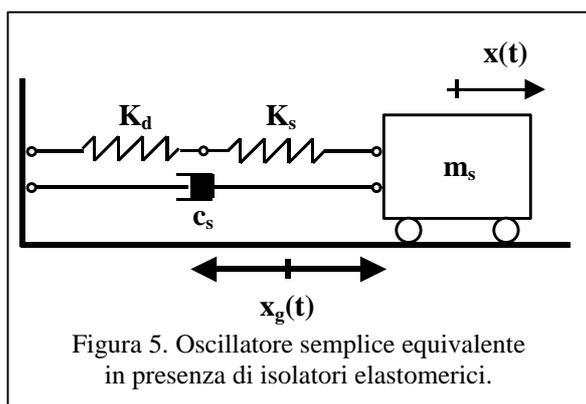
In corrispondenza delle tre condizioni di carico assunte per le analisi, l'oscillatore equivalente è caratterizzato dai seguenti valori del periodo proprio:

- condizione 1: $T_s = 0.84 \text{ s}$
- condizione 2: $T_s = 0.63 \text{ s}$
- condizione 3: $T_s = 0.29 \text{ s}$

Per valutare l'effetto benefico degli interventi di protezione messi a confronto, si analizza, innanzitutto, il comportamento della struttura in condizioni iniziali, ovvero in assenza di protezione. In particolare, si ricavano gli spettri di risposta in accelerazione e in spostamento, ottenuti sottoponendo l'oscillatore semplice ai sei accelerogrammi artificiali spettro-compatibili descritti nel paragrafo 3. In corrispondenza dei periodi propri caratteristici dell'oscillatore, per le tre diverse condizioni di carico analizzate, si valutano i valori dei tagli alla base e degli spostamenti subiti dalla massa riportati nella tabella 1.

condizioni di carico	1	2	3
T (s)	0.84	0.63	0.29
F (kN)	14400	10790	3890
x (m)	0.095	0.055	0.028

Tabella 1. Valori dei tagli alla base e degli spostamenti per la struttura in assenza di protezione.



4.2. Isolamento alla base di tipo convenzionale

Tale tecnica di protezione sismica si basa sullo spostamento del periodo proprio della struttura da proteggere in zone dello spettro di risposta in accelerazione caratterizzate da ordinate più basse. Questo obiettivo si raggiunge interponendo tra la struttura in elevazione e le fondazioni dei dispositivi a comportamento, prevalentemente, di tipo elastico. Occorre sottolineare che, generalmente, questa tipologia di dispositivi viene realizzata con materiali il cui comportamento meccanico non è puramente elastico, ma

caratterizzato da capacità dissipative che vanno ad incrementare lo smorzamento intrinseco della struttura non isolata. E' il caso, ad esempio, dei dispositivi elastomerici ad alto smorzamento. Nelle analisi che seguono si tiene conto del comportamento dissipativo degli isolatori, assumendo una percentuale di smorzamento convenzionale ξ_s più elevata rispetto al caso in assenza di protezione e pari al 5%. Nel modello dell'oscillatore semplice, l'introduzione dei dispositivi elastomerici corrisponde ad aggiungere una molla K_d in serie a quella già esistente K_s (figura 5), che rappresenta la rigidezza delle colonne. La rigidezza globale del sistema, K , risulta pari a quella delle due molle in serie. In figure 7 si riportano gli spettri di risposta in spostamento e in accelerazione, relativi alla media dei risultati ottenuti con i singoli accelerogrammi. Sia gli spostamenti, che le accelerazioni sono normalizzati rispetto al valore massimo dell'accelerazione al suolo. E' evidente dall'analisi dello spettro di risposta in accelerazione che, partendo dai periodi propri che caratterizzano la struttura non isolata a vuoto, a mezzo carico e a pieno carico, la flessibilità aggiuntiva fornita dagli isolatori sposta i periodi, in tutte e tre le condizioni di carico, verso zone dello spettro dove le accelerazioni, e, dunque, i tagli alla base, risultano ridotti. Di contro, si verifica un aumento dello spostamento relativo della massa strutturale rispetto al suolo. Ritenendo che la condizione a pieno carico sia la più gravosa per la struttura, si progetta il sistema di isolamento in modo da spostare il periodo proprio, che caratterizza tale situazione, dal valore iniziale di 0.84 s ad un valore di 3 s. Di conseguenza, il periodo proprio nelle altre due condizioni di carico esaminate passa da 0.63 s a 2.24 s, nella condizione a mezzo carico, e da 0.29 s ad 1 s nella condizione a vuoto. In corrispondenza di tali variazioni del periodo, dagli spettri di risposta (figura 6), si ricavano i valori delle accelerazioni e, dunque, dei tagli alla base, e degli spostamenti subiti dalla massa, riportati nella tabella seguente.

condizioni di carico	1	2	3
T (s)	3.00	2.24	1.00
F (kN)	2900	2250	1000
x (m)	0.243	0.181	0.080

Tabella 2. Valori dei tagli alla base e degli spostamenti per la struttura isolata alla base.

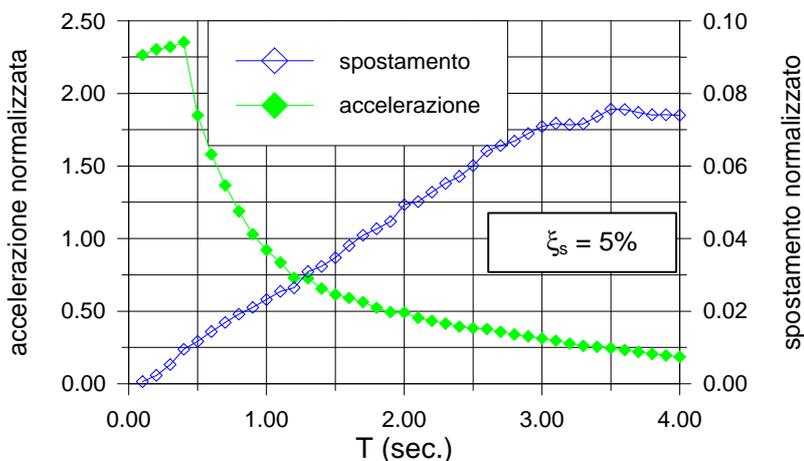


Figura 6. Spettri di risposta in spostamento e in accelerazione dell'oscillatore semplice equivalente.

Ai fini applicativi si può pensare di utilizzare, ad esempio, isolatori di tipo commerciale del tipo mostrato in figura 7. Essi sono costituiti da piastre d'acciaio, di spessore limitato, immerse in una matrice di gomma e a questa collegate mediante vulcanizzazione. La loro caratteristica principale è di avere una rigidità elevata in direzione verticale, ma bassa in senso trasversale. Quest'ultima varia al variare del carico: è alta per bassi valori del carico, come nel caso del vento, e più bassa per carichi più forti, come quello indotti dai terremoti. Progettando gli isolatori in modo da ottenere, come detto, un periodo proprio del serbatoio a pieno pari all'incirca a 3 s, si ricavano le seguenti dimensioni: altezza $H = 274$ mm, diametro $D = 600$ mm.

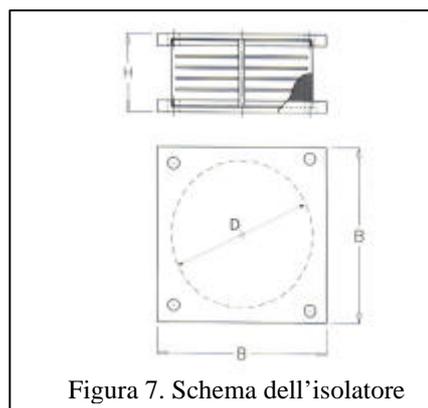


Figura 7. Schema dell'isolatore

4.3. Dissipazione aggiuntiva all'interno delle strutture

L'inserimento nella struttura di dispositivi che ne aumentino le capacità dissipative esercita un effetto benefico sulla risposta, abbattendo le forze che la struttura trasmette in fondazione, e, allo stesso tempo, contenendo gli spostamenti relativi che essa subisce. Dunque, i sistemi di protezione realizzati secondo tale logica [5] costituiscono un'evoluzione rispetto al puro isolamento alla base, in quanto consentono il controllo degli spostamenti, oltre che delle forze. Tale requisito può rivelarsi essenziale in talune tipologie strutturali. Infatti, al crescere dell'energia dissipata dalla struttura, diminuisce la percentuale dell'energia introdotta dal sisma, che resta immagazzinata in essa e che ne causa il danneggiamento. Quindi, i dispositivi di dissipazione, opportunamente collocati, migliorano il comportamento della struttura nei confronti delle azioni sismiche, introducendo meccanismi di dissipazione ulteriori rispetto a quelli già presenti e che, convenzionalmente, si valutano con percentuali di smorzamento viscoso variabili, dell'ordine del $2 \div 5\%$. Il comportamento meccanico dei dissipatori è di vario genere, ed è essenzialmente legato alle proprietà dei materiali che li costituiscono. I dispositivi più comunemente usati si basano su comportamenti di tipo visco-elastico, elasto-plastico e rigido-plastico.

Esistono numerosi esempi di interventi di protezione in ambito sismico basati sul controllo passivo della risposta strutturale mediante dissipazione aggiuntiva. Si distinguono, a tal proposito, le tecniche che prevedono l'incremento delle capacità dissipative intrinseche delle strutture, mediante l'inserimento di dispositivi all'interno di esse, nei punti dove è possibile stimare il verificarsi di spostamenti relativi rilevanti, dai sistemi di intervento alla base, basati sull'inserimento dei dissipatori in corrispondenza dell'attacco tra la struttura e le fondazioni. Un'applicazione tipica della prima tipologia è costituita dalla realizzazione di controventi dissipativi [6], cioè di sistemi di controventamento innovativi (figura 8(a)), che includono speciali dispositivi basati su meccanismi di dissipazione di vario genere (attritivi, isteretici, viscosi). Rispetto ai sistemi tradizionali, i controventi dissipativi mostrano elevate capacità di dissipazione energetica e comportamento stabile sotto le azioni cicliche ripetute indotte dai sismi. Altre tecniche prevedono l'impiego dei dispositivi nel collegamento tra strutture adiacenti di differenti proprietà dinamiche. Potrebbero, ad esempio, per il caso specifico, realizzarsi, esternamente al serbatoio, delle strutture leggere ma di elevata rigidità, da collegare al serbatoio stesso con dispositivi di dissipazione (figura 8(b)); il sistema avrebbe globalmente un effetto simile a quello precedente. Una possibile soluzione di dettaglio potrebbe consistere nella realizzazione di tre strutture reticolari, disposte su una circonferenza esterna al serbatoio ad una distanza angolare di 120° l'una dall'altra, e collegate in corrispondenza di un parallelo al serbatoio mediante dissipatori.

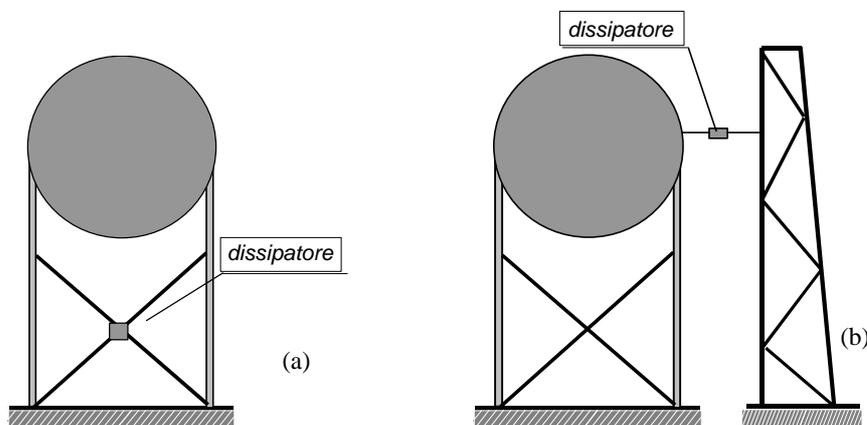
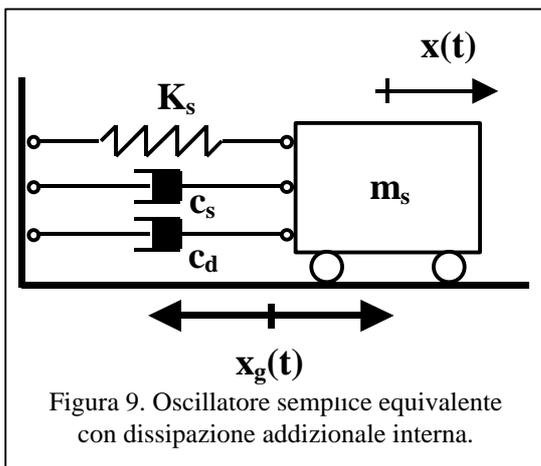


Figura 8. Dissipazione aggiuntiva all'interno (a) e all'esterno (b).



In prima approssimazione è possibile una valutazione sommaria dell'effetto dell'incremento di dissipazione che si può ottenere con questo tipo di intervento, utilizzando delle formule che forniscono la riduzione delle ordinate degli spettri di risposta, valutati per un valore dello smorzamento pari al 5%. Si ipotizza, cioè, che nella struttura siano introdotti dei controventi ideali puramente viscosi, che incrementano la percentuale di smorzamento viscoso della struttura, fino a raggiungere valori del 15 ÷ 20%. L'effetto dell'introduzione di tali dispositivi ideali può essere tenuto in conto, nel modello dell'oscillatore semplice, inserendo un organo viscoso, caratterizzato da una costante di smorzamento pari a c_d , in parallelo a quello che rappresenta lo smorzamento strutturale convenzionale (figura 9). Per la valutazione della risposta in termini di accelerazione e spostamento,

si può utilizzare la formula di riduzione delle ordinate degli spettri fornita dalle Linee guida [1]:

$$\eta = \left(\frac{7}{2 + \xi} \right)^{1/3}$$

dalla quale deriva che, per uno smorzamento equivalente ξ pari al 15%, si ha un fattore di riduzione delle ordinate η pari a 0.74, mentre per ξ pari al 20%, si ha η uguale a 0.68.

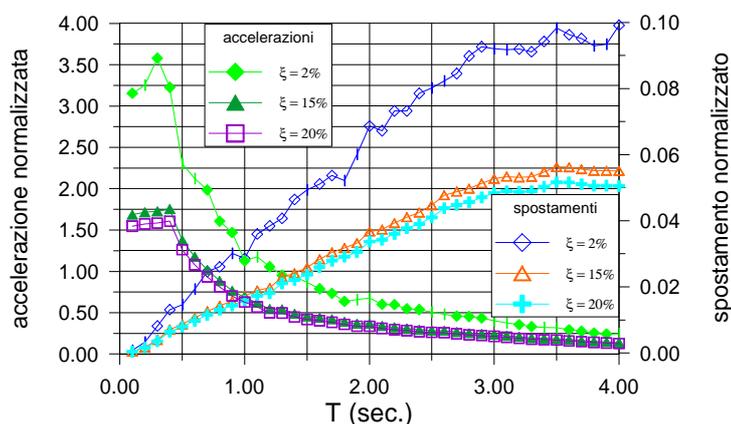


Figura 10. Spettri di risposta in spostamento e in accelerazione dell'oscillatore semplice equivalente per diverse percentuali dello smorzamento viscoso convenzionale.

In figura 10 è riportata la media degli spettri di risposta elastici ottenuti con i sei accelerogrammi artificiali, per percentuali dello smorzamento equivalente ξ pari, rispettivamente, al 2, 15 e 20%.

Si nota che il sistema di protezione basato sull'introduzione di uno smorzamento viscoso aggiuntivo consente di ridurre, contemporaneamente, le forze trasmesse in fondazione e gli spostamenti relativi. E' evidente che questo rappresenta un vantaggio rispetto ai sistemi di isolamento alla base. Tuttavia, la riduzione delle forze è sensibilmente minore rispetto al caso dell'isolamento. D'altro canto, poiché incrementi dello smorzamento superiori al 20% non sono realizzabili, e non sarebbero neppure efficaci ai fini di ulteriori significative riduzioni della risposta, tale sistema di protezione non sembra essere molto adatto, qualora si abbia necessità di ottenere tagli delle sollecitazioni di entità rilevante, come nel caso esaminato. Infatti, la struttura scelta come caso studio, in assenza di protezione, è caratterizzata da bassissima resistenza alle azioni laterali indotte dal sisma. L'incremento di dissipazione all'interno della struttura risulta, invece, una tecnica efficiente, se applicata nel caso in cui le condizioni di partenza siano più favorevoli.

4.4. Dispositivi di dissipazione alla base delle strutture

Molto diffusa, soprattutto in applicazioni riguardanti la protezione dei ponti, è la seconda tipologia di controllo della risposta sismica basato sull'incremento di dissipazione, che prevede l'inserimento dei dissipatori in corrispondenza del collegamento tra la struttura principale e le fondazioni [7]. Nel caso dei ponti, i dispositivi vengono collocati all'attacco tra l'impalcato e le spalle, ovvero tra l'impalcato e le pile. In una tipologia strutturale del tipo del serbatoio in analisi, i dispositivi potrebbero collocarsi alla base delle

colonne (figura 10). Tale tecnica di protezione realizza un sistema di collegamento speciale, che agisce anche

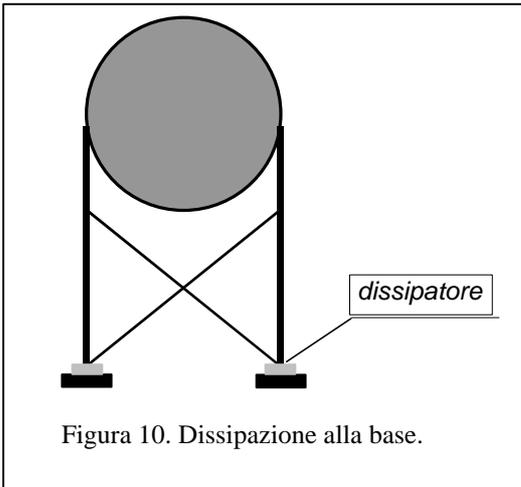


Figura 10. Dissipazione alla base.

sulle caratteristiche dinamiche della struttura, modificandone i periodi fondamentali, analogamente ai sistemi di isolamento, ma punta soprattutto sulle capacità dissipative. In particolare, nel seguito, si considerano dispositivi basati su appoggi acciaio-teflon a bassissimo attrito, disposti in parallelo con elementi dissipativi di tipo isteretico. Questi ultimi sono realizzati con materiali il cui comportamento meccanico è di tipo elasto-plastico e che, dunque, soggetti a carichi ciclici, sono in grado di dissipare energia nei cicli di isteresi. In figura 11 è riportato il legame costitutivo globale del dispositivo nel caso di comportamento elasto-plastico incrudente.

I parametri riportati in figura 11 hanno il seguente significato:

- K_d : rigidità elastica iniziale;
- K_{ep} : rigidità elasto-plastica secondaria;
- F_d : forza di snervamento;
- F_f : forza di attrito;
- δ_d : spostamento di snervamento.

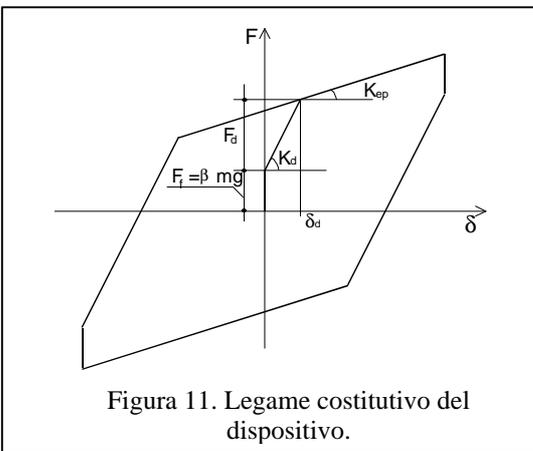


Figura 11. Legame costitutivo del dispositivo.

Com'è possibile notare dalla figura si può tener conto della presenza della componente di forza attritiva presente negli appoggi acciaio-teflon. Nel modello dell'oscillatore ad un grado di libertà, i dissipatori elastoplastici inseriti alla base sono rappresentati dal modello reologico rappresentato in figura 12. L'equazione del moto normalizzata che governa la risposta dinamica del sistema in figura 10 è la seguente:

$$\ddot{\zeta}(t) + 2\omega_s \xi_s \dot{\zeta}(t) + R(t) + \frac{\beta}{C * I} = -a(t)$$

dove $R(t)$ rappresenta la reazione del sistema costituito dal dispositivo in serie con la molla rappresentante la rigidità della struttura ed è pari a $R(t) = \omega^2 \zeta(t)$, ovvero,

a $R(t) = \eta_d (1 - \kappa) + \kappa \omega^2 \zeta(t)$, a seconda che la forza nel sistema sia inferiore o superiore alla soglia plastica F_d del dispositivo.

La pulsazione ω è quella del sistema costituito dalle due molle K_s e K_d poste in serie. La grandezza η_d è la soglia plastica normalizzata. Il parametro di incrudimento κ rappresenta il rapporto tra la rigidità elasto-plastica secondaria K_{ep} e la rigidità elastica K_d . Il termine $\beta/(C * I)$ rappresenta la forza di attrito $F_f = \beta P$ normalizzata rispetto alla forza di picco al suolo, essendo β il coefficiente di attrito, C il coefficiente di intensità sismica e 1.4 il fattore di importanza I . Per il coefficiente di attrito β , che caratterizza l'appoggio acciaio-teflon, si assume un valore massimo pari all'1%.

E' opportuno sottolineare che l'incrudimento, K_{ep} , può costituire una caratteristica peculiare del comportamento meccanico dei dispositivi, ovvero può essere utilizzato per tener conto dell'eventuale presenza di organi elastici disposti in parallelo con i dissipatori, aventi funzione di ricentraggio della struttura al termine dell'evento sismico. Dagli spettri in figura 13 è possibile osservare che l'introduzione dei dispositivi di tipo isteretico consente notevoli riduzioni delle forze trasmesse in fondazione, in tutto il campo dei periodi propri analizzato. Per quanto riguarda

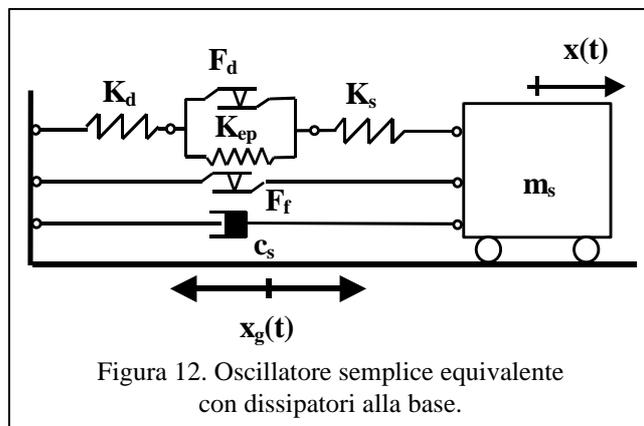


Figura 12. Oscillatore semplice equivalente con dissipatori alla base.

gli spostamenti, si possono avere riduzioni o incrementi, in dipendenza sia del valore del periodo proprio, che della forza plastica. Tuttavia, in questo caso, la scelta delle caratteristiche meccaniche dei dispositivi isteretici, cioè del periodo proprio T_d e della soglia di snervamento F_d , consente una notevole flessibilità progettuale, rispetto al caso dei dispositivi inseriti all'interno della struttura.

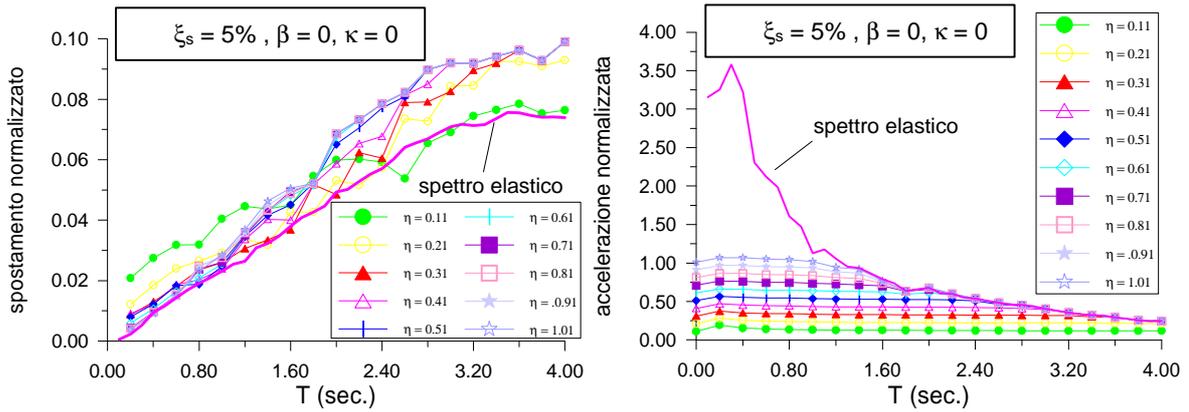


Figura 13. Spettri di risposta in spostamento e in accelerazione dell'oscillatore semplice equivalente per diversi valori della soglia plastica adimensionalizzata.

Il problema della definizione delle caratteristiche meccaniche dei dissipatori viene formulato come problema di ottimizzazione di una funzione scalare di tipo energetico. L'idea di formulare la progettazione dei sistemi di dissipazione dell'energia come problema di ottimo di alcune funzioni scalari compare in molte proposte di letteratura [5]. In particolare, in questo lavoro si propone una formulazione basata su un indice energetico, la cui massimizzazione consente la progettazione ottimale delle caratteristiche meccaniche dei dissipatori in un'ampia classe di applicazioni strutturali [6, 7]. Tale indice, denominato EDI (Energy Dissipation Index) si definisce come segue:

$$EDI = \int_0^{t_d} E_H dt / \int_0^{t_d} E_I dt$$

dove E_H è l'energia dissipata dai dispositivi dissipativi per isteresi, E_I è l'energia introdotta nella struttura dal sisma, t_d è la durata del terremoto. La funzione EDI ha il significato di indice di prestazione del sistema di dissipazione, poiché rappresenta la misura della percentuale di energia immessa dal sisma che questo è in grado di dissipare; la massimizzazione di EDI equivale, quindi, a richiedere al dispositivo di dissipare la massima quota possibile di energia di input, minimizzando, di conseguenza, la porzione di energia disponibile per il danneggiamento della struttura. Nell'applicazione in oggetto le variabili di progetto dei dispositivi sono la rigidità K_d e la forza plastica normalizzata η_d . Risolvendo il problema di massimizzazione dell'indice EDI, è possibile costruire delle curve, direttamente utilizzabili al fine del progetto delle caratteristiche meccaniche dei dispositivi di dissipazione. Esse rappresentano le coppie di valori del periodo modificato e della soglia plastica η_d , in corrispondenza delle quali EDI è massimo e sono denominate curve di progetto ottimo. In figura 14 è riportata la curva di progetto ricavata dalle analisi condotte utilizzando i sei accelerogrammi artificiali. E' possibile dimostrare che, in corrispondenza dei valori ottimali delle variabili di progetto, si ottiene un buon compromesso ai fini del controllo dei valori assunti dalle grandezze di risposta significative, forza, spostamento e duttilità nei dispositivi elasto-plastici.

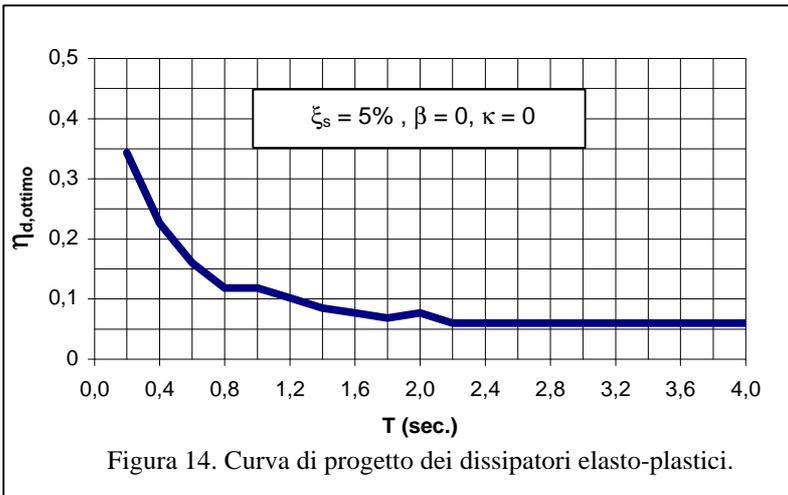


Figura 14. Curva di progetto dei dissipatori elasto-plastici.

Per la sopradetta condizione di carico, il sistema ha un periodo proprio T_s pari a 0.84 s. Dal confronto tra diverse ipotesi progettuali, che si differenziano per il valore assegnato alla rigidità, si deduce che la soluzione più efficace ai fini della riduzione del taglio alla base e dello spostamento della massa consiste nell'assegnare ai dispositivi una

rigidezza K_d pari alla metà di quella K_s del serbatoio. La rigidezza globale del sistema risulta, dunque, $K = K_s / 3$, cui corrisponde un periodo proprio modificato $T = \sqrt{3} T_s = 1.45$ s. Dalla curva di progetto ottimo in figura 14 si può ricavare il valore ottimale della soglia plastica adimensionalizzata; in questo caso si è scelto un valore lievemente superiore, $\eta_d = 0.1$.

Essendo $\eta_d = F_d / m\ddot{x}_{g,max}$, si ottiene

$$F_d = \eta_d m\ddot{x}_{g,max} = \eta_d \frac{\ddot{x}_{g,max}}{g} mg = \eta_d C I P = 0.1 * 0.25 * 1.4 * P = 0.035 P$$

dove C è il coefficiente di intensità sismica, pari, nel caso degli accelerogrammi considerati a 0.25, I è il fattore di importanza pari a 1.4 e P è il peso del serbatoio. Essendo a pieno carico $P = 26520$ kN, si ottiene un valore ottimale della forza plastica pari a $F_d = 930$ kN. Dagli spettri in accelerazione e in spostamento, si ricavano la forza totale trasmessa in fondazione e lo spostamento corrispondenti. In tabella 3 sono riportati, per le tre condizioni di carico e per i casi di assenza e presenza di attrito, pari all'1%, i periodi propri modificati dalla presenza dei dispositivi, il taglio alla base, lo spostamento totale della massa, lo spostamento relativo della massa rispetto al dispositivo alla base e l'accelerazione sulla massa normalizzata rispetto a g . La duttilità cinematica massima nei dispositivi elasto-plastici, μ , risulta pari a 12.

Si nota, infine, che, mentre i valori delle forze alla base e delle accelerazioni sulla massa risultano incrementati dalla presenza dell'attrito, i valori degli spostamenti si riducono di conseguenza.

$$(\xi_s = 2\%, \beta = 0 / 0.01, \kappa = 0)$$

condizioni di carico	1	2	3
T (s)	1.45	1.09	0.50
F (kN)	930 / 1195	930 / 1080	930 / 961
x (m)	0.156 / 0.144	0.076 / 0.061	0.042 / 0.041
xrel (m)	0.006	0.006	0.006
a/g	0.040 / 0.050	0.070 / 0.080	0.318 / 0.325

Tabella 3. Valori dei tagli alla base e degli spostamenti per la struttura con dissipatori alla base in assenza ed in presenza di attrito.

Per la realizzazione del sistema di protezione, possono essere utilizzati, ad esempio, i dispositivi di dissipazione in acciaio messi a punto e sperimentati presso l'Università di Roma "La Sapienza" [8] e impiegati frequentemente in applicazioni sui ponti. Il meccanismo di dissipazione caratteristico di tali dispositivi è basato sulla plasticizzazione per flessione dell'acciaio.

In particolare, per l'applicazione in oggetto si potrebbero utilizzare dissipatori a 'C', caratterizzati dall'uniforme plasticizzazione delle sezioni (figura 15), disposti in modo da realizzare un comportamento meccanico indipendente dalla direzione del sisma. Si propone, perciò, di disporre, in corrispondenza di ciascun appoggio, alla base di ciascuna colonna, tre dispositivi, uno dei quali diretto radialmente verso il centro della circonferenza individuata dalle colonne, gli altri due disposti ad una distanza angolare di 120° (figura 15). Al fine di ottenere la rigidezza e la forza plastica di progetto, ciascun dispositivo deve essere caratterizzato da una rigidezza elastica iniziale pari a 3657 kN/m e da una soglia plastica pari a 46 kN. Utilizzando le formule che forniscono la forza di plasticizzazione P_p e la rigidezza elastica K_e , in funzione dei parametri geometrici (raggio r , spessore s e altezza massima b_{max}), della tensione di snervamento σ_y , e del modulo elastico dell'acciaio, si ottengono, dunque, le seguenti dimensioni per il singolo dispositivo: $s = 3$ cm, $b_{max} = 6.8$ cm, $D = 52$ cm.

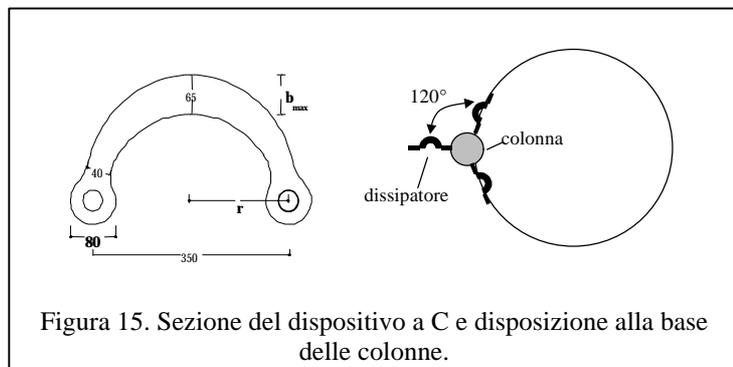
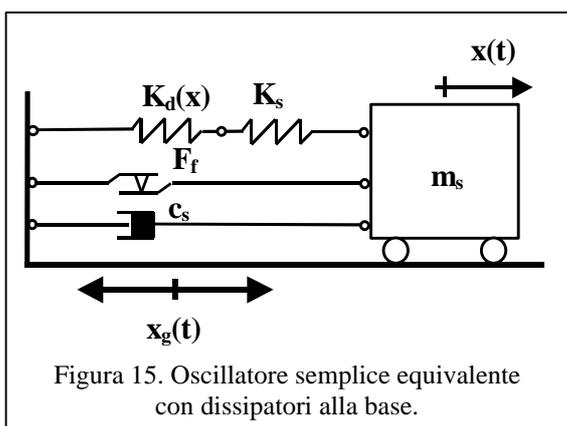


Figura 15. Sezione del dispositivo a C e disposizione alla base delle colonne.

4.5. Sistema misto di isolamento e dissipazione alla base delle strutture

Questo sistema di protezione rappresenta una tecnica di isolamento sismico alla base di tipo misto. Infatti, esso si basa sull'impiego di due diverse tipologie di isolatori costituiti da 3 appoggi in gomma naturale



(NRBs) e da 8 appoggi ad attrito in acciaio-teflon (SDs), disposti in pianta in modo da conservare la simmetria centrale: i primi garantiscono la forza elastica di ricentraggio ed una discreta dissipazione energetica; i dispositivi ad attrito consentono di fornire una dissipazione energetica proporzionale al peso del serbatoio (il quale è variabile in un intervallo piuttosto ampio). In tal modo, oltre ad avere un sistema in grado di fornire resistenze dissipative diverse, a seconda della condizione di carico in cui si trova il serbatoio, si ottiene un sistema autocentrante: infatti, il coefficiente d'attrito acciaio-teflon in condizioni quasi-statiche, è circa uguale a 0.003; pertanto, gli isolatori in gomma sono in grado di riportare la struttura, anche in caso di serbatoio pieno,

nella sua posizione iniziale dopo il sisma (aiutati anche da vibrazioni ambientali e deformazioni termiche). Il sistema misto di isolatori convenzionali e dispositivi ad attrito può essere modellato mediante una molla non lineare di costante $K_d(x)$, disposta in parallelo con un morsetto ad attrito caratterizzato dalla soglia F_f . Il coefficiente di attrito β , che caratterizza l'appoggio acciaio-teflon in condizioni dinamiche, si assume pari all'1%, analogamente a quanto utilizzato per il sistema presentato nel paragrafo 4.4. Nella tabella 5 si riportano i valori delle grandezze statiche e cinematiche di controllo ottenute con il sistema di isolamento di tipo misto, solo per le due condizioni di carico estreme.

condizioni di carico	1	3
F (kN)	1350	470
x (m)	0.205	0.071
xrel (m)	0.011	0.013
a/g	0.043	0.163

Tabella 5. Valori dei tagli alla base, degli spostamenti e delle accelerazioni per la struttura con isolatori e dispositivi ad attrito alla base.

4.6 Confronto tra i diversi sistemi di protezione

Nelle tabelle che seguono si confrontano i vari sistemi di protezione analizzati. Per il sistema basato sull'incremento di dissipazione all'interno delle strutture, si assume uno smorzamento viscoso equivalente ξ pari al 20%. Per il sistema di protezione basato sull'introduzione dei dissipatori isteretici alla base, si considera nullo l'incrudimento κ .

In particolare, nella tabella 6 si riportano i valori del taglio alla base. In tabella 7, si riportano gli spostamenti subiti dalla struttura. E' possibile notare come alla scelta di una dissipazione concentrata alla base di tipo elasto-plastico corrisponda un abbattimento della forza notevolmente maggiore rispetto agli altri due sistemi di protezione, in tutte e tre le condizioni di carico.

condizioni di carico	1	2	3
assenza di protezione	14400	10790	3890
isolamento alla base	2900	2250	1000
dissipazione interna	7130	5366	1720
dissipazione alla base ($\beta=0$)	930	930	930
dissipazione alla base ($\beta=1\%$)	1195	1080	961
sistema misto	1350	-	470

Tabella 6. Valori dei tagli alla base espressi in kN.

Per quanto riguarda gli spostamenti, soltanto con l'inserimento di dissipazione aggiuntiva interna nella struttura si ottengono delle riduzioni rispetto al caso della struttura in assenza di protezione. Tuttavia, gli incrementi di spostamento per il sistema basato sulla dissipazione isteretica alla base e per il sistema misto sono sempre inferiori a quelli relativi all'isolamento alla base di tipo convenzionale.

condizioni di carico	1	2	3
assenza di protezione	0.095	0.055	0.028
isolamento alla base	0.243	0.181	0.080
dissipazione interna	0.047	0.036	0.013
dissipazione alla base ($\beta=0$)	0.156	0.076	0.042
dissipazione alla base ($\beta=1\%$)	0.144	0.061	0.041
sistema misto	0.205	-	0.071

Tabella 7. Valori degli spostamenti della massa espressi in m.

5. ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI

Le analisi agli elementi finiti della struttura in esame sono state eseguite utilizzando due programmi di libreria: il SAP 2000 e l'ABAQUS. In particolare, il modello analizzato con il SAP è costituito da 1551 elementi finiti tipo shell per la discretizzazione del corpo sferico e delle colonne e da 22 elementi beam per la schematizzazione delle diagonali. La massa del fluido viene schematizzata incrementando il peso di ciascun elemento shell del corpo sferico. Come mostrato nella figura 16 gli elementi di piastra sono a tre e a quattro nodi ed si assume per essi un comportamento lineare.

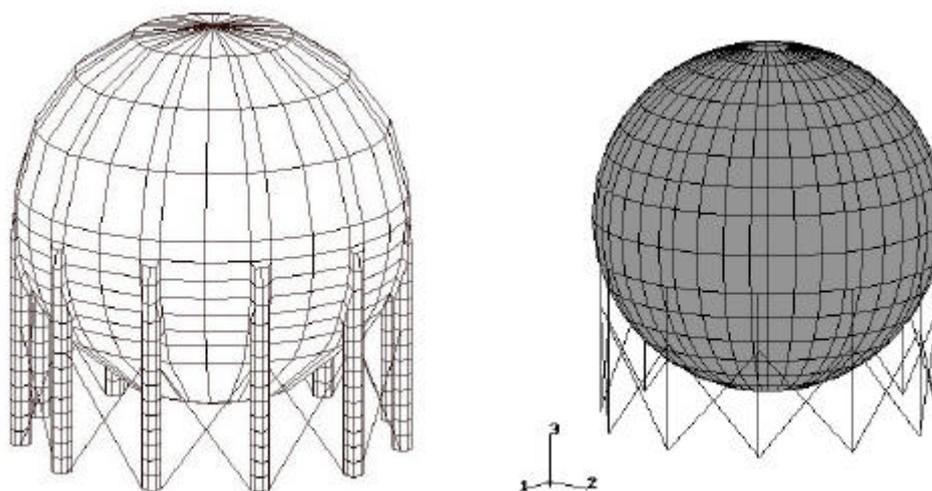


Figura 16. Schemi agli elementi finiti del serbatoio utilizzati nei codici SAP e ABAQUS.

La mesh utilizzata nel codice ABAQUS è costituita da 850 elementi tipo beam e shell; in questo caso, le colonne sono modellate mediante elementi beam. Nel caso di serbatoio pieno il fluido è simulato da una massa collegata alle colonne di sostegno mediante aste infinitamente rigide.

I risultati globali delle analisi sono in buon accordo con le indicazioni ottenute con i modelli semplificati. E' evidente che i modelli più sofisticati oltre a consentire la valutazione di stati di sollecitazione e di deformazione locali, che sono di grande interesse, potranno anche essere utilizzati per riprodurre fenomeni importanti, quali quelli legati al moto del fluido contenuto nel serbatoio (sloshing).

6. CONCLUSIONI

Lo studio presentato ha come scopo quello di fornire una prima valutazione sulla applicabilità delle tecniche innovative, in particolare di quelle basate sul controllo di tipo passivo, per realizzare la protezione sismica di componenti di impianti industriali a rischio di incidente rilevante.

Il componente scelto per l'effettuazione del caso studio è di grande interesse, sia per il fatto di rappresentare una tipologia a grande diffusione sul territorio nazionale, che per la elevata vulnerabilità sismica che discende dalle dimensioni ipotizzate per gli elementi verticali di sostegno.

Tutte le tecniche innovative di protezione considerate mostrano una indiscutibile efficacia protettiva, rispetto alla ipotizzata situazione di partenza. A causa della bassissima resistenza alle azioni orizzontali inizialmente disponibile si sono dovute però riconoscere inadatte, perché insufficienti, le tecniche basate sulla sola

aggiunta artificiale di capacità dissipative all'interno della struttura. Si è posta quindi l'attenzione sugli interventi classificabili propriamente come isolamento alla base, perché comportano il taglio strutturale e la creazione di una discontinuità a livello della fondazione. Nell'ambito di questa tipologia si sono considerate quindi tre alternative, una di tipo più convenzionale, basata sull'utilizzo di isolatori in gomma armata, le altre due che puntano decisamente sulla dissipazione e sulla limitazione della forza trasmessa, con utilizzo di dissipatori elasto-plastici o ad attrito. Queste ultime danno i risultati più convincenti, riuscendo a contemperare, in maniera più efficace, l'abbattimento delle forze e il controllo degli spostamenti. Il seguito della ricerca approfondirà in dettaglio, e anche in termini di valutazioni economiche, queste soluzioni e porrà l'attenzione su altri problemi importanti, quali l'effetto dello sloshing del liquido contenuto nel serbatoio.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Linee guida per la progettazione, esecuzione e collaudo di strutture isolate dal sisma, Presidenza del Consiglio Superiore dei LL.PP. - Servizio Tecnico Centrale, dicembre (1998).
- [2] Cornell C.A., Engineering seismic risk analysis Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 58, (1968).
- [3] Bender B, Perkins D.M., Seisrisk III : A computer program for seismic hazard estimation. U.S. Geological Survey Bulletin, N.1772 (1987).
- [4] Pugliese, A. and F. Sabetta, Stima di spettri di risposta da registrazioni di forti terremoti italiani, Ingegneria Sismica, 2, pp. 3-14 (1989).
- [5] Filiatrault, A., Cherry, S., Seismic design spectra for friction damped structures, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 116, N. 5, pp. 1134-1355 (1990).
- [6] Ciampi, V., De Angelis, M., Paolacci, F., Design of yielding or friction-based dissipative bracings for seismic protection of buildings, Engineering Structures, Vol. 17, pp. 381-391 (1995).
- [7] Ciampi, V., A methodology for the design of energy dissipation devices for the seismic protection of bridges, Workshop on Seismic Protective Systems for Bridges., Technical Report MCEER-98-0015, pp. 89-104 (1998).
- [8] Ciampi, V., Marioni, A., New Types of Energy Dissipating Devices for Seismic Protection of Bridges, Proc. of the Third World Congress on Joint Sealing and Bearing Systems for Concrete Structures, Toronto, Canada, Vol. 2, pp. 1225-1246 (1991).
- [9] Martelli, A., Forni, M., Bettinali, F., Bonacina, G., Bergamo, G., Castellano, M.G., Medeot, R., Marioni, A., Sanò, T., Pugliese, A., New Activities Performed in Italy on Innovative Anti-Seismic Techniques for Civil and Industrial Structures, Proc. ASME-PVP Conf., Boston , Massachusetts, USA, PVP-Vol. 387 ("Seismic Engineering-1999"), pp. 311-326 (1999).