

PROTEZIONE SISMICA DI SERBATOI DI IMPIANTI PETROLCHIMICI MEDIANTE ISOLAMENTO ALLA BASE: INDAGINI SPERIMENTALI

Vincenzo Ciampi¹, Mariano Ciucci³, Maurizio De Angelis¹, Gerardo Decanio⁴, Renato Giannini², Giancarlo Ludovisi³, Silvia Pantanella¹, Fabrizio Paolacci², Nicola Ranieri⁴

¹ Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Roma "La Sapienza"

² Dipartimento di Strutture, Università di Roma Tre

³ Dipartimento di Inseguimenti Produttivi ed Interazione con l'Ambiente, ISPESL, Roma

⁴ Ente per le Nuove tecnologie L'Energia e l'Ambiente - ENEA - MAT, Casaccia (Rm)

SOMMARIO

In questo lavoro vengono illustrati i primi risultati di una serie di prove dinamiche su tavola vibrante di un serbatoio metallico di 4 m di diametro riempito con acqua sino al livello di un metro. Questo serbatoio è un modello in scala 1:13.7 di un grande serbatoio per lo stoccaggio del greggio in un impianto petrolchimico. Il serbatoio è stato provato nella condizione di base fissa, anche simulando la presenza del tetto galleggiante. Successivamente lo stesso serbatoio è stato protetto con sistemi di isolamento alla base, in gomma ed elastoplastici e quindi sottoposto alle stesse serie di prove. I risultati hanno confermato l'attendibilità dei modelli numerici semplificati e l'elevata efficacia dei sistemi di isolamento nel dare luogo ad elevate riduzioni delle pressioni sul mantello e delle relative sollecitazioni, anche presenza del tetto galleggiante.

1. INTRODUZIONE

Tra le cause che possono provocare incidenti gravi negli impianti industriali, l'azione sismica dovrebbe essere presa in considerazione come una tra le più importanti. Infatti, a differenza dell'incidente casuale, che si può ritenere dovuto ad eventi indipendenti e pertanto vi è una trascurabile probabilità che si verifichi simultaneamente in più apparati (e da cui ci si può spesso cautelare mediante ridondanza), nel caso sismico la causa comune, il terremoto, rende altamente probabile che i danni si producano simultaneamente in più punti dell'impianto, e quindi che gli effetti possano risultare amplificati, per esempio a causa del mancato funzionamento dei sistemi di sicurezza.

I danni che un terremoto può produrre in un impianto sono in parte di natura simile a quelli che si verificano nelle costruzioni civili, con il danneggiamento di costosi apparati e la possibile perdita di vite umane a seguito di crolli delle strutture; oltre a questi si devono mettere in conto le perdite economiche indirette, dovute all'interruzione del ciclo produttivo, e l'impatto sull'ambiente (e quindi sulle persone) conseguente a scoppi, incendi, rilascio di sostanze tossiche, ecc., che i danni prodotti dal terremoto possono generare.

Le normative sismiche vigenti, studiate per le costruzioni civili, si pongono l'obiettivo, in caso di sisma violento, di proteggere la vita umana evitando il crollo della costruzione, ma non di impedire che questa si danneggi. Fanno eccezione le norme relative alle strutture isolate, per le quali è previsto che, anche in caso di eventi intensi, il danneggiamento sia limitato o del tutto assente. Le norme per le costruzioni civili risultano quindi generalmente inadeguate per le strutture degli impianti industriali, per le quali un danneggiamento può comportare anche gravi conseguenze, in termini, ad esempio, di rilascio di sostanze pericolose.

Tra le varie lavorazioni industriali, quelle degli impianti chimici sono, nei termini indicati sopra, potenzialmente a maggior rischio. Gli impianti italiani ritenuti a rischio rilevante in base al D.L. 334/99 (Seveso II) e alla Direttiva 96/82/CE, sono più di mille, dei quali quasi trecento ricadono in zone classificate di seconda o prima categoria, e quindi ad elevata pericolosità sismica. L'importanza di prevedere tecniche di riduzione del rischio sismico, da impiegare sia negli impianti esistenti con interventi migliorativi, sia in quelli nuovi od al rinnovamento di singoli apparati, si mostra dunque assolutamente evidente.

Negli ultimi anni sono state messe a punto nuove tecniche per la protezione sismica delle strutture, di cui si è avuta applicazione soprattutto in campo civile, sia alle nuove costruzioni, sia nell'adeguamento delle costruzioni esistenti. Particolarmente efficaci, per la loro semplicità, affidabilità e basso costo, appaiono le tecniche di controllo passivo, ed, in particolare, l'isolamento alla base e la dissipazione passiva di energia,

che hanno trovato larga applicazione in molte aree ad elevato rischio sismico, specialmente in Giappone, in Nuova Zelanda e negli Stati Uniti. Le applicazioni agli impianti industriali ed ai loro componenti sono invece ancora poco numerose. Per quanto riguarda, in particolare, gli impianti a rischio di incidente rilevante, sono note recenti applicazioni, in paesi extraeuropei (Stati Uniti, Corea, ecc.), dell'isolamento alla base di alcuni grandi serbatoi contenenti sostanze quali ammoniaca e gas naturale liquefatto. In Europa vi sono state solo poche realizzazioni. In particolare in Grecia (isolamento dei serbatoi di gas naturale liquefatto LNG del terminale petrolchimico di Revythousa) ed in Svizzera (adeguamento mediante l'inserimento di isolatori in gomma ad alto smorzamento HDRB, dei serbatoi di ammoniaca a Visp); in quest'ultimo caso sono stati applicati isolatori sviluppati e prodotti da un'industria italiana.

In Italia i sistemi d'isolamento e dissipazione sono stati usati soprattutto nella costruzione e nell'adeguamento sismico dei ponti e dei viadotti, mentre sono quasi assenti le applicazioni alle strutture industriali, sebbene la criticità di questo tipo di impianti sia stata evidenziata da alcuni eventi recenti, verificatisi in aree geograficamente vicine: basti citare, ad esempio, le gravi conseguenze ambientali causate dall'incendio del più grande impianto petrolchimico turco, la raffineria di Tupras a Korfez, a seguito del terremoto che colpì Izmit, nell'agosto del 1999.

L'Università di Roma Tre e l'Università di Roma "La Sapienza" sono impegnate in un progetto di ricerca, finanziato dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Sicurezza sul Lavoro (ISPESL), che ha per scopo lo studio dell'applicabilità dell'isolamento alla base per la protezione sismica degli impianti petrolchimici. Tra i vari elementi di un impianto di questo tipo, i serbatoi cilindrici metallici di grandi dimensioni usati per lo stoccaggio del greggio e dei suoi derivati sono stati individuati come tra i più interessanti, sia per la loro notevole vulnerabilità, sia per l'efficacia dell'isolamento alla base nella loro protezione.

Un elemento di cui normalmente non si tiene conto nella valutazione della sicurezza dei serbatoi, è il tetto galleggiante, usato per coprire i serbatoi di maggiori dimensioni. I risultati di analisi numeriche con modelli agli elementi finti che includevano l'interazione fluido-struttura, hanno mostrato che la presenza del tetto galleggiante influenza il comportamento dinamico del serbatoio, e quindi hanno suggerito l'opportunità di eseguire ulteriori indagini.

Per convalidare la capacità predittiva di detti modelli e l'efficacia dell'isolamento come mezzo di protezione dei serbatoi, è stato attuato un programma di prove dinamiche su tavola vibrante di un serbatoio cilindrico metallico. Le prove sono state svolte utilizzando la tavola vibrante $4 \times 4 \text{ m}^2$ a sei gdl del laboratorio ENEA-MAT nel Centro Ricerche ENEA - La Casaccia (Roma). L'isolamento è stato effettuato mediante due diversi tipi di apparati: in gomma ed elasto-plastici. Lo scopo delle prove era la verifica dei modelli analitici nella previsione delle pressioni indotte dal sisma nelle varie configurazioni del serbatoio: a base fissa, con e senza il tetto, ed isolato mediante apparati in gomma od elasto-plastici.

2. DESCRIZIONE DELL'APPARATO DI PROVA

Il serbatoio oggetto della sperimentazione è un modello in scala (1:13.7) di un serbatoio metallico di diametro $D = 55 \text{ m}$ e altezza $H = 15.6 \text{ m}$, utilizzato per lo stoccaggio di prodotti derivati dal greggio, con altezza di riempimento massima $H_r = 13.7 \text{ m}$. Il serbatoio è coperto da un tetto galleggiante a pontone realizzato mediante travi reticolari metalliche, collegate tra loro da una lamiera in acciaio. In figura 1 è riportato un disegno esecutivo del serbatoio.

Il modello in scala ha un diametro di 4.00 m e un'altezza di 1.45 m . L'altezza di riempimento massima prevista è pari a 1.00 m . Le pareti del serbatoio, realizzate in acciaio inox, hanno uno spessore di 1 mm , mentre il fondo è costituito da una lamiera in acciaio al carbonio dello spessore di 25 mm ed è collegato al mantello mediante bulloni posti ad interasse 30 cm . Il fondo è irrigidito da un graticcio di 4 travi HEB 240 poste simmetricamente e saldate sul fondo all'interasse di 2.0 m . Il graticcio a sua volta poggia su quattro pilastri in acciaio alti 25 cm (vedi fig.1). Il liquido utilizzato per il riempimento, di cui è stato previsto l'unico livello di un metro, è acqua; il peso del liquido contenuto è quindi pari a circa 13 t .

Il tetto del serbatoio reale ha una massa che è stata stimata approssimativamente in 200 tonnellate. La massa del tetto del modello, per conservare la proporzione della scala, dovrebbe pertanto essere di $200.000/13.7^3 \approx 78 \text{ kg}$.

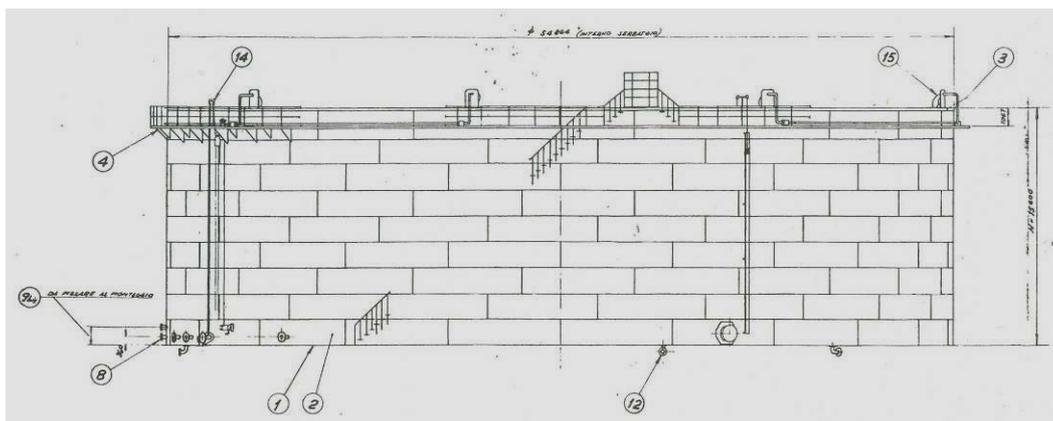


Figura 1 - Disegno esecutivo del serbatoio in scala reale

Tabella 1. Dati del serbatoio in scala ridotta.

Fattore di scala geometrico	F_{scala}	13,70
Diametro (m)	D	4,00
Altezza (m)	H_w	1,45
Altezza massima riempimento (m)	H	1,00
Densità del liquido (Kg/m^3)	γ	1000
Densità del materiale costituente il serbatoio (Kg)	γ_w	7850
Massa Liquido (Kg)	M	12560
Modulo elastico del materiale costituente il serbatoio (MPa)	E	200000
Massa tetto (Kg)	m_t	120
Massa travi di fondazioni + fondo (Kg)	m_f	3060
Massa pareti (Kg)	m_p	143
Spessore della lamiera del mantello costante su tutta l'altezza (mm)	s	1,00
Spessore del fondo (mm)	s_f	25
Altezza travi in acciaio graticcio di base (mm)	A_t	200
Tensione di snervamento acciaio serbatoio (MPa)	γ_y	300

Per avvicinarsi quanto possibile a questo valore il tetto del modello è stato realizzato in legno compensato dello spessore di 4 mm ed irrigidito con un telaio composto di aste in legno di sezione $50 \times 50 \text{ mm}^2$. La massa effettiva del tetto così realizzato è risultata di circa 130 kg. Sebbene tale valore risulti quasi doppio di quello teorico, questo è stato ritenuto accettabile in quanto analisi numeriche preliminari avevano mostrato che, entro questi limiti, la variazione della massa del tetto non aveva conseguenze rilevanti sul comportamento dinamico del serbatoio.

La flangia di chiusura del tetto, che svolge anche la funzione di ammortizzatore del contatto tra tetto e serbatoio, nel modello è stata simulata applicando un tubo in gomma lungo tutto il perimetro del tetto in legno. La rigidità di questo elemento è stata preliminarmente determinata mediante prove di compressione assiale, monotone e cicliche, eseguite presso il laboratorio di prove sperimentali dell'Università degli Studi di Roma Tre; tale rigidità è risultata pari 964 N/mm/m .

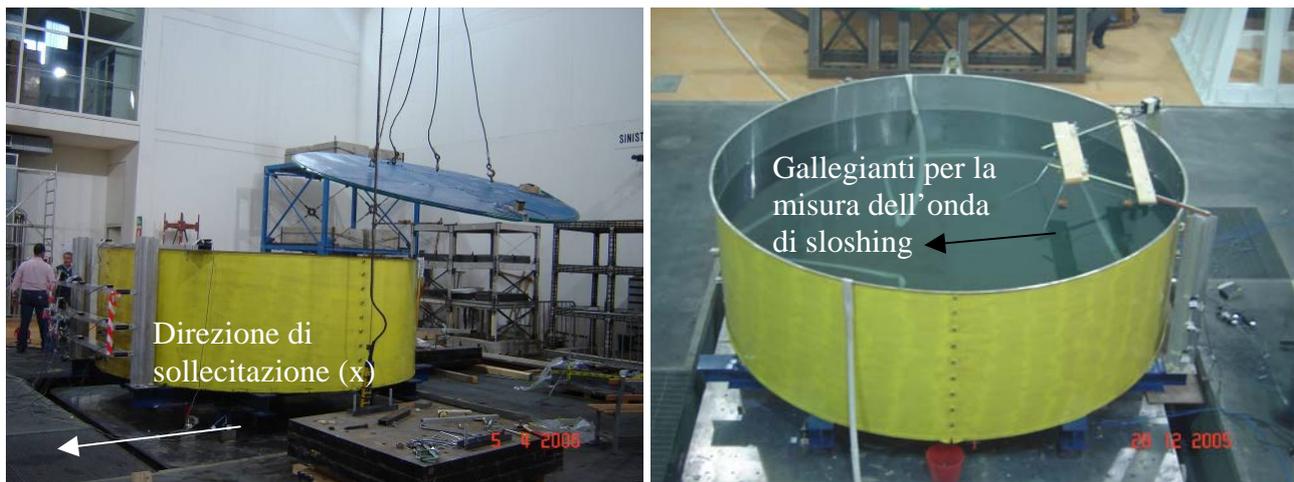


Fig.2 - Il modello in scala del serbatoio in fase di montaggio con e senza tetto galleggiante

2.1 Il problema della riduzione scala dei tempi

La riduzione in scala di una struttura ha come conseguenza la riduzione dei periodi propri dei modi di vibrazione che ne caratterizzano il comportamento dinamico. Di questo fatto si deve quindi tener conto riducendo in modo analogo la scala dei tempi delle azioni (nel caso sismico del moto alla base) che agiscono sulla struttura. Nei serbatoi però si verificano due diversi fenomeni: il moto convettivo del liquido (noto come “sloshing”) che è caratterizzato dalla formazione di onde sulla superficie, ed il moto “impulsivo” in cui il fluido si muove in modo solidale al serbatoio per effetto del trascinamento e della deformazione delle pareti. Nel primo fenomeno è in gioco solo la forza di gravità e quindi il periodo proprio varia proporzionalmente alla radice quadrata delle dimensioni del serbatoio, quindi alla radice quadrata del fattore di scala. Nel secondo fenomeno entra invece in gioco la rigidità elastica del contenitore, e di conseguenza il periodo proprio cresce proporzionalmente alle dimensioni, ossia al fattore di scala, se si mantengono inalterati gli altri parametri, cioè il modulo elastico del materiale e la densità del liquido.

Dunque non è possibile, mediante una semplice scalatura geometrica, avere un unico criterio con cui modificare la scala dei tempi. Poiché lo “sloshing” dipende solo dall’accelerazione di gravità, come è ovvio le sue frequenze non possono essere modificate. Le frequenze di vibrazione delle pareti del serbatoio potrebbero invece essere variate agendo sui parametri di cui si è detto (modulo elastico e densità del liquido) oppure alterando la scala dello spessore delle pareti. Ma, per i volumi in gioco, è impossibile usare un liquido diverso dall’acqua ed inoltre, per soddisfare la condizione di uguale scalatura dei tempi, il modulo elastico del materiale dovrebbe essere ridotto in proporzione al fattore di scala o lo spessore ridotto per il quadrato dello stesso fattore. In pratica, per ragioni tecnologiche ed economiche, nessuna di queste strade è praticabile quando il fattore di scala è molto piccolo come nel caso in esame (1:13.7). Il serbatoio è realizzato in acciaio, quindi il modulo elastico del materiale è uguale a quello dell’oggetto reale, e lo spessore di 1 mm è circa 1/30 dello spessore medio al vero. Questo rapporto è minore del fattore di scala, ma ben maggiore di quello (1/196) necessario per ottenere la conservazione della proporzione tra i periodi di vibrazione. Quindi è stato necessario fare una scelta sul criterio di scalatura del tempo e si è scelto di rispettare la proporzione con il moto convettivo, riducendo il tempo del fattore $1/\sqrt{13.7}$. Questa scelta è giustificata dall’importanza che, nella sperimentazione, è stata data al moto di sloshing, sia per l’influenza esercitata dalla presenza del tetto, sia perché si voleva misurare l’interazione tra l’isolamento e l’ampiezza dell’onda di sloshing.

2.2 Sensori e sistemi d’acquisizione

La risposta del serbatoio alle azioni impresse è stata rilevata con una copiosa strumentazione, composta da accelerometri, rilevatori di spostamento, di deformazione e di pressione. Il moto effettivo della tavola e quello del graticcio di sostegno del serbatoio, sopra i pilastri, sono stati registrati da gruppi di accelerometri. Le deformazioni delle pareti del serbatoio sono state misurate mediante sei trasduttori laser di spostamento, disposti lungo due generatrici simmetriche rispetto alla direzione di applicazione

dell'accelerazione, e con “strain-gauges” orizzontali e verticali atti a misurare le deformazioni circonferenziali ed assiali della parete. La pressione indotta dall'azione sismica è stata misurata mediante nove trasduttori di pressione, sette dei quali sono stati disposti lungo due opposte generatrici, nella direzione del moto, e due nella direzione ortogonale.

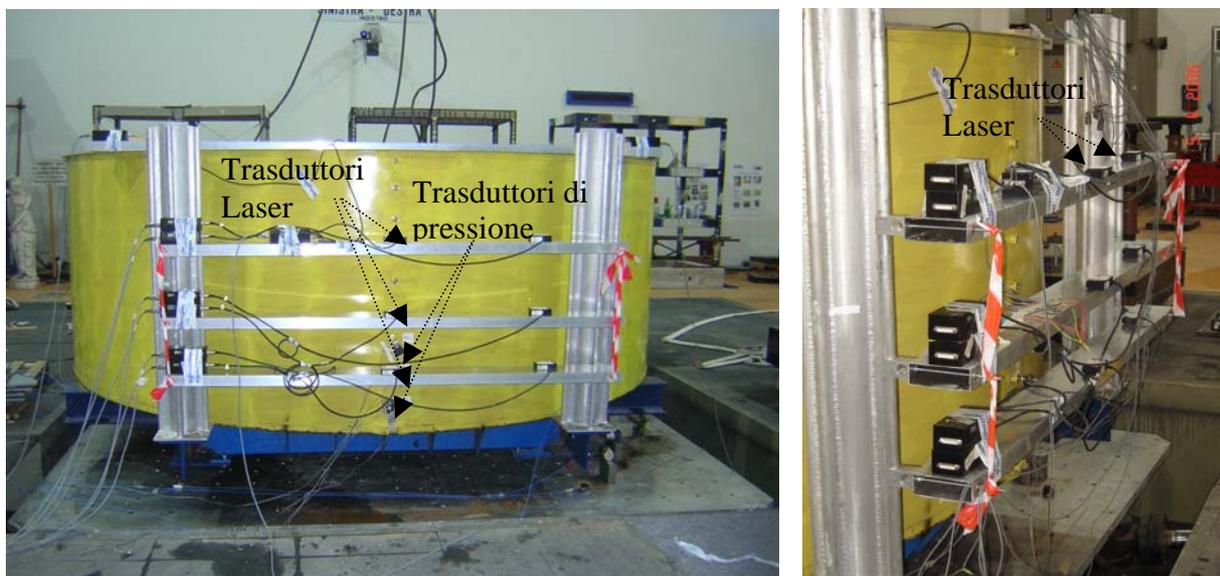


Figura 3 - Posizionamento traduttori di pressione e di spostamento laser

Il moto superficiale del liquido, nella configurazione senza tetto, è stata misurato rilevando, mediante trasduttori di spostamento laser, il moto di due galleggianti, in modo da ottenere il moto verticale di due punti della superficie libera. In presenza del tetto, oltre a rilevare il moto verticale di quattro punti della superficie del tetto, è stato registrato, sempre mediante laser posti sul tetto, il moto orizzontale, in due direzioni ortogonali, di questo rispetto alla parete del serbatoio.

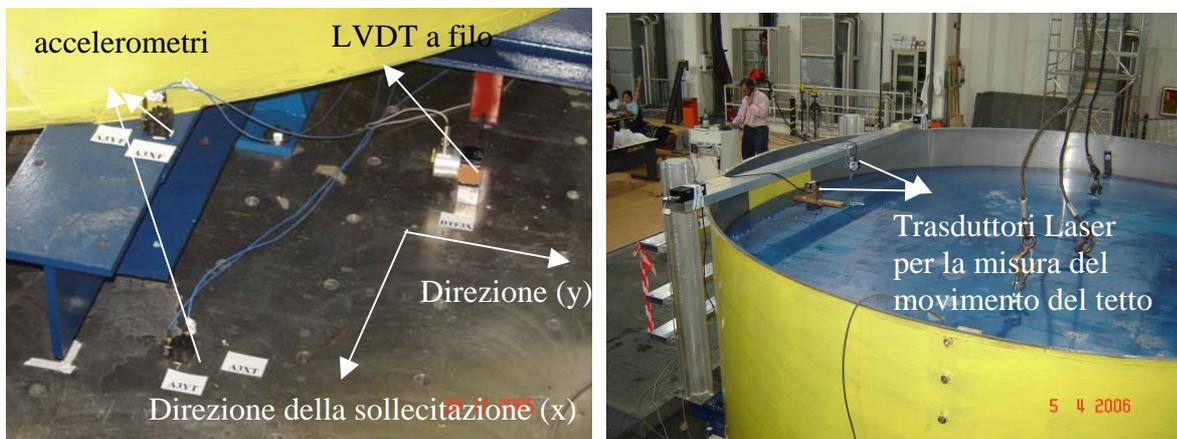


Figura 4 - Posizionamento degli accelerometri e laser per la misura del movimento del tetto

In presenza dei sistemi di isolamento gli spostamenti relativi del serbatoio rispetto alla tavola sono stati misurati mediante una terna di LVDT a filo (fig. 4), i primi due nella direzione x e il terzo nella direzione trasversale y.

La disposizione di questi strumenti è illustrata nelle foto riportate nelle figure 2, 3 e 4.

2.3 Azione

Per le prove di caratterizzazione dinamica, al fine di identificare le frequenze proprie del sistema, sono stati utilizzati segnali armonici a frequenza variabile e campioni di rumore bianco. Per le simulazioni dell'azione

sismica sono stati utilizzati 6 accelerogrammi, due dei quali generati artificialmente dallo spettro dell'OPCM 3274 per terreno BCE e zona 2, gli altri 4 sono accelerogrammi naturali, selezionati tra quelli contenuti nel database del Pacific Earthquake Engineering Center (PEER) all'indirizzo <http://peer.berekeley.edu/smcat/>. Le registrazioni selezionate rispettano le limitazioni indicate nella tabella 2.

Tabella 2. Criteri di scelta degli accelerogrammi naturali

Magnitudo	6-7
Distanza minima dalla faglia	8-30 Km
Tipo di terreno (USGS)	B o C
PGA	0.15 – 0.35 g
Durata significativa	> 20 sec
Filtro HP con frequenza di cut-off	< 0.1 Hz

Sono state selezionate quindi le quattro registrazioni elencate nella tabella 3.

Tabella 3 – Accelerogrammi naturali utilizzati nella sperimentazione

Accelerogramma	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)	Durata (s)	Passo di reg.(s)
IRPINIA EQ, 11/23/80, STURNO, 270	0.358	52.7	33.08	40.00	0.00244
DUZCE 11/12/99, DUZCE/DCZ180	0.312	58.8	44.11	25.88	0.005
KOCAELI 08/17/99, ARC090	0.149	39.5	35.6	28.00	0.005
CHI-CHI 09/20/99, TCU120	0.225	63.1	54.09	90	0.005

Poiché, con l'eccezione del caso di serbatoio isolato con dissipatori elasto-plastici, si prevede che il sistema abbia un comportamento lineare, il livello dell'intensità dell'azione dovrebbe essere inessenziale, in quanto tutte le grandezze dovrebbero variare proporzionalmente all'intensità. In pratica questo è vero solo in modo approssimato e proprio per rilevare eventuali fenomeni di non linearità, l'intensità dell'azione è stata variata, scalando il picco di accelerazione di tutti i segnali tra 0.1 g e 0.7 g.

In tutti gli accelerogrammi, naturali ed artificiali, la scala dei tempi è stata alterata coerentemente al periodo proprio dello sloshing, ossia, come detto prima, del fattore $1/\sqrt{13.7} = 1/3.7$.

2.4 Configurazioni e programma delle prove

Il serbatoio, come già detto, è stato provato in quattro differenti configurazioni: a) serbatoio non isolato e senza tetto galleggiante (SNIST), b) serbatoio non isolato con tetto galleggiante (SNITG), c) serbatoio con isolatori elastomerici e tetto galleggiante (SITGE), d) serbatoio isolato con isolatori elastoplastici e tetto galleggiante (SITGEP). Per ognuna delle configurazioni precedenti sono state inizialmente effettuate prove per l'identificazione delle caratteristiche dinamiche del serbatoio e successivamente prove per la valutazione della sua risposta sismica. Per la valutazione delle frequenze proprie del serbatoio e della frequenza di sloshing sono stati utilizzati segnali armonici a frequenza crescente (OFSW) e campioni di rumore bianco (WN).

3. PROGETTO DEL SISTEMA D'ISOLAMENTO

3.1. Isolatori elastomerici

Un serbatoio tozzo, come quello oggetto delle prove, poggiano su di un sistema di isolamento può essere schematicamente rappresentato dal modello di Figura 7, dove con m_i , m_c e m_f sono indicate la massa impulsiva, convettiva e del fondo del serbatoio, rispettivamente, e con k_f e k_c le rigidità dell'interazione

fluido-mantello e del moto convettivo del liquido. In questo modello l'intera massa impulsiva è stata associata al primo modo di vibrazione, cosa lecita per i serbatoi tozzi, come è noto dalla letteratura [1]; inoltre si è tenuto conto solamente del primo modo di sloshing, in quanto quelli di ordine più elevato hanno modesto effetto. Il sistema di isolamento è caratterizzato da una molla di rigidità k_b e da un dissipatore viscoso con coefficiente c_b . Anche alle masse convettiva ed impulsiva sono stati aggiunti dei dissipatori; tuttavia la di dissipazione associata a questi fenomeni è piccola: in particolare al moto convettivo si attribuisce normalmente uno smorzamento percentuale dello 0.5%, mentre alle vibrazioni delle pareti si associa uno smorzamento di circa il 2%, tipico delle strutture in acciaio.

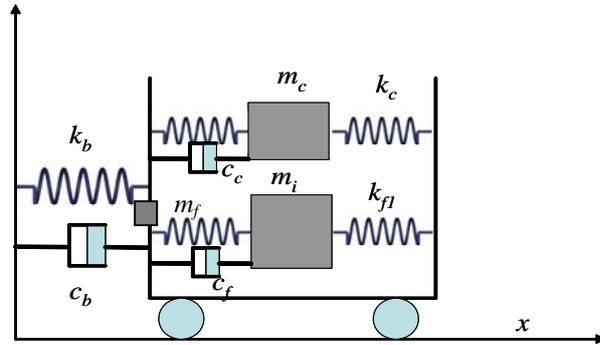


Figura 7 – Modello di serbatoio isolato alla base

Poichè è noto che le oscillazioni della massa convettiva m_c hanno frequenze molto basse è ben evidente che il sistema d'isolamento produce di fatto effetti significativi sul solo moto impulsivo, mentre il moto convettivo, essendo legato a periodi elevati, non ne è influenzato. Soltanto nel caso in cui i modi superiori di sloshing siano rilevanti l'isolamento potrebbe avere effetti significativi anche sullo sloshing aumentando l'altezza dell'onda, come può avvenire nei serbatoi molto tozzi.



Fig. 8- Isolatore elastomerico installato



Fig. 9- Isolatore elastoplastico

Per il dimensionamento preliminare del sistema di isolamento si possono quindi fare le seguenti approssimazioni: la massa convettiva (m_c) non partecipa al modo del sistema isolato, mentre la massa impulsiva (m_i) si può assumere solidale alla base del serbatoio. Fissato il periodo che si vuole che abbia il primo modo (dopo quello di sloshing) del sistema (T_{iso}), la rigidità globale k_b degli isolatori è data dalla relazione:

$$k_b = \left(\frac{2\pi}{T_{iso}} \right)^2 m_i \quad (1)$$

dove $m_i = m_i + m_f$ è la massa complessiva del sistema isolato, somma di quella della parte del liquido che si muove solidale al serbatoio e della massa del serbatoio stesso e del sistema di sostegno. Lo smorzamento del sistema d'isolamento può essere assegnato in base della tipologia degli isolatori utilizzati.

Per il progetto degli isolatori si è fatto riferimento ad una zona sismica di prima categoria, considerando un suolo tipo B ed un fattore di importanza di 1.4, per tener conto del grave rischio conseguente al collasso di queste strutture. Il picco di accelerazione con cui scalare lo spettro risulta quindi $A_g = 0.35 \times 1.25 \times 1.4 = 0.6125$ g. Fissato il periodo di isolamento del serbatoio reale $T_{iso}^{reale} = 2.8$ s, il periodo di isolamento del modello risulta $T_{iso} = T_{iso}^{reale} / \sqrt{13.7} = 0.756$ s. Mediante lo spettro di risposta (OPCM 3274) scalato al picco di accelerazione A_g , e contratto nei tempi del fattore $\sqrt{13.7}$, si determina quindi lo spostamento massimo degli isolatori e quindi la loro altezza. La rigidezza del sistema di isolamento si calcola quindi mediante la (1), che richiede la conoscenza della parte impulsiva della massa del fluido. Questa si calcola con la formula di Housner [2] e, per un serbatoio con un rapporto $H/D = 0.25$, è circa il 30% della massa totale:

$$m_i = M \frac{\tanh\left(1.7 \frac{R}{H}\right)}{1.7 \frac{R}{H}} = 0.293 M = 3680 \text{ kg} \quad (2)$$

Nel modello la massa del serbatoio (compreso il fondo) e del sistema delle travi di sostegno è $m_f = 3323$ Kg. La rigidezza complessiva del sistema di isolamento vale dunque:

$$k_b = \frac{4\pi^2}{T_{iso}^2} (m_i + m_a) = 483 \text{ kN/m} \quad (3)$$

Conoscendo l'altezza e la rigidezza degli isolatori, poiché $k_b = AG/h$, fissato il modulo di deformazione $G = 0.4$ MPa, si deduce l'area complessiva degli isolatori. Le caratteristiche effettive degli isolatori utilizzati sono riportate nella tabella 4. Questi isolatori sono stati provati nel laboratorio del Dipartimento di Strutture dell'Università di Roma Tre, mediante cicli a spostamento impresso di ampiezza crescente e frequenza variabile tra 0.5 e 5 Hz. Nelle figure 11 e 10 sono mostrati l'apparato di prova usato e il grafico dei cicli forza-spostamento di una coppia di isolatori, rispettivamente. Da queste prove è risultato che la rigidezza secante alla deformazione del 100% di un singolo isolatore è pari a 105 kN/m; la rigidezza complessiva del sistema composto da quattro isolatori è dunque $k_b = 4 \times 105 = 420$ kN/m, poco inferiore a quella prevista nel progetto.

Tabella 4 - Dati generali di progetto degli isolatori elastomerici

Periodo d'isolamento in scala ridotta (sec)	0,756
Smorzamento viscoso equivalente (%)	10
Altezza totale dell'isolatore	30.0 mm
Altezza totale degli strati di gomma	23.5 mm
Diametro Isolatore	90.0 mm

3.2 Isolatori elastoplastici

Attualmente le prove relative al serbatoio isolato con dissipatori elasto-plastici non sono terminate; risulta quindi impossibile illustrarne e discuterne i risultati. Pertanto non si entrerà qui nel dettaglio della progettazione e delle caratteristiche di questi apparati, uno dei quali è illustrato in Fig. 9.

Gli isolatori di entrambi i tipi sono stati forniti dalla società ALGA s.p.a.

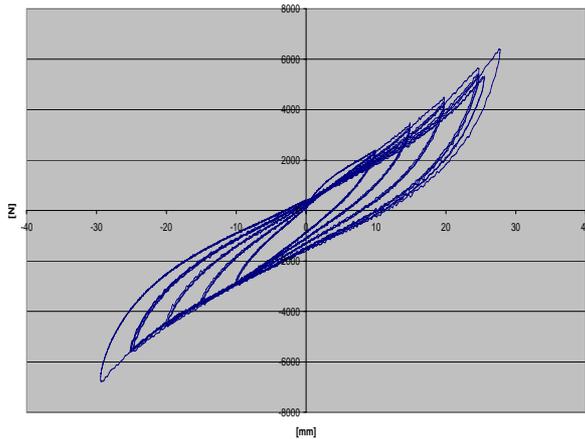


Fig. 10 – Ciclo isolatore elastomerico



Fig. 11- Apparatto di prova

4. DISCUSSIONE DEI RISULTATI

4.1 test di identificazione

Prima di simulare l'effetto dell'azione sismica, il serbatoio, in ciascuna delle configurazioni esaminate, è stato soggetto ad un segnale di ampia banda per identificarne le caratteristiche dinamiche. Dei segnali di risposta più significativi sono state costruite le funzioni di trasferimento tra il segnale di input (l'accelerazione della base) e quello di output. Le figure 12 e 13 mostrano le funzioni di trasferimento, relativa al segnale misurato da uno strain-gauge orizzontale posizionato sul mantello, nei casi di serbatoio non isolato e senza tetto galleggiante (figura 12) e con tetto (figura 13). Nel primo caso risulta evidente la presenza di due picchi, il primo corrispondente alla frequenza di sloshing (0.39 Hz) e il secondo alla frequenza di vibrazione dell'interazione fluido-mantello (15.85 Hz). Anche nel caso di serbatoio con tetto galleggiante, la frequenza di sloshing rimane praticamente inalterata (0.40 Hz), mentre la frequenza di interazione mantello-fluido subisce un modesto incremento (17.07 Hz). La frequenza di sloshing misurata sperimentalmente coincide con quella teorica, fornita dall'equazione [1]:

$$f_{sl} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{1.841 \frac{g}{R} \tanh\left(1.841 \frac{H}{R}\right)} = 0.407 \text{ Hz} \quad (4)$$

In cui R è il raggio del serbatoio ed H è il livello di riempimento. Al contrario la frequenza del moto di interazione fluido-mantello, valutata analiticamente, risulta essere maggiore di quella sperimentale, come illustrato in tabella 5.

In presenza di isolamento alla base, le frequenze principali sono ancora due (fig. 14): la prima relativa al moto di sloshing, che non subisce variazioni apprezzabili rispetto al caso non isolato, e la seconda relativa al modo del sistema d'isolamento, che risulta pari a 1.36 Hz, valore coincidente con la frequenza di progetto del sistema d'isolamento (par. 3.1). L'analisi dei segnali in regime di oscillazioni libere ha poi premesso di valutare l'entità degli smorzamenti modali. Utilizzando il metodo del decremento logaritmico, applicato ai segnali filtrati con filtro di Butterworth passa-banda in corrispondenza delle frequenze in precedenza identificate, è stato valutato il rapporto di smorzamento del moto di sloshing, risultato pari allo 0.4% in assenza di tetto e pari al 1.2% in presenza del tetto galleggiante. Tale differenza è probabilmente imputabile all'interazione che il tetto ha con il mantello durante il moto. La presenza dell'isolamento aumenta infine di molto lo smorzamento del moto di sloshing, che si attesta intorno al 4.8% (figura 15). Tale incremento è evidentemente legato all'interazione tra moto del serbatoio isolato ed il moto di sloshing.

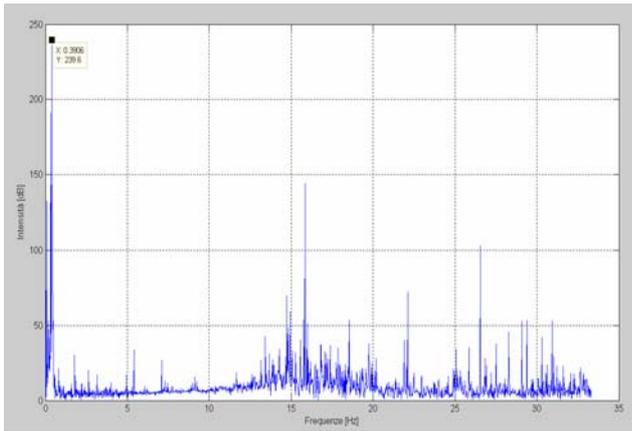


Fig. 12 – Funzione di trasferimento della deformazione circonferenzi di uno strain gauge per il caso di serbatoio non isolato e in assenza di tetto galleggiante (WN-SNIST)

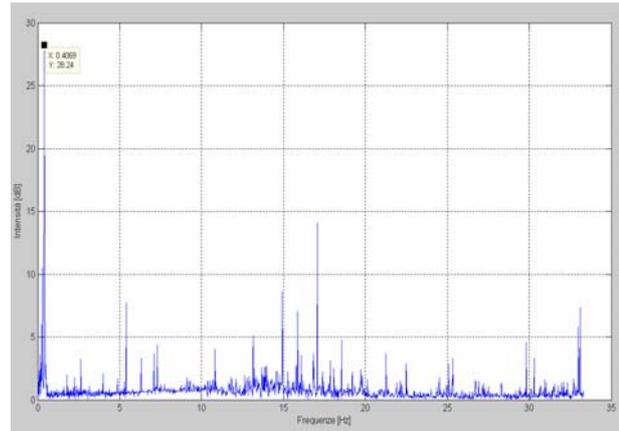


Fig. 13 – Funzione di trasferimento di uno strain gauge per il caso di serbatoio non isolato e con tetto galleggiante (WN-SNITG)

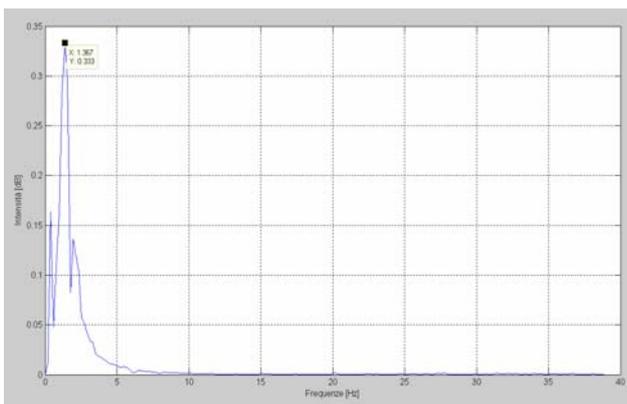


Fig. 14 – Funzione di trasferimento di uno strain gauge per il caso di serbatoio isolato e in presenza di tetto galleggiante (WN-SITGE)

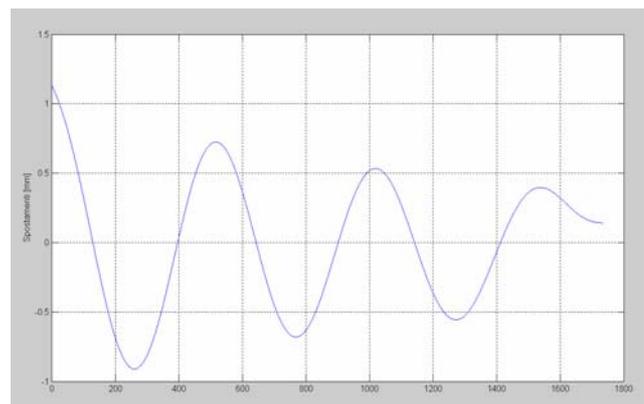


Fig. 15 – Segnale di spostamento verticale del tetto in regime di oscillazioni libere del serbatoio isolato.

Tabella 5. Frequenze sperimentali e numeriche del modello

	Sperimentale			Teorica	
	SNIST	SNITG	SITGE	SNIST	SITGE
Sloshing	0.39	0.40	0.40	0.40	0.40
Interazione fluido-mantello	15.85	17.07	---	20.15	---
isolamento	---	---	1.36		1.36

4.2 Test sismici

Nelle figure 16 e 17 è riportato il taglio massimo alla base, al variare del PGA, calcolato come risultante delle pressioni misurate sul mantello, per due tra le configurazioni esaminate. A tale scopo i valori della pressione misurati sono stati interpolati con una curva algebrica del terzo ordine e distribuiti radialmente con

andamento sinusoidale [1]. Il grafico si riferisce ad un particolare accelerogramma, al variare del picco di accelerazione, e pone a confronto i casi del serbatoio con tetto senza e con sistema di isolamento.

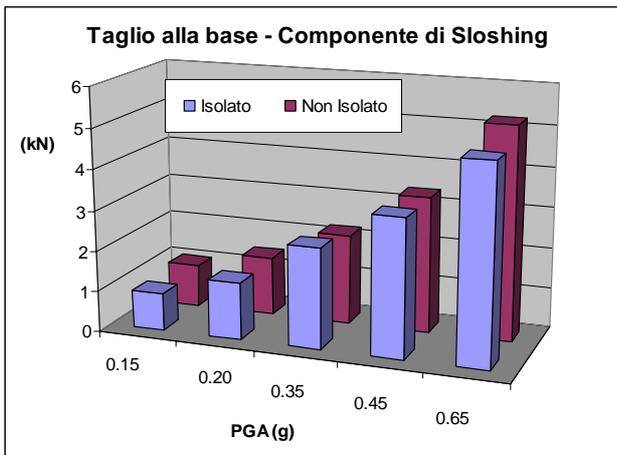


Fig. 16 – Confronto in termini di taglio alla base per la componente di sloshing (ARC090)

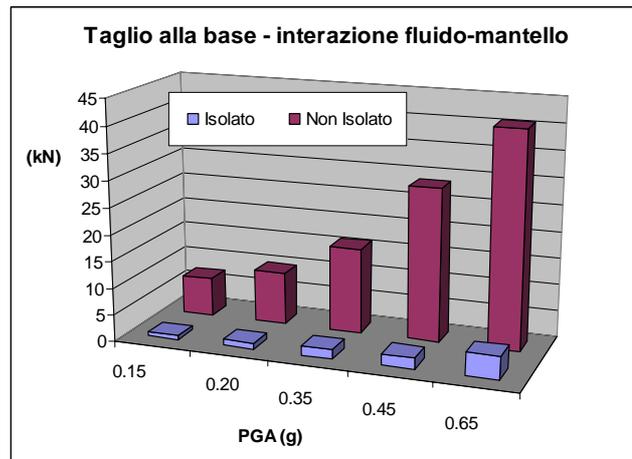


Fig. 17 – Confronto in termini di taglio alla base per la componente di interazione fluido-mantello (ARC090)

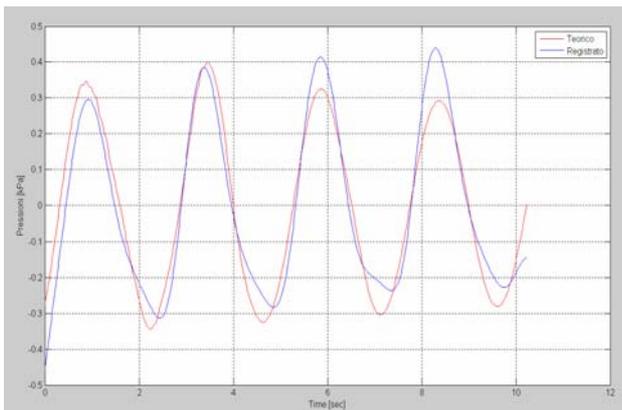


Fig. 18 – Confronto teorico-sperimentale relativo alla componente di sloshing della pressione (DCZ180-SNIST – PGA 0.10g)

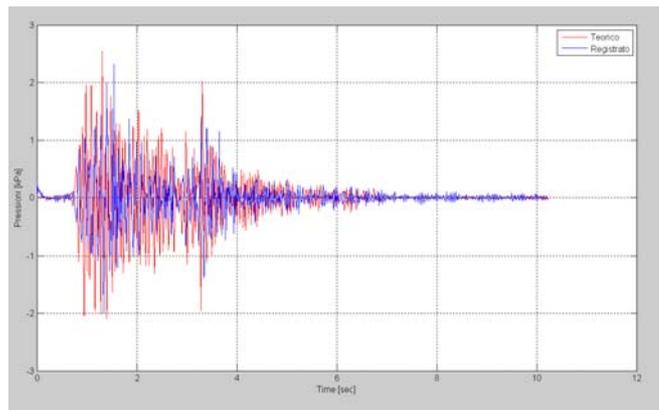


Fig. 19 – Confronto teorico-sperimentale relativo alla componente di interazione fluido-mantello della pressione (DCZ180-SNIST- PGA 0.10g)

Il confronto teorico sperimentale evidenzia un buon accordo tra il modello numerico e quello sperimentale. Occorre osservare che a causa del basso smorzamento del moto di sloshing l'influenza delle condizioni iniziali è notevole e va messa in conto per una corretta simulazione della dinamica del sistema. Il confronto tra le risposte del serbatoio nelle due configurazioni analizzate conduce alle seguenti conclusioni:

- 1) La pressione esercitata dalla componente di sloshing non subisce variazioni significative a causa dell'isolamento alla base. Ciò è dovuto alla notevole differenza tra le frequenze di sloshing e di isolamento, che non permette alcuna interazione tra i due modi.
- 2) La riduzione della forza di taglio dovuta all'azione impulsiva è invece significativa (80-90%), confermando la prevista efficacia del sistema d'isolamento nel ridurre la sovrappressione indotta dall'azione sismica sulle pareti del serbatoio
- 3) La riduzione complessiva della pressione delle pressioni è circa altrettanto significativa, perché le forze indotte dal moto convettivo, nel serbatoio a base fissa, sono molto più piccole di quelle dovute all'interazione fluido-struttura.

Nelle figure 18 e 19 sono illustrati due esempi di segnali nel tempo registrati da uno dei trasduttori di pressione e filtrati mediante un filtro passa basso e passa alto, rispettivamente, per il serbatoio non isolato e senza tetto. Negli stessi grafici sono riportati anche i segnali calcolati utilizzando il modello di figura 7, con le caratteristiche dinamiche identificate sperimentalmente. Il comportamento dell'isolatore è stato modellato con la legge di Bouc-Wen [3].

5. CONCLUSIONI

In questa memoria sono presentati alcuni risultati ottenuti da una campagna di prove sperimentali volta alla valutazione del comportamento sismico di serbatoi in uso negli impianti petrolchimici. Essa è parte integrante delle attività sviluppate in seno al Dipartimento di Strutture dell'Università degli Studi Roma Tre ed al Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica dell'Università "La Sapienza", che riguardano lo studio dell'applicabilità dell'isolamento alla base per la protezione sismica delle strutture industriali. Il progetto è finanziato dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Sicurezza sul Lavoro (ISPESL).

In particolare è stato analizzato il comportamento sismico di un serbatoio metallico per lo stoccaggio dei derivati del greggio, il quale presenta un diametro di 55 m e un'altezza di 15.6 m mediante un modello in scala 1:13.7. I sistemi d'isolamento sperimentati sono di due tipi: isolatori in gomma-acciaio ad alto smorzamento e isolatori elastoplastici. Poiché le prove relative a questi ultimi sono ancora in corso, nel lavoro è stata trattata solamente la prima tipologia. Le indagini sono state condotte mediante prove dinamiche su tavola vibrante dell'ENEA nei laboratori della Casaccia. Il serbatoio, di tipo metallico, è stato dotato di un tetto galleggiante, realizzato mediante una struttura in legno.

Dalle prove d'identificazione dinamica del serbatoio si è rilevato come il tetto galleggiante influenza in maniera modesta la frequenza del moto d'interazione fluido-struttura del serbatoio a base fissa, mentre non influenza affatto la frequenza di vibrazione del corrispondente moto di sloshing. Lo smorzamento di quest'ultimo subisce invece un lieve aumento dovuto all'interazione tra tetto e mantello. In presenza dell'isolamento alla base lo smorzamento del moto di sloshing subisce un ulteriore importante aumento, legato all'interazione che sussiste tra moto di sloshing e quello degli isolatori. L'impiego di isolatori elastomerici ha dato luogo a riduzioni del taglio alla base fin oltre l'80%, mentre non ha influenzato in modo apprezzabile il moto di sloshing. Infine una serie di confronti tra le risposte predette dal modello numerico e quelle sperimentali hanno permesso di verificare l'attendibilità dei modelli proposti in letteratura.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia la società ALGA S.p.a. di Milano per l'utile supporto offerto nella progettazione e realizzazione degli isolatori elastomerici ed elastoplastici.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. F. D. Fischer e F. G. Rammerstorfer. A refined analysis of sloshing effects in seismically excited tanks. *Inter. J. of Pressure Vessels and Piping* 1999. 76: 693 – 709.
2. G. W. Housner. The dynamic behavior of water tanks. *Bulletin of the Seismological Society of America* 1963. 53: 381 – 387.
3. Wen, Y. 1976. Method for random vibration of hysteretic systems. *Journal of the Engineering Mechanical Division, Proceeding ASCE*, Vol. 102 n°EM2, April