

INDAGINE SPERIMENTALE SULLA RISPOSTA SISMICA DI UN SERBATOIO ISOLATO ALLA BASE

Fabrizio Paolacci

*Università degli Studi Roma Tre
Dipartimento di Ingegneria Civile, Informatica e delle Tecnologie
Aeronautiche*

CONTENUTI DEL LAVORO

Si illustrano i risultati ottenuti da una serie di prove dinamiche con tavola vibrante, condotte nel Centro Ricerche Casaccia - laboratorio ENEA-MAT su di un modello in scala 1:14 di un serbatoio in acciaio isolato alla base, tipico di impianti petrolchimici.

OBIETTIVI DEL LAVORO

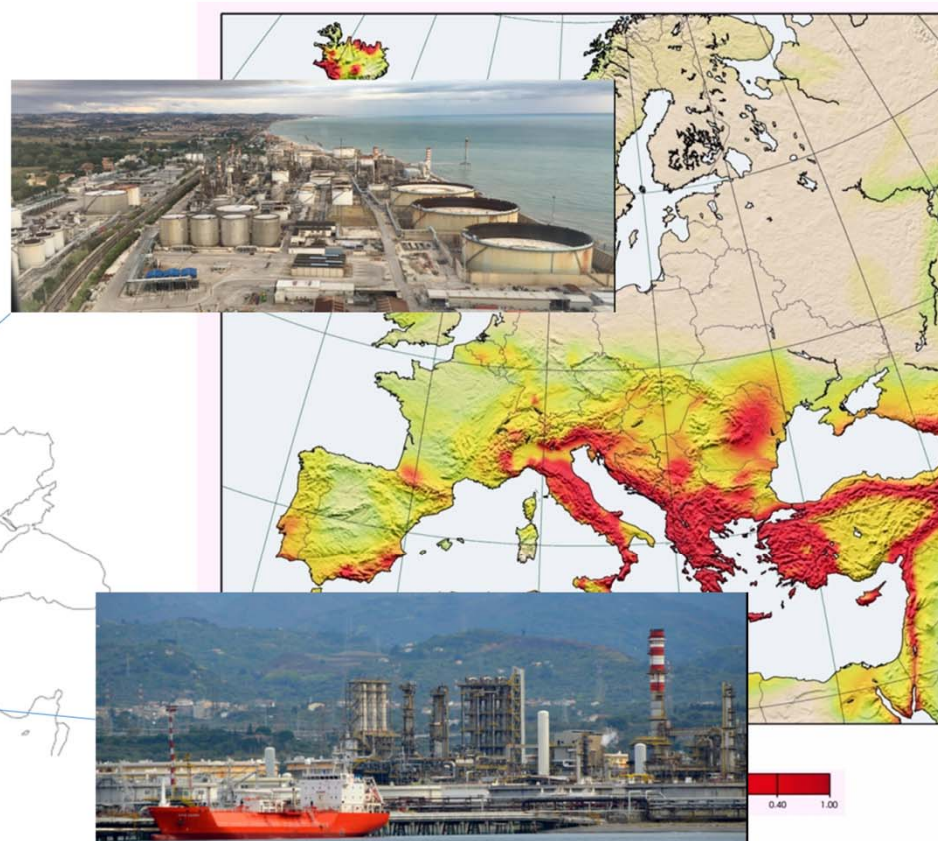
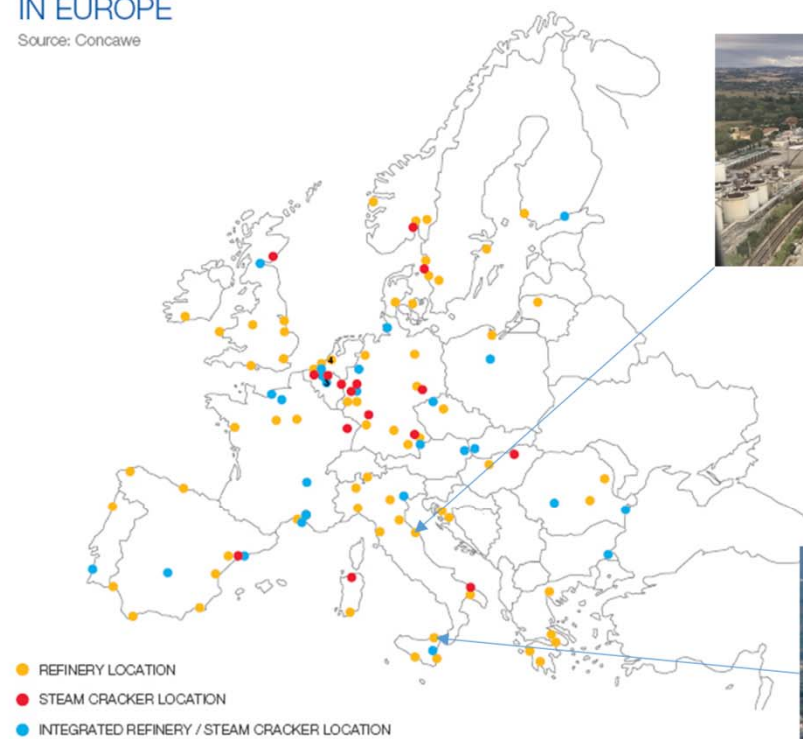
- Verificare l'attendibilità dei modelli analitici e numerici per la previsione del regime delle pressioni in condizioni sismiche, controllando in particolare l'effetto del tetto galleggiante, normalmente presente nei serbatoi di questo tipo, ma trascurato dai modelli analitici standard;
- Analizzare l'efficacia di sistemi di isolamento alla base in gomma ed elastoplastici per la protezione sismica dei serbatoi;
- Analizzare l'eventuale interazione tra gli effetti prodotti dal tetto galleggiante ed il sistema di isolamento.

MOTIVAZIONI DEL LAVORO

- In Europa vi sono numerosi impianti chimici definiti ad alto rischio per le possibili conseguenze di incidenti rilevanti per l'ambiente e per l'uomo.
- Molti di questi si trovano in zone ad elevata pericolosità sismica

REFINERY/STEAM CRACKER SITES IN EUROPE

Source: Concawe



MOTIVAZIONI DEL LAVORO

Tra i diversi tipi di impianti quelli petrolchimici (raffinerie) sono i più interessanti:

- Contengono apparati vulnerabili all'azione sismica
- Lavorano sostanze pericolose per l'ambiente e infiammabili
- Sono abbastanza diffusi sul territorio nazionale

Motivazioni del lavoro



EFFETTI DEL TERREMOTO SUI SERBATOI

TERREMOTO DI IZMIT 1999 – Raffineria di Tupras



Serbatoio nella zona di massimo incendio

EFFETTI DEL TERREMOTO SUI SERBATOI

TERREMOTO DI IZMIT 1999 – Raffineria di Tupras



Fuoriuscita di liquido (overtopping)

EFFETTI DEL TERREMOTO SUI SERBATOI

TERREMOTO DI IZMIT 1999 – Raffineria di Tüpraş



Instabilità elastica

EFFETTI DEL TERREMOTO SUI SERBATOI

TERREMOTO DELL'ALASKA (1964)



Instabilità elastoplastica (Elephant Foot)

EFFETTI DEL TERREMOTO SUI SERBATOI

TERREMOTO KERN COUNTY, CALIFORNIA (1952)



Movimento del tetto galleggiante

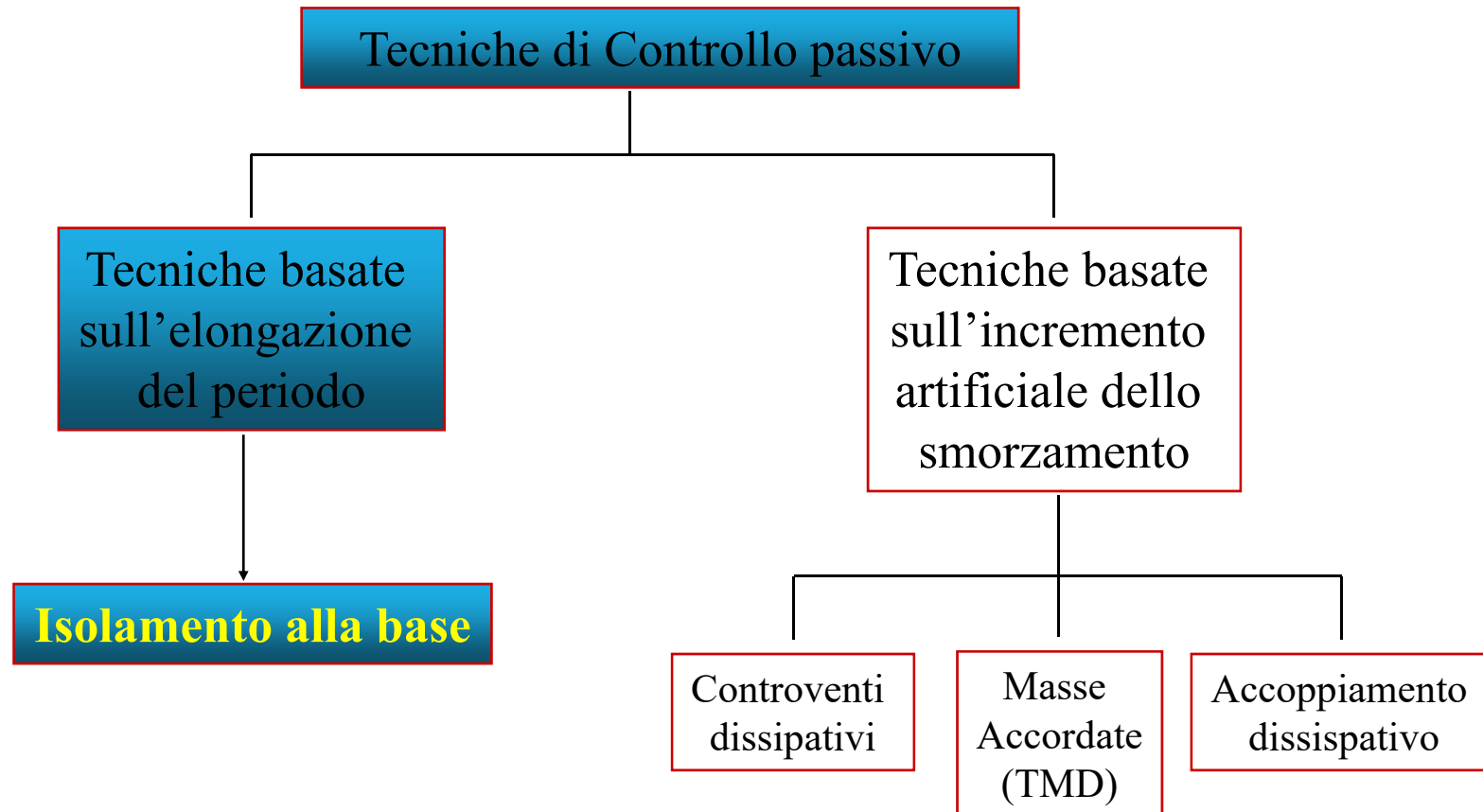
PRINCIPALI CAUSE DELLA VULNERABILITÀ SISMICA DEI SERBATOI

- ☐ Inadeguatezza della classificazione sismica (molti impianti sono stati realizzati prima che il sito fosse classificato sismico)
- ☐ Mancanza di una normativa specifica (Si utilizzano criteri di progetto simili a quelli usati per il progetto delle strutture civili)

POSSIBILI MODI DI INTERVENTO

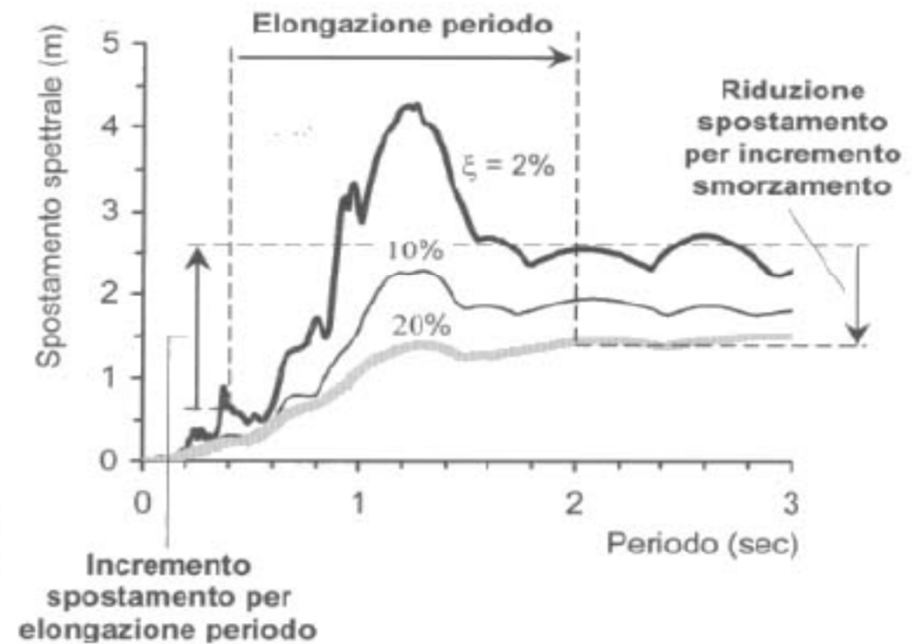
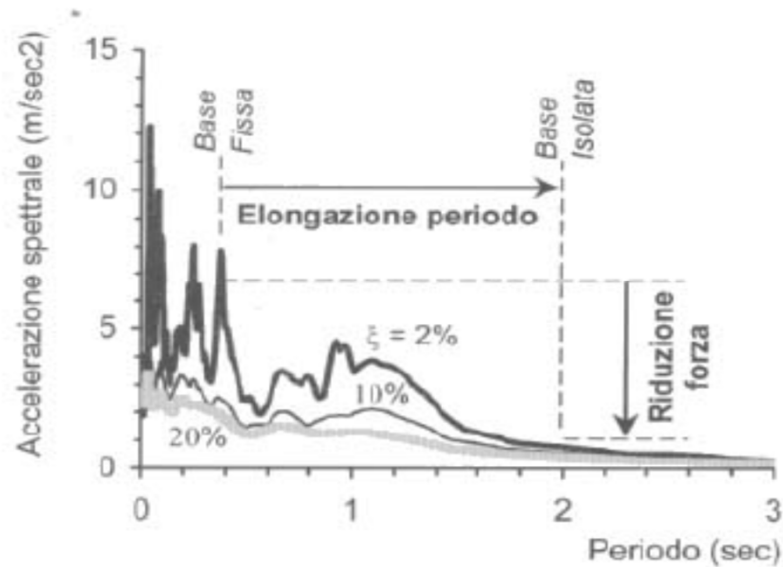
- In alcuni casi possono essere sufficienti interventi limitati (p.es. rinforzo delle strutture di sostegno dei tubi, adeguamento degli ancoraggi alle fondazioni, ecc.)
- Sostituzione dell'apparato con uno progettato per l'azione sismica
- Impiego di tecniche di controllo sismico passivo: controventi dissipativi, masse accordate, isolamento alla base

I SISTEMI PASSIVI DI PROTEZIONE SISMICA

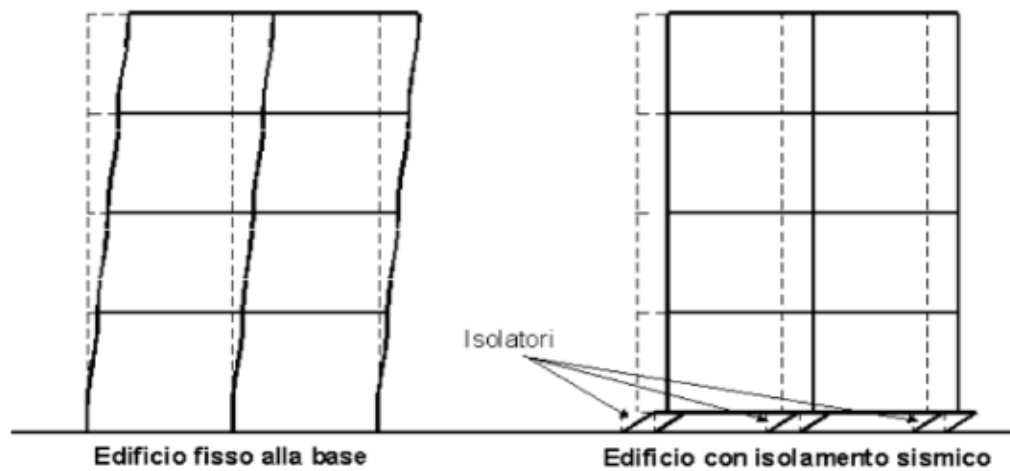


IL PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DEI SISTEMI DI ISOLAMENTO ALLA BASE

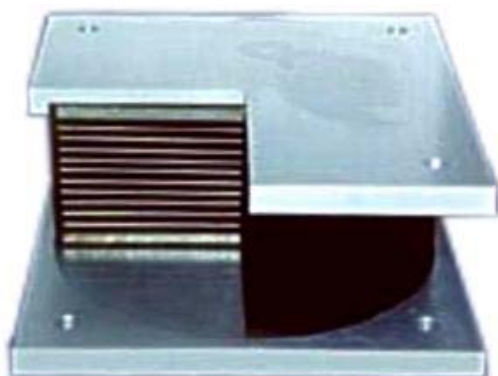
Dolce ed al. “ progetti di edifici isolati alla base”, IUSS Press



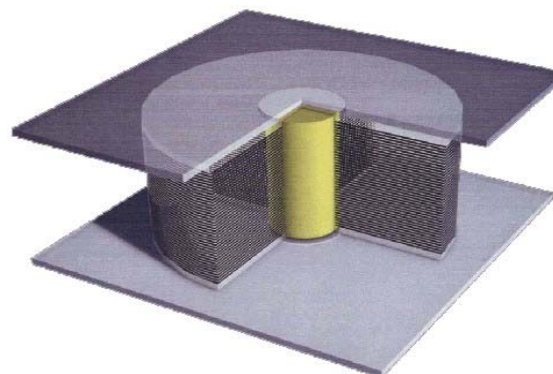
Deformata, sotto l'azione di un terremoto, di un edificio tradizionale e di uno con isolamento sismico



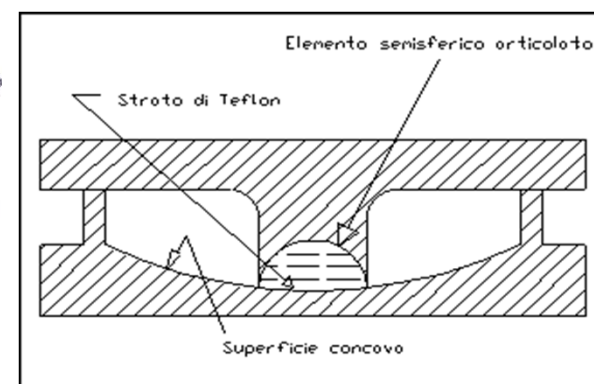
ISOLATORE ELASTOPLASTICO



ISOLATORE ELASTOMERICO

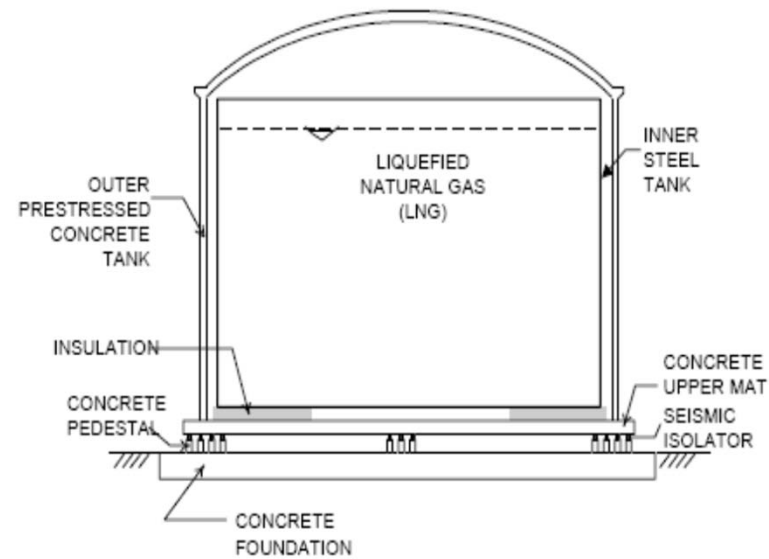
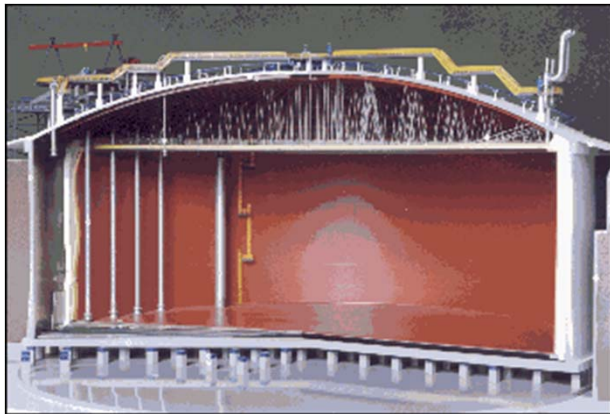


IS. ELAST. CON NUCLEO IN PIOMBO



ISOLATORE FRICTION PENDULUM

APPLICAZIONI DELL' ISOLAMENTO ALLA BASE AI SERBATOI



Isolamento alla base di serbatoi LNG

Isolamento mediante FPS del serbatoio LNG di
Revithoussa Island in Grecia

COMPORTAMENTO DINAMICO DEI SERBATOI CILINDRICI CON E SENZA ISOLAMENTO ALLA BASE

DINAMICA DEI SERBATOI CILINDRICI A BASE FISSA

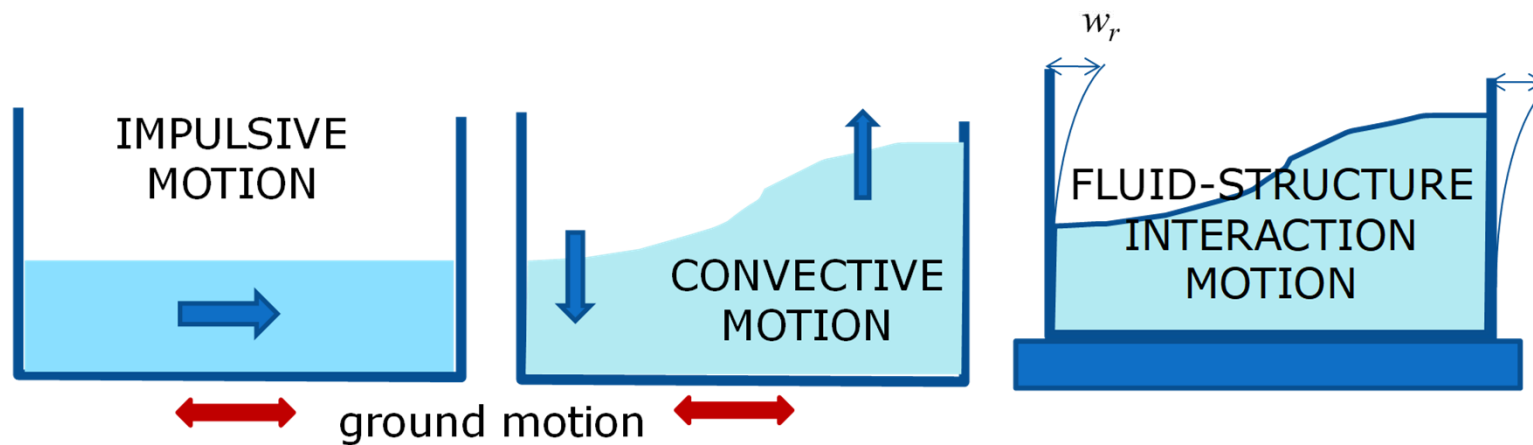
Hypotesis

- “Perfect Liquid “ (unviscous and incompressible)
- Laminar and slow motion
- Free liquid surfaces

$$\mathbf{v} = \text{grad}(\phi)$$

Laplace Equation

$$\Delta\phi = \frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial z^2} = 0$$



DINAMICA DEI SERBATOI CILINDRICI A BASE FISSA

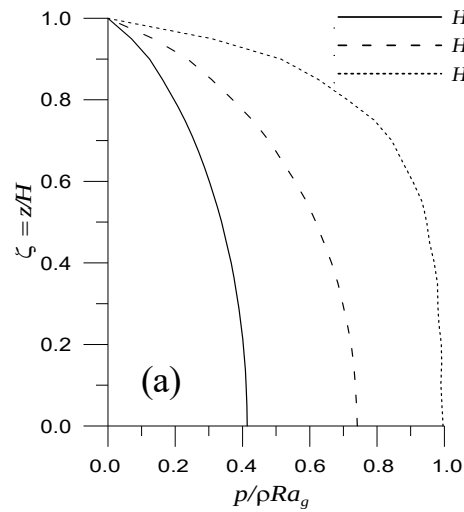
La soluzione dell'equazione di continuità $\Delta\phi = 0$ si divide in due parti:

- **Moto trascinamento**: Il serbatoio soggetto ad un'azione di trascinamento è considerato a comportamento rigido
- **Deformazione delle pareti**: Questo termine dipende dalle pressioni esercitate dal liquido sulle pareti e dunque richiede la soluzione di un problema di interazione fluido-struttura

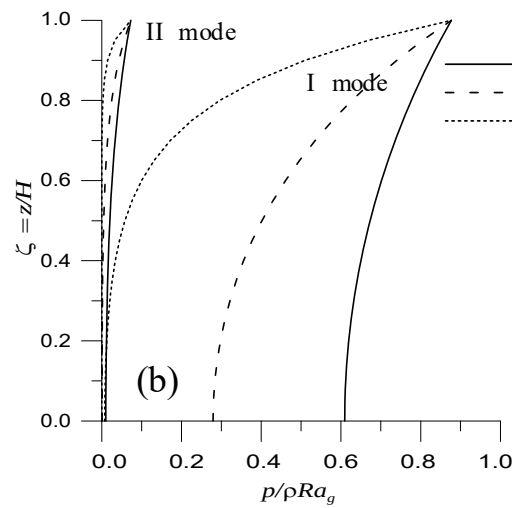
DINAMICA DEI SERBATOI CILINDRICI A BASE FISSA

Distribution of pressure along the height

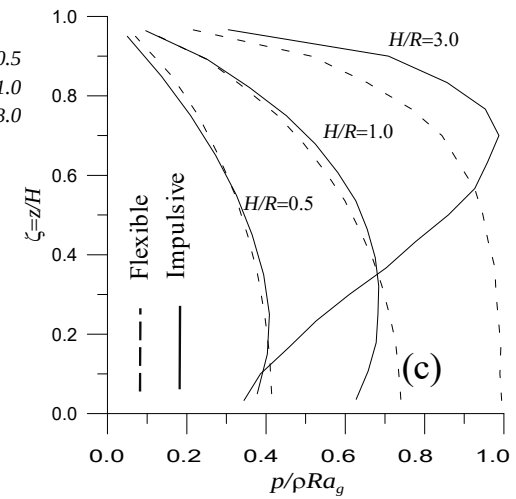
Impulsive



Convective



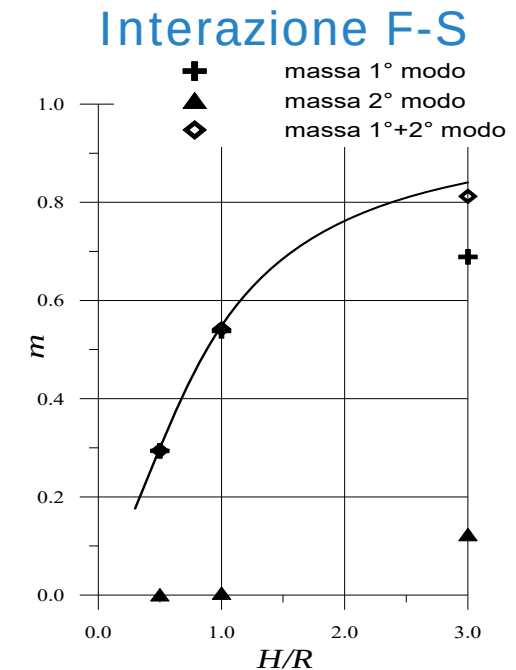
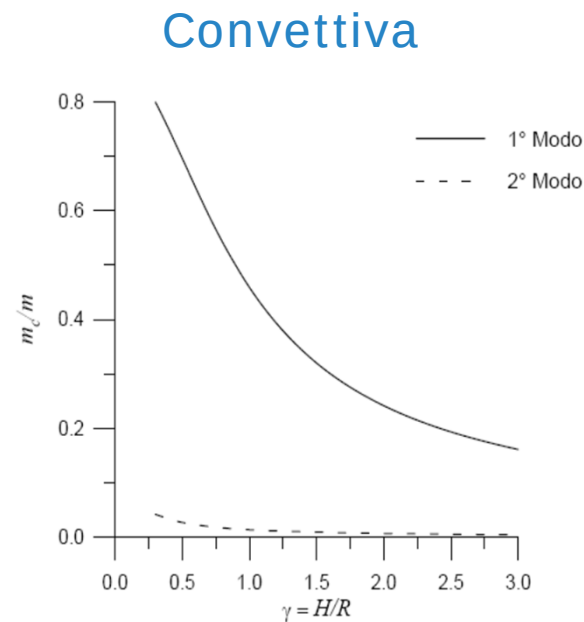
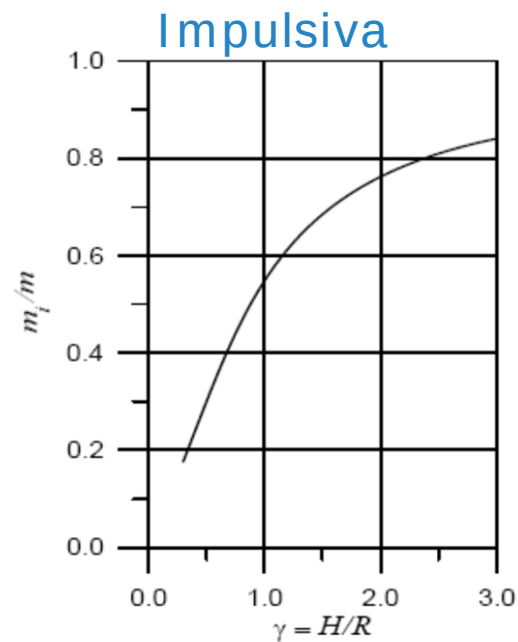
F-S interaction



DINAMICA DEI SERBATOI CILINDRICI A BASE FISSA

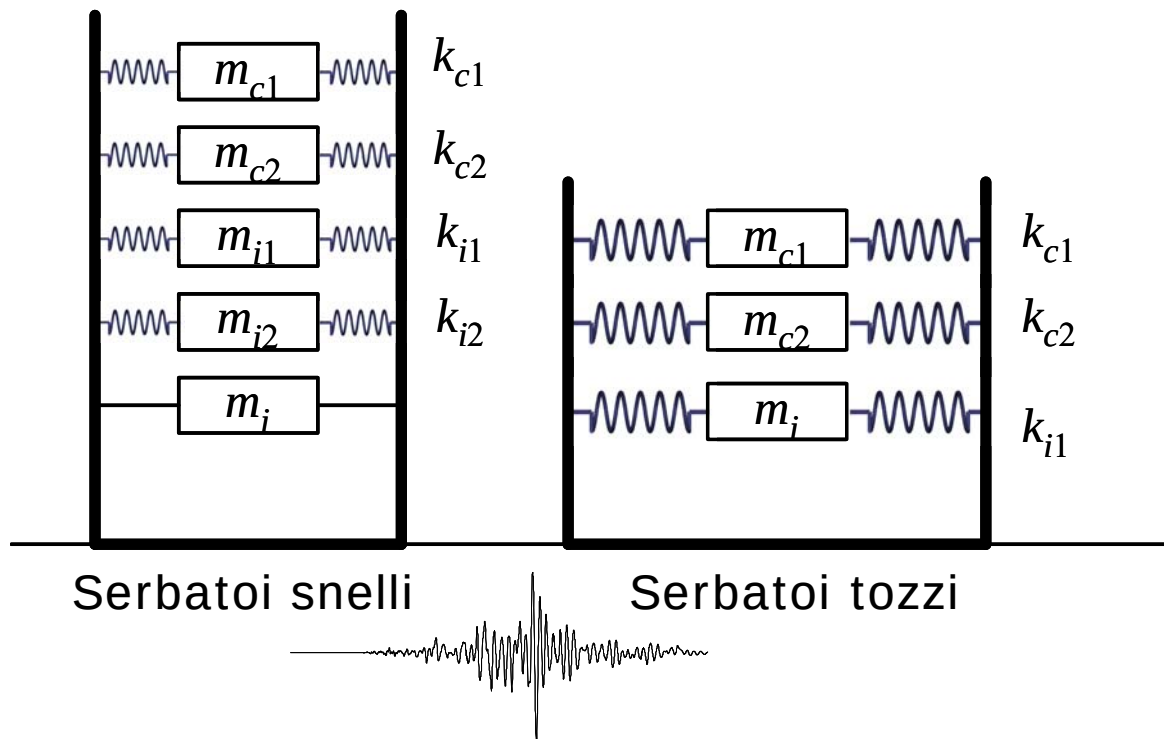
Modelli a masse discrete

$$Q_{jk}(t) = M m_{jk} A_{jk}(t) \quad \text{Taglio risultante}$$



DINAMICA DEI SERBATOI CILINDRICI A BASE FISSA

Modelli a masse discrete



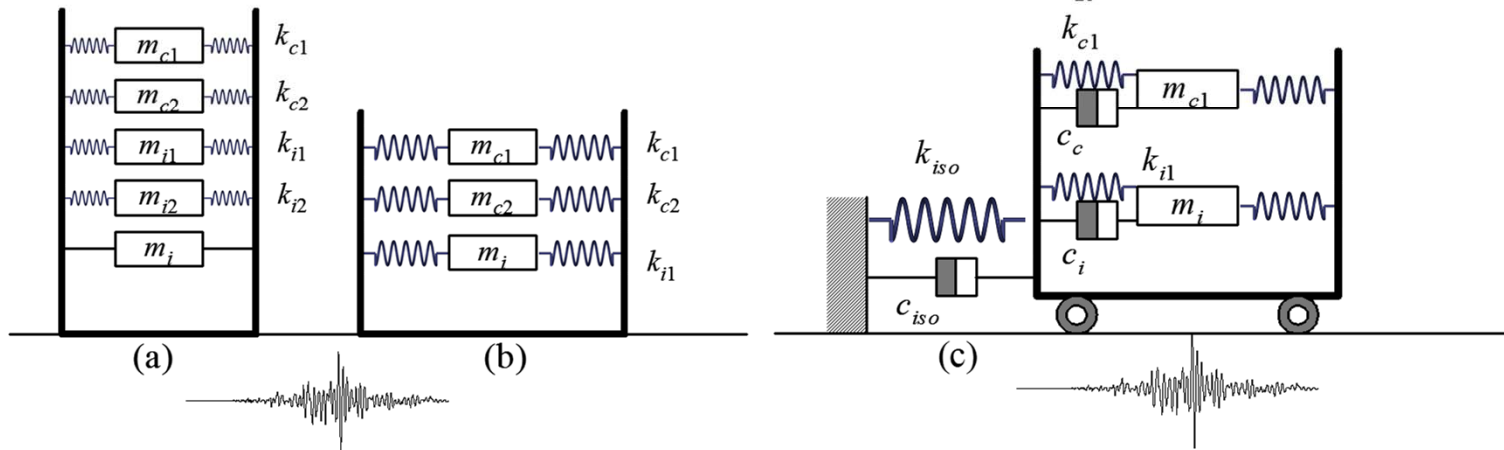
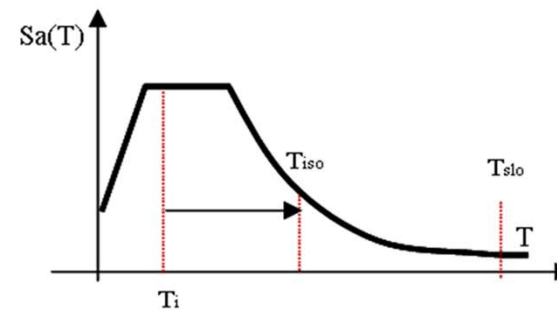
Rispetto ai modelli indicato in figura si aggiungono degli elementi viscosi, che tengono conto, in modo approssimato, della dissipazione di energia. Per il moto convettivo di considera un rapporto di smorzamento dello 0.5% e per il moto impulsivo del 1

SERBATOIO A BASE ISOLATA

Lumped mass models

$$T_{iso} \approx 2\pi \sqrt{\frac{m_i + m_s + m_b}{k_{iso}}}$$

Fundamental period
of the base isolated
tank



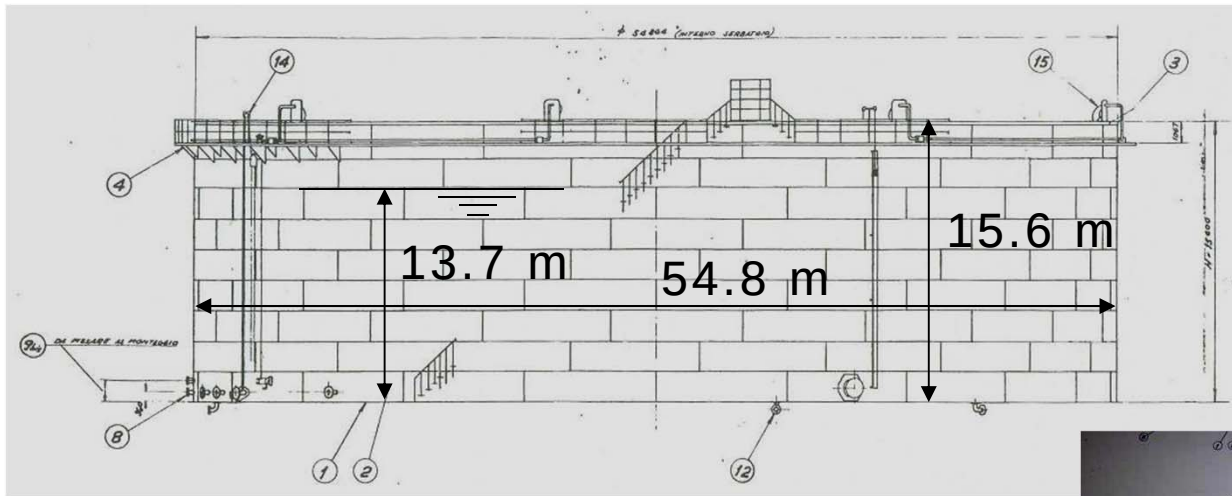
a) Slender tank ($H/R > 1$)

b) broad tank ($H/R < 1$)

c) base isolated tank

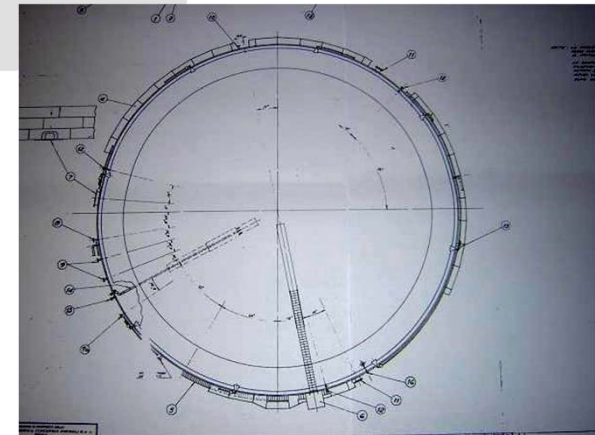
**PROVE SU TAVOLA VIBRANTE DI UN SERBATOIO
ATMOSFERICO CON E SENZA TETTA GALLEGGIANTE**

IL SERBATOIO IN SCALA REALE



Serbatoio per lo stoccaggio di derivati del petrolio

Tetto galleggiante a pontone



IL MODELLO SPERIMENTALE (SCALA 1:14)



Modello
senza
Tetto

IL MODELLO SPERIMENTALE (SCALA 1:14)



Modello
con
Tetto
Galleggiante

IL MODELLO SPERIMENTALE (SCALA 1:14)

Il problema della riduzione in scala del serbatoio

$$\omega_c = \sqrt{1.841 \frac{g}{R} \tanh\left(1.841 \frac{H}{R}\right)} \quad \omega_i \approx \frac{C}{H} \sqrt{\frac{Es}{\rho R}}$$

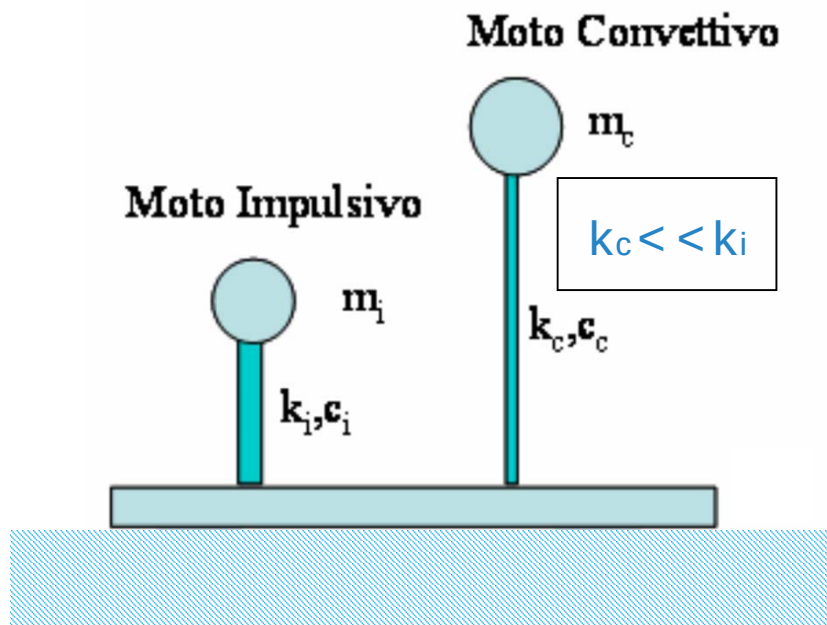
Frequenza di sloshing

Frequenza di vibrazione pareti
(EC8 – Parte 4)

Il periodo del moto convettivo è proporzionale alla radice quadrata delle dimensioni. Poiché il fattore di scala geometrico è 13.7 (≈ 14) il fattore di scala dei tempi per il moto convettivo è 3.7. Per ottenere lo stesso fattore di scala per il moto impulsivo occorrerebbe scalare lo spessore di circa 140 volte (≈ 0.14 mm). Si è deciso quindi di rispettare la sola scala dei tempi del moto di sloshing.

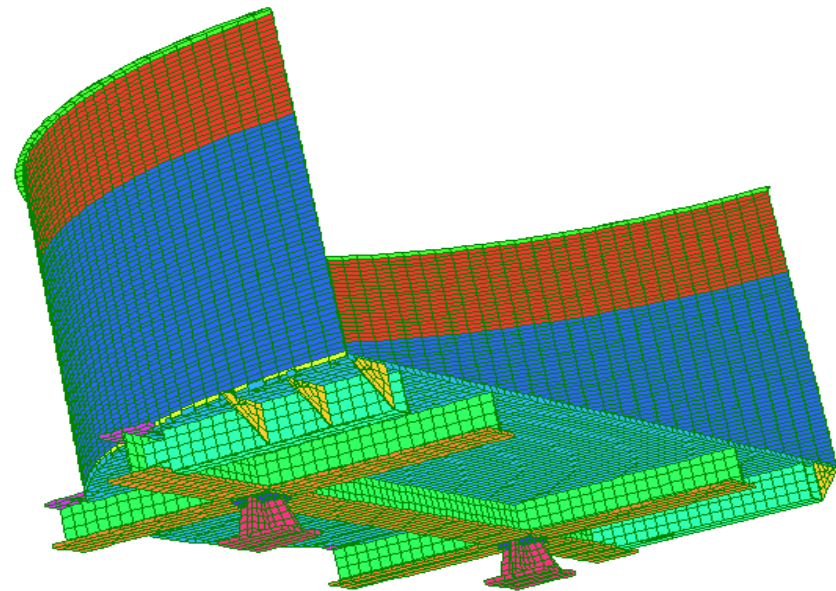
PROGETTO DEGLI ISOLATORI

DEFINIZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO (SERBATOI TOZZI)



Modello di calcolo a 2 GDL

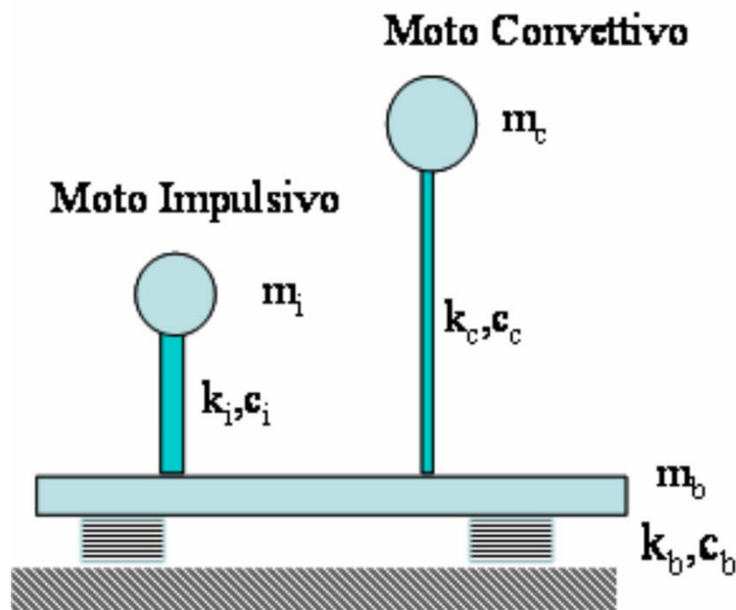
Frequenze del 1° modo delle pareti e dello sloshing: 21 Hz, 0.4 Hz



Modello di calcolo agli E.F
(Straus 7)

PROGETTO DEGLI ISOLATORI

DIMENSIONAMENTO DEGLI ISOLATORI ELASTOMERICI



Modello di calcolo del
serbatoio isolato alla base

$$k_b = \left(\frac{2\pi}{T_{iso}} \right)^2 m_t \quad m_t = m_i + m_b = 7t$$

$$T_{iso} = 2.8 \text{ sec} / \sqrt{13.7} = 0.756 \text{ sec}$$

Utilizzando lo spettro di progetto dell'OPCM 3274 per una zona sismica di I categoria e fattore d'importanza 1.4, l'accelerazione di progetto risulta pari a 0.625g e dunque la rigidezza complessiva degli isolatori risulta

$$K_b = 483 \text{ kN / m}$$

PROGETTO DEGLI ISOLATORI

DIMENSIONAMENTO DEGLI ISOLATORI ELASTOMERICI

$k_b = 120 \text{ kN/m}$ Rigidezza Isolatore

$G = 0.4 \text{ MPa}$ Modulo gomma

$A_{ti} = \frac{K_b \cdot t_e}{G} = 328 \text{ cm}^2$ Area isolatore

$D \cong 10 \text{ cm}$



PROGETTO DEGLI ISOLATORI

DIMENSIONAMENTO DEGLI ISOLATORI ELASTOMERICI

$$T_{iso}=2.1 \text{ sec}$$

Periodo d'isolamento in scala reale

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M_t}{K_t}} = 0.56s$$

Periodo d'isolamento in scala ridotta

$K_b = 465 \text{ kN / m}$

Rigidezza complessiva degli isolatori

Il progetto della forza di snervamento è stato effettuato in accordo con il metodo di progetto proposto da Ciampi ed al. (2003) da quale è risultata una forza complessiva di circa 9 kN.

PROGETTO DEGLI ISOLATORI

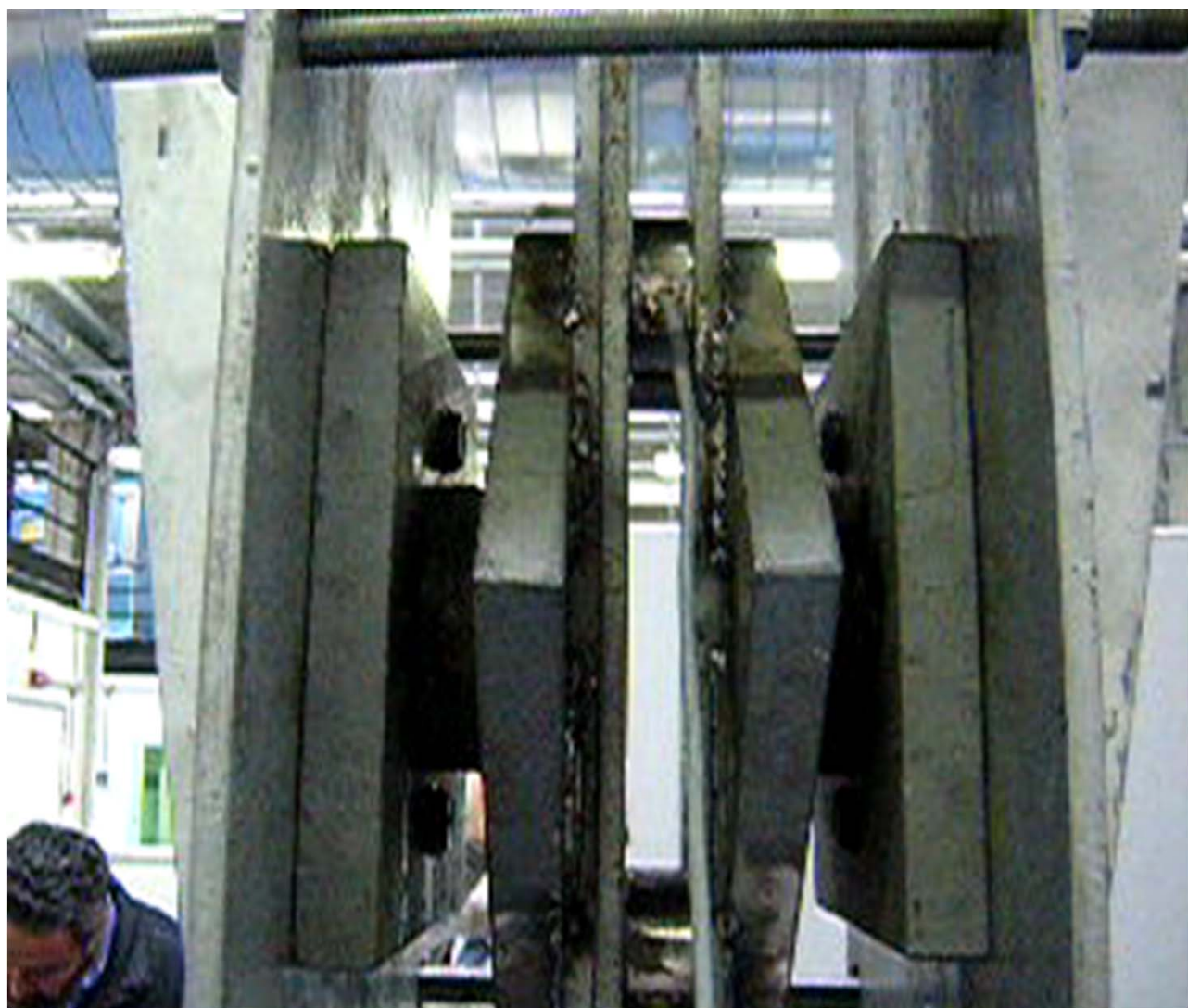
DIMENSIONAMENTO DEGLI ISOLATORI ELASTOMERICI



Gli isolatori sono stati realizzati dalla società ALGA spa di Milano e testati presso il laboratorio di Sperimentazione su materiali e Struttura dell'Univ. Roma Tre

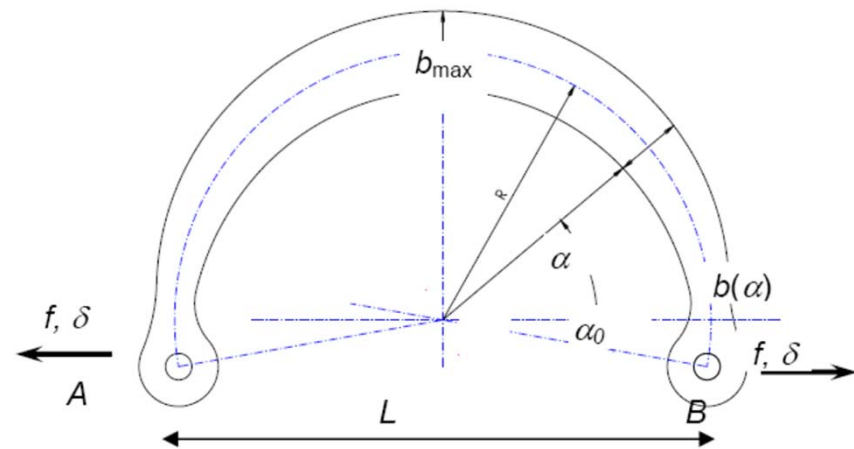
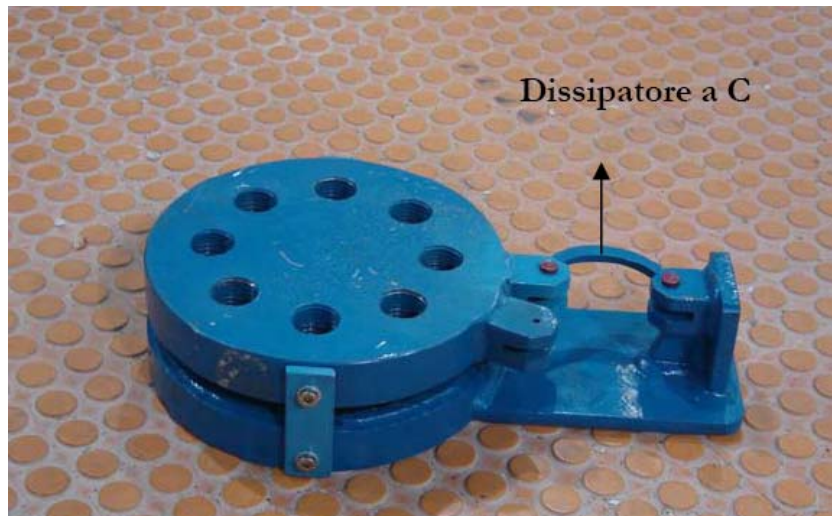


La rigidezza e lo smorzamento individuate sono rispettivamente $K_b = 115 \text{ kN/m}$, $\xi = 10 \%$



PROGETTO DEGLI ISOLATORI

DIMENSIONAMENTO DEGLI ISOLATORI ELASTOMERICI



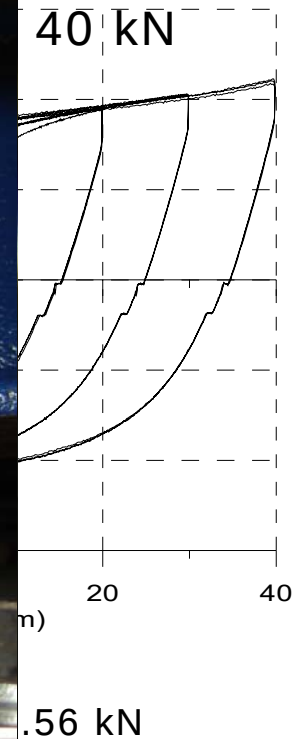
R	b_{max}	s	L	E	α_0	σ_y
mm	mm	mm	mm	N/mm ²	gradi	N/mm ²
50.66	17	8	90	206000	27°	355

PROGETTO DEGLI ISOLATORI

DIMENSIONAMENTO DEGLI ISOLATORI ELASTOMERICI

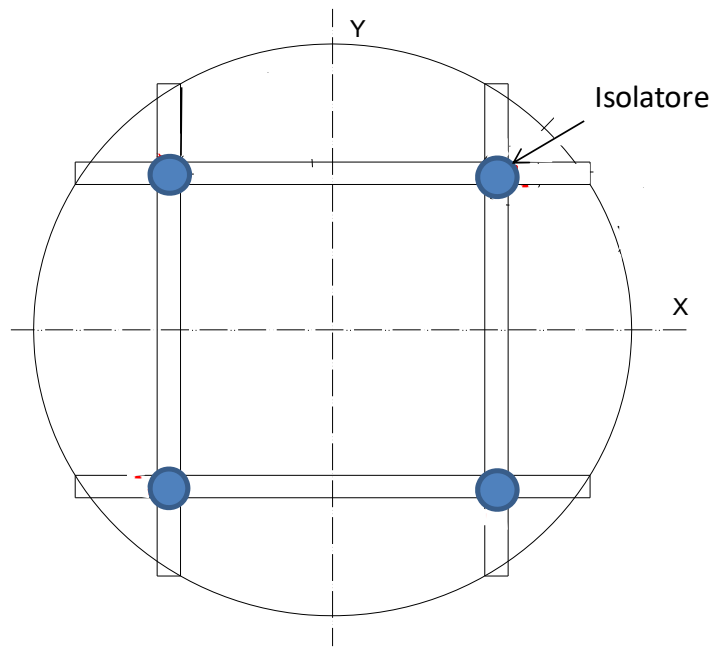


Gli isolatori
dalla società
e testati pre
Sperimenta
Struttura de



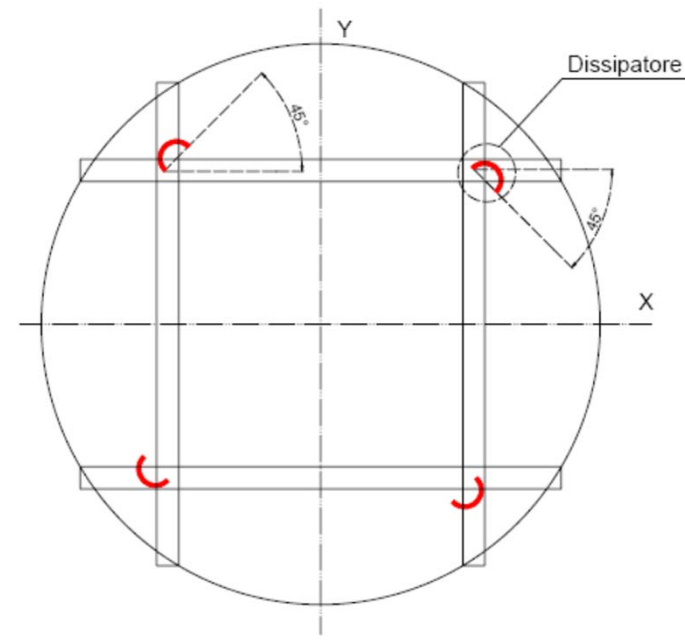
DESCRIZIONE DELLE PROVE

DISPOSIZIONE DEGLI ISOLATORI



Isolatori elastomerici

$$K_{tot} = 4k_{1iso} \quad F_{tot} = 4F_{1y}$$



Isolatori elastoplastici

$$K_{tot} = 2k_{1iso} \quad F_{tot} = 2\sqrt{2}F_{1y}$$

DESCRIZIONE DELLE PROVE

TAVOLA VIBRANTE

Tavola vibrante installata presso il Centro Ricerche ENEA-Casaccia



DESCRIZIONE DELLE PROVE

DISPOSIZIONE DEI SENSORI

TOTALE N° 32 SENSORI E CANALI DI ACQUISIZIONE



SUL MANTELLO

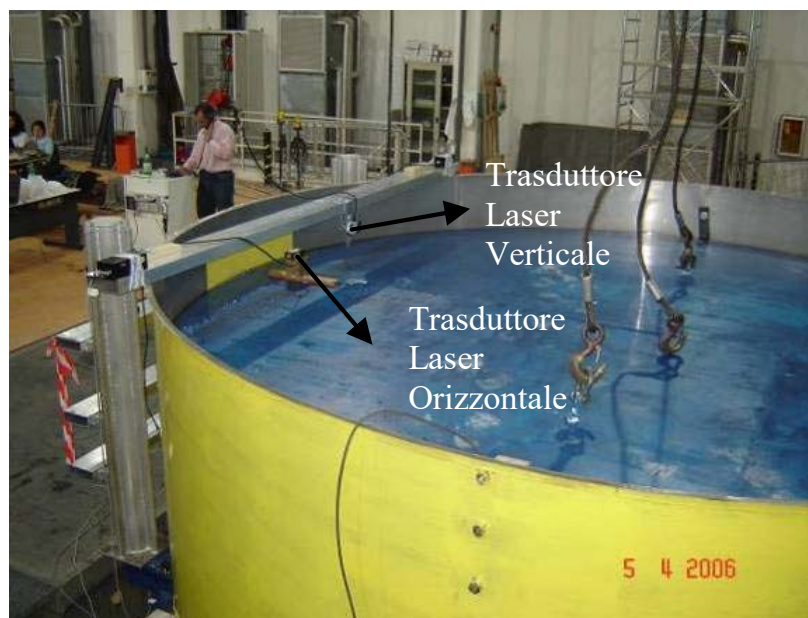


DISPOSIZIONE DEGLI STRAIN-GAUGES
PER LA MISURA DELLE DEFORMAZIONI

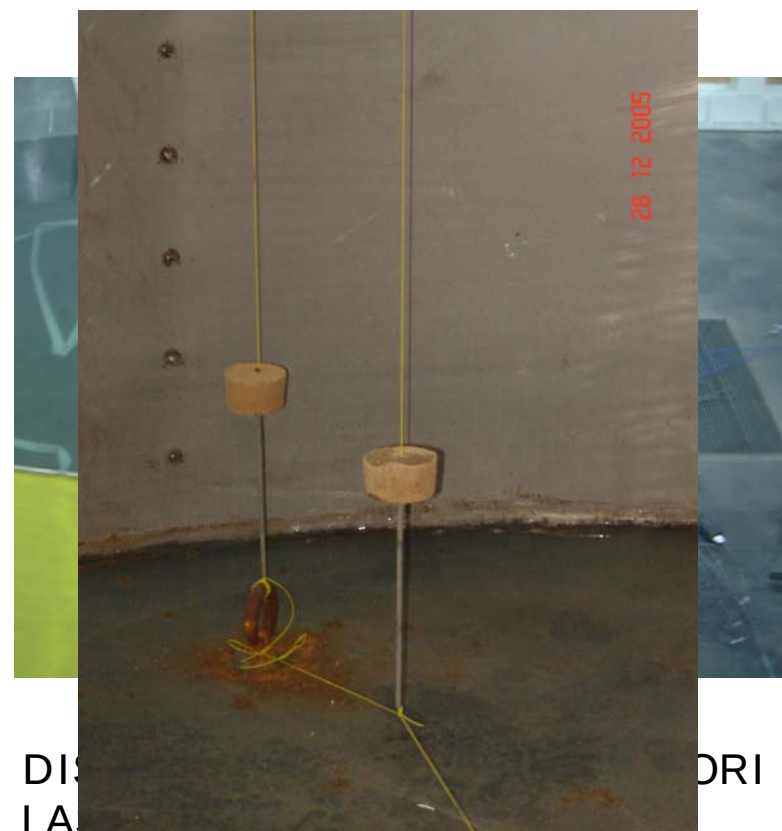
SUL MANTELLO

DESCRIZIONE DELLE PROVE

DISPOSIZIONE DEI SENSORI



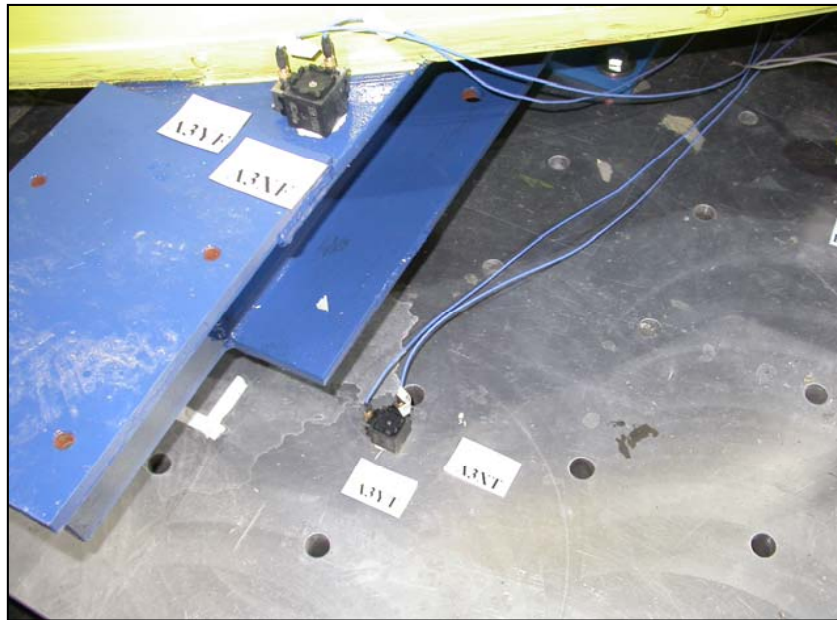
DISPOSIZIONE DEI TRASDUTTORI
PER LA MISURA DELLO SLOSHING
E LO SPOSTAM. ORIZZ. DEL TETTO



DISPOSIZIONE DEI TRASDUTTORI
PER LA MISURA DELLO SLOSHING
IN ASSENZA DI TETTO

DESCRIZIONE DELLE PROVE

DISPOSIZIONE DEI SENSORI



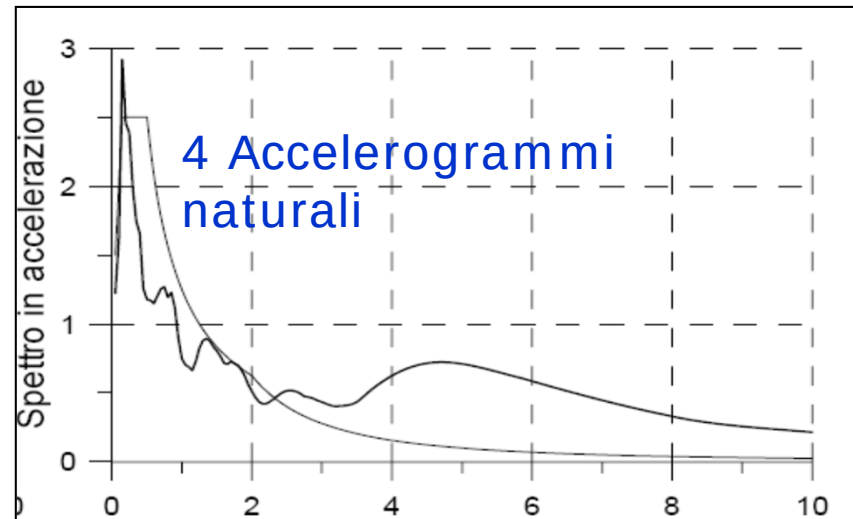
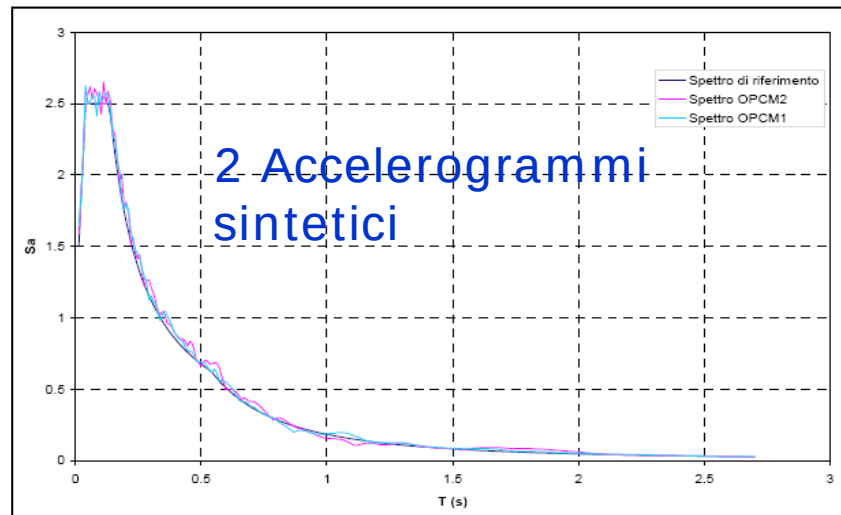
DISPOSIZIONE DEGLI ACCELEROMETRI
SULLA TAVOLA E SUL FONDO DEL
SERBATOIO



DISPOSIZIONE DEI TRASDUTTORI
A FILO PER LA MISURA DELLO
SPOSTAMENTO SERBATOIO-TAVOLA

DESCRIZIONE DELLE PROVE

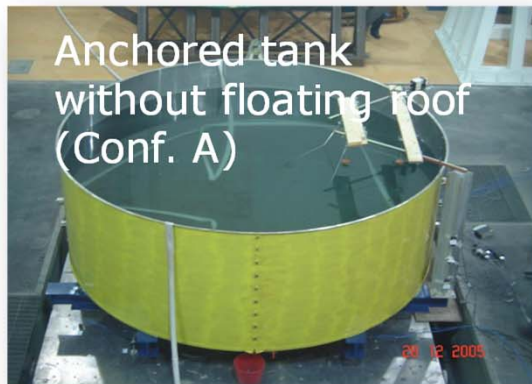
AZIONE SISMICA



Accelerogramma	PGA (g)	Durata (s)	N° punti	Δt (s)
<i>IRPINLAEQ,11/23/80,19:34:54,STURNO, 270</i>	0.313	40.00	16392	0.00244
<i>DUZCE 11/12/99, DUZCE, 180 (ERD)</i>	0.482	25.88	5177	0.005
<i>KOCAELI 08/17/99ARCELIK090 (ERD)</i>	0.149	28.00	5600	0.005
<i>CHI-CHI 09/20/99, TCU120, W (CWB)</i>	0.268	90	18000	0.005

DESCRIZIONE DELLE PROVE

CONFIGURAZIONI DI PROVA



DESCRIZIONE DELLE PROVE

PROGRAMMA DELLE PROVE

Configurazioni di prova:

- Base fissa senza tetto (A)
- Base fissa con tetto (B)
- Base isolata con isolatori elastomerici (C)
- Base isolata con isolatori elastoplastici (D)

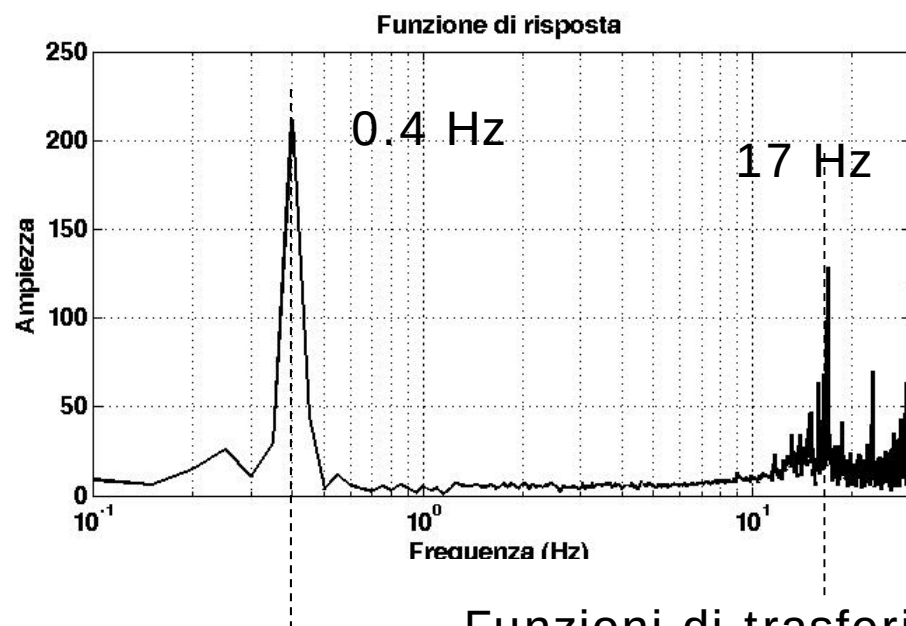
Tipologie di prova e segnali :

- Caratterizzazione dinamica – Rumore bianco, Sine Sweep
- Risposta sismica – Accelerogrammi sintetici e naturali

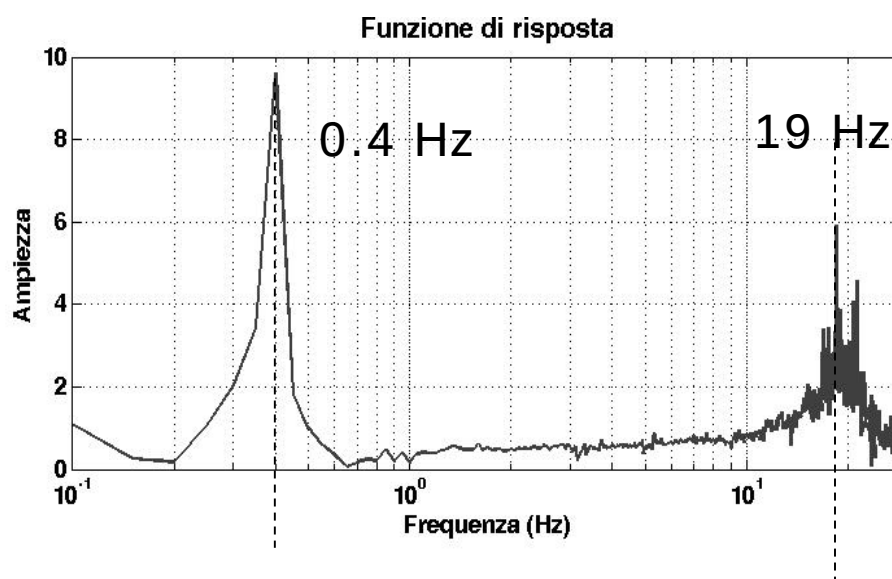
DESCRIZIONE DELLE PROVE

CARATTERIZZAZIONE DINAMICA: SERBATOIO BASE FISSA

Senza tetto galleggiante



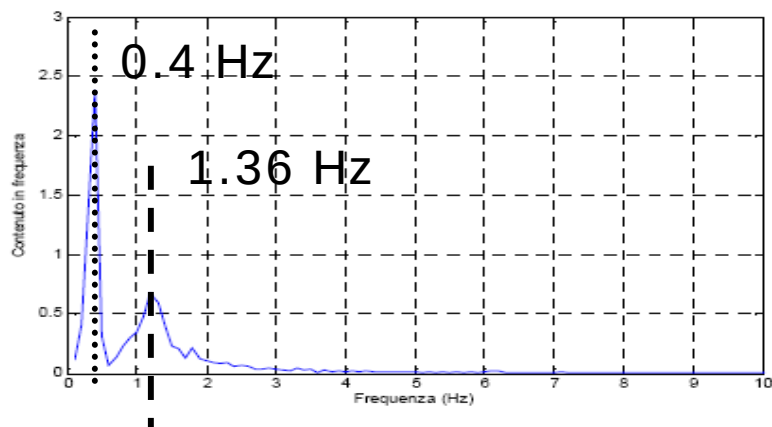
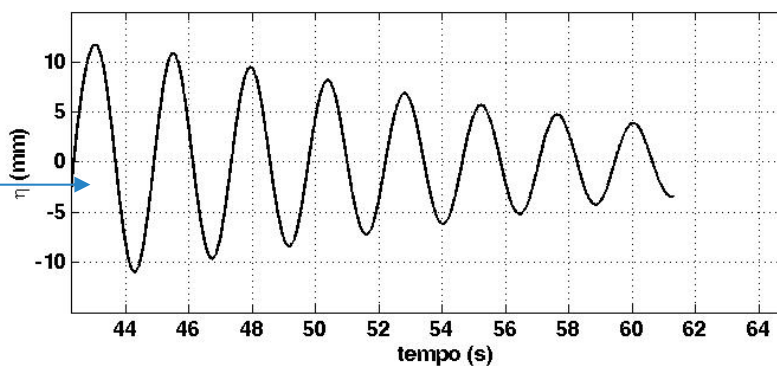
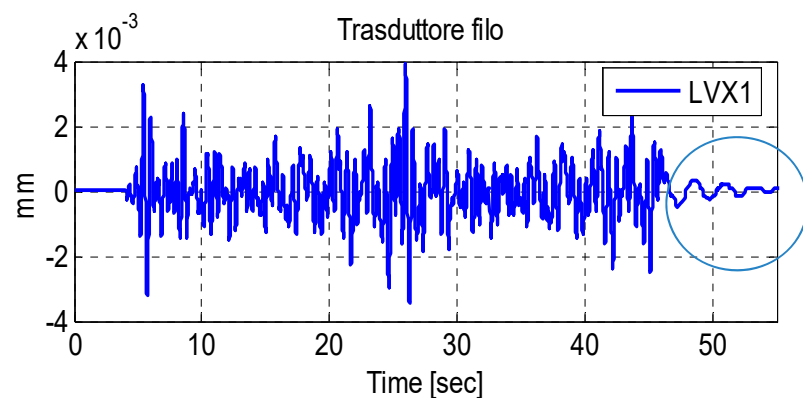
Con tetto galleggiante



Funzioni di trasferimento della pressione

DESCRIZIONE DELLE PROVE

CARATTERIZZAZIONE DINAMICA: SERBATOIO ISOLATO - EM

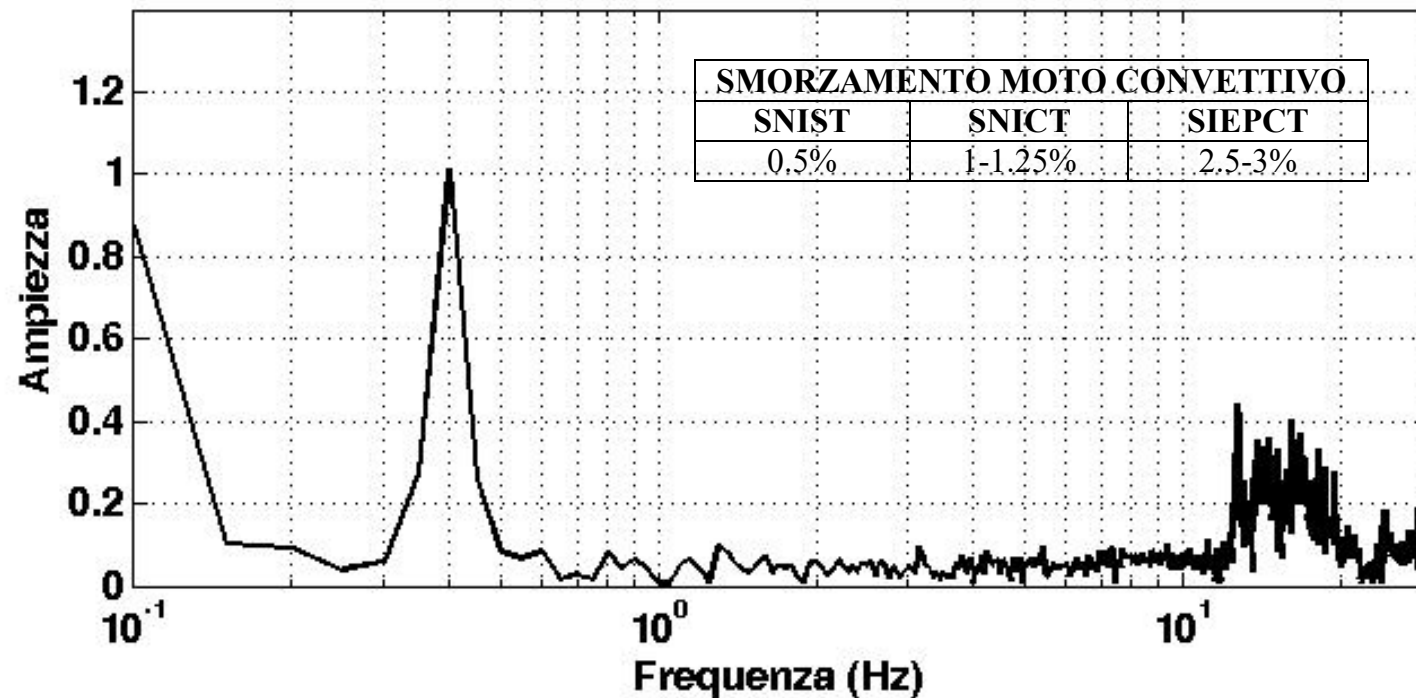


SMORZAMENTO MOTO CONVETTIVO		
SNIST	SNICT	SIEMCT
0.5%	1-1.25%	2.5-3%

DESCRIZIONE DELLE PROVE

CARATTERIZZAZIONE DINAMICA: **SERBATOIO ISOLATO - EP**

Funzione di risposta

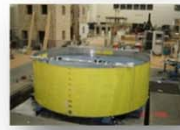
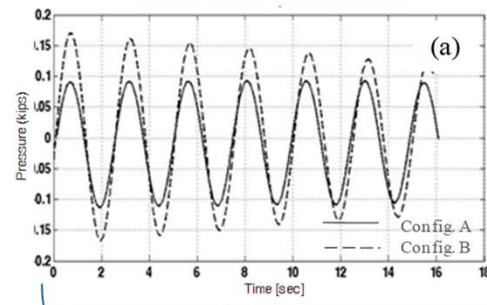


Funzione di trasferimento di uno strain-gauge

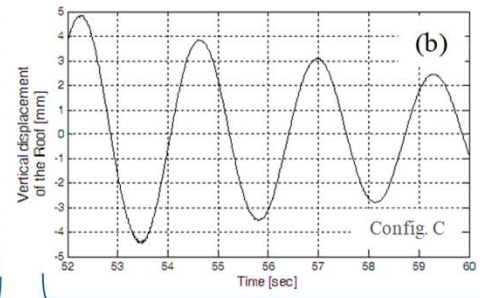
DESCRIZIONE DELLE PROVE

CARATTERIZZAZIONE DINAMICA: SLOSHING

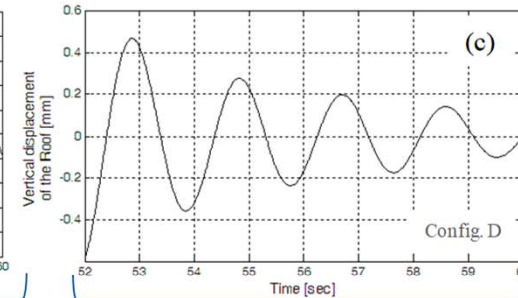
Anchored tank
W and W/O
Floating Roof (A,B)



Isolated tank (HDRB)
with Floating Roof (C)



Isolated tank (SMD)
with Floating Roof (D)

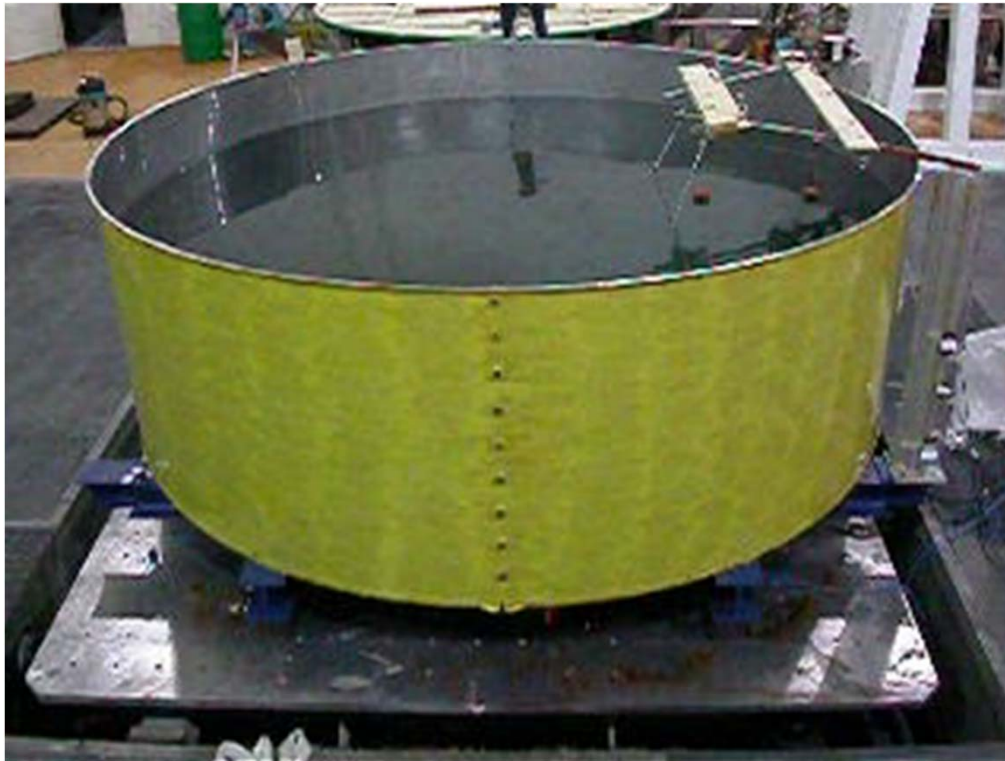


Damping of convective motion

Config. A	Config. B	Config. C /D
0.5%	1.25%	2.0%-3.0%

DESCRIZIONE DELLE PROVE

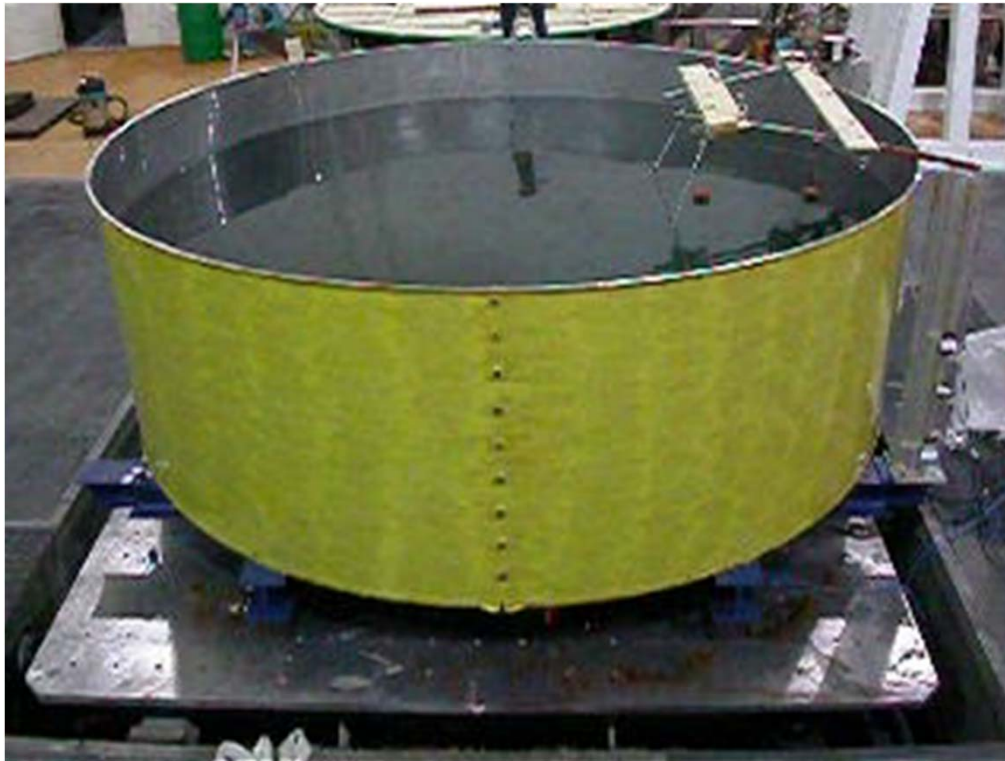
CARATTERIZZAZIONE DINAMICA: **SLOSHING**



PROVA SISMICA
SERBATOIO A BASE FISSA

DESCRIZIONE DELLE PROVE

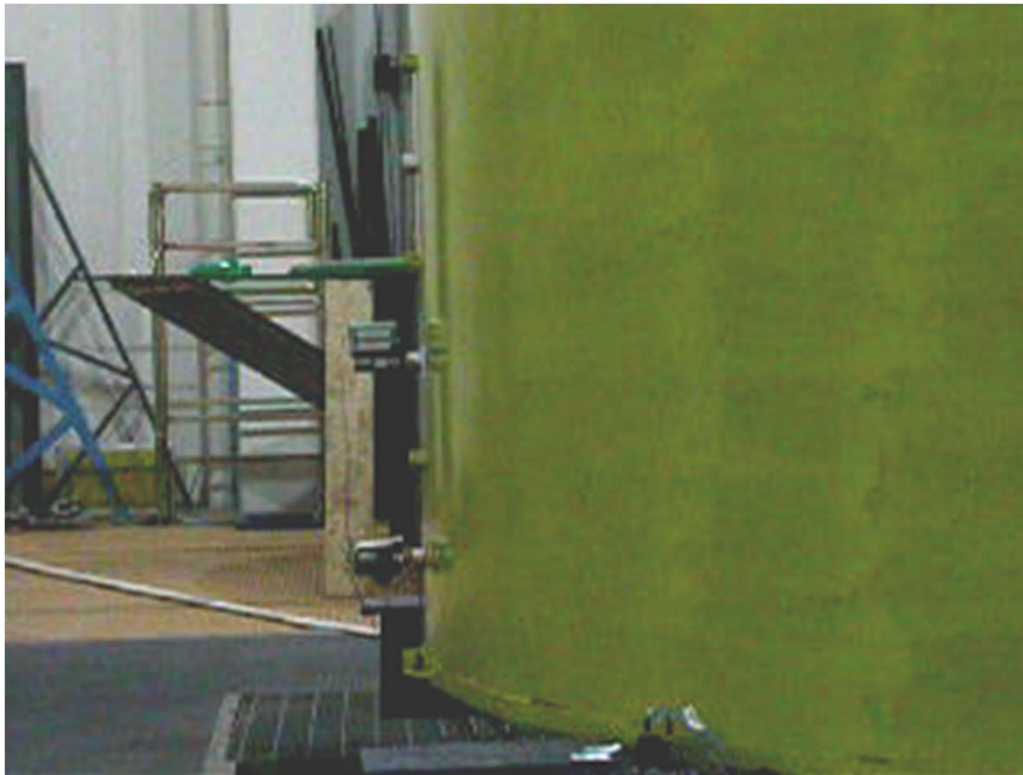
CARATTERIZZAZIONE DINAMICA: **SLOSHING**



PROVA SISMICA
SERBATOIO A BASE FISSA

DESCRIZIONE DELLE PROVE

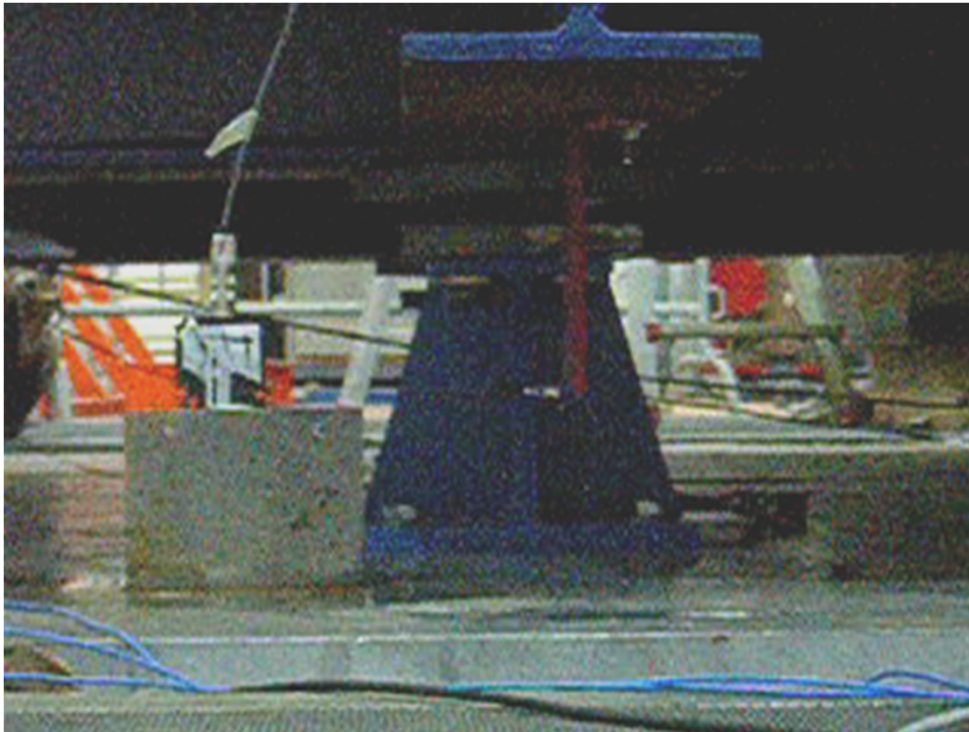
CARATTERIZZAZIONE DINAMICA: **SLOSHING**



PROVA SISMICA
SERBATOIO A BASE FISSA

DESCRIZIONE DELLE PROVE

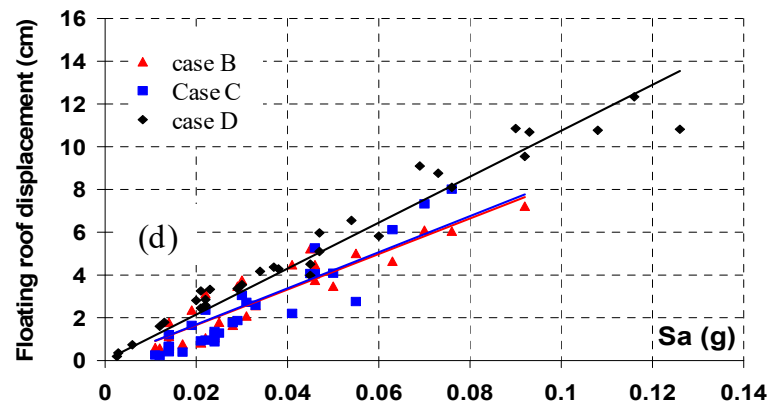
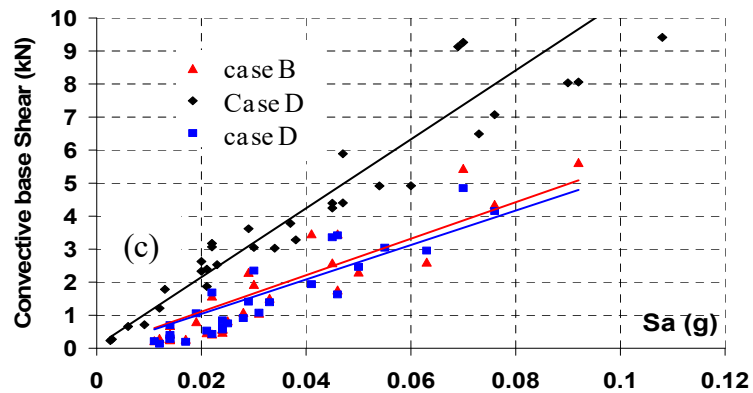
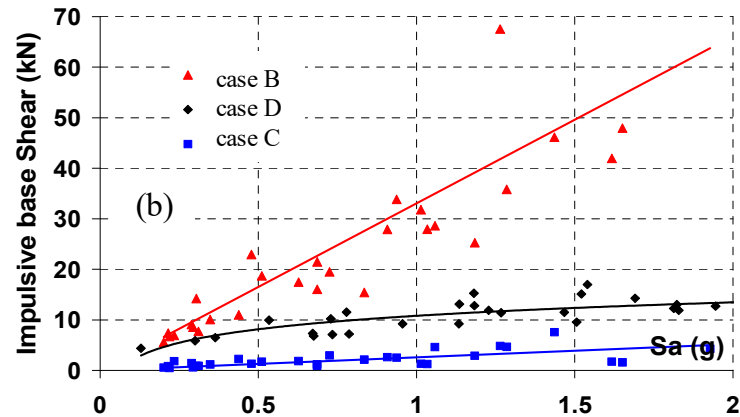
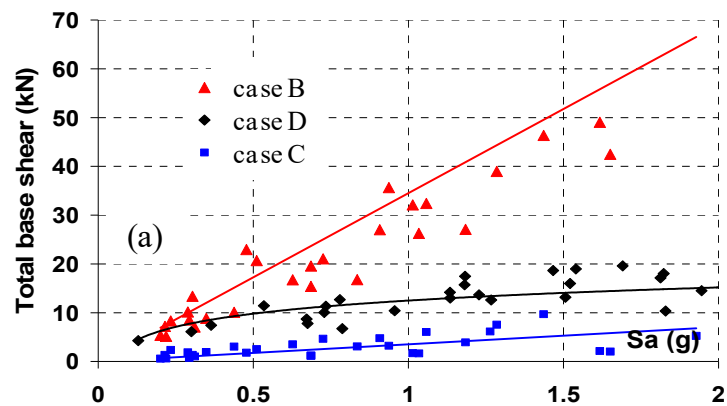
CARATTERIZZAZIONE DINAMICA: **SLOSHING**



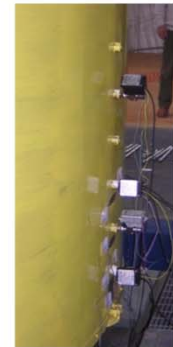
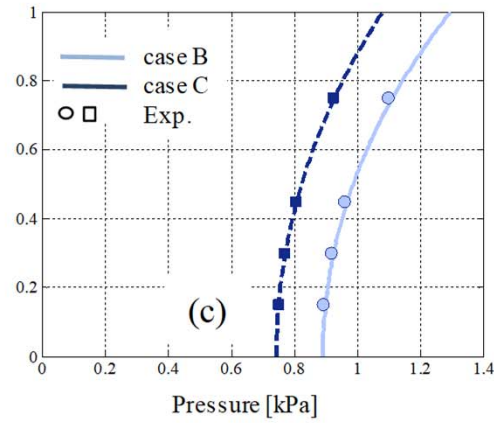
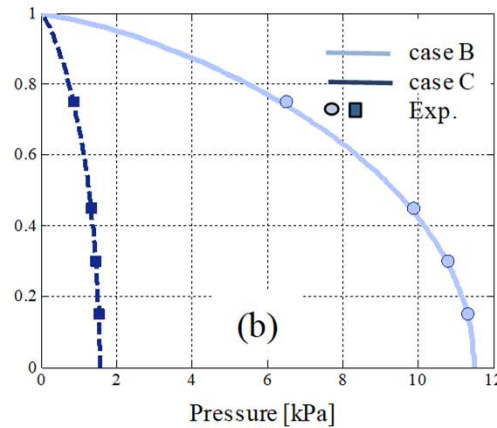
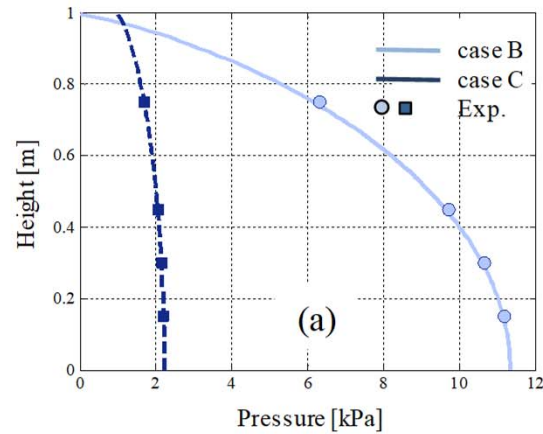
PROVA SISMICA
SERBATOIO A BASE ISOLATA

DESCRIZIONE DELLE PROVE

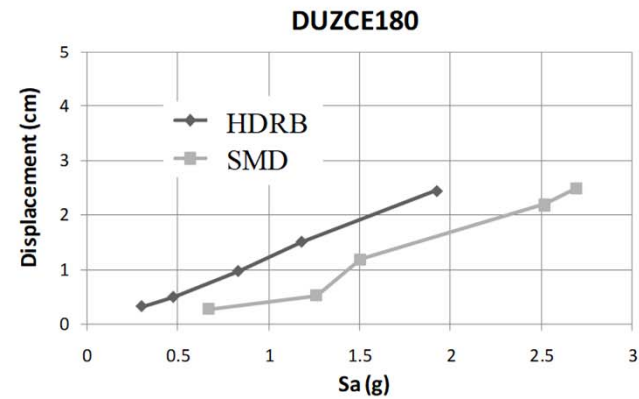
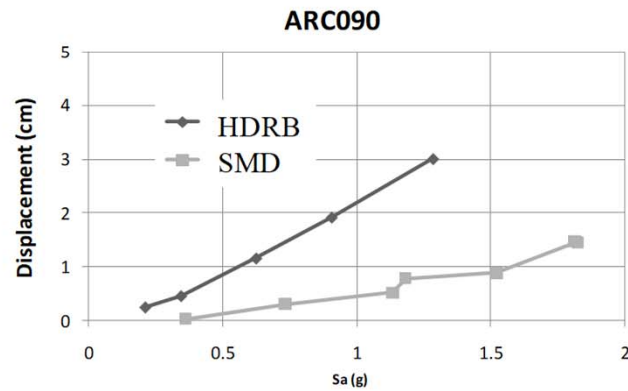
TEST SISMICI: EFFICACIA DELL'ISOLAMENTO



Distribution along the height of the pressure for Conf. B and C



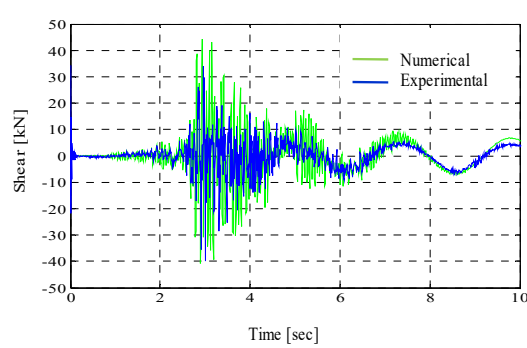
Tank base displacements



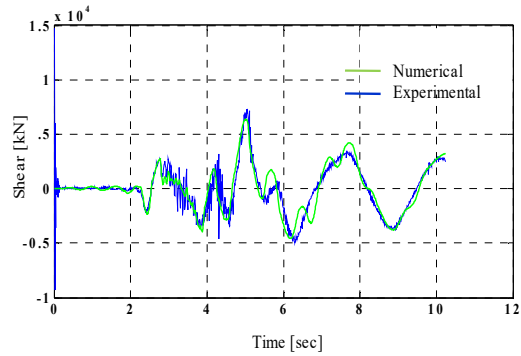
DESCRIZIONE DELLE PROVE

TEST SISMICI: **CONFRONTO NUMERICO/SPERIMENTALE**

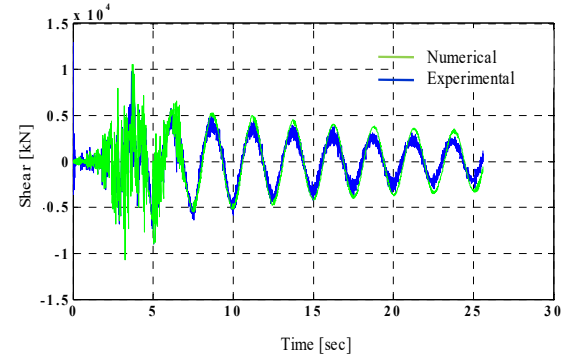
Time-History of the base shear (Config. B)



Total base shear

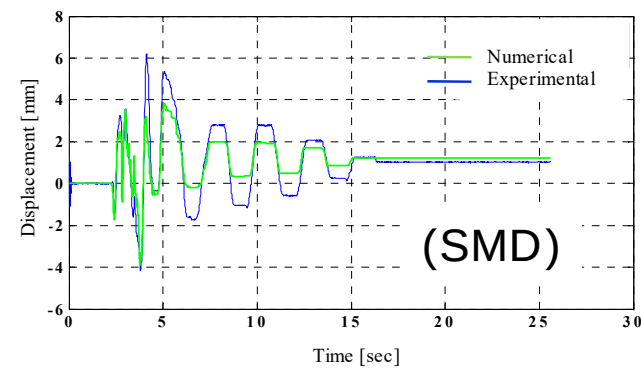
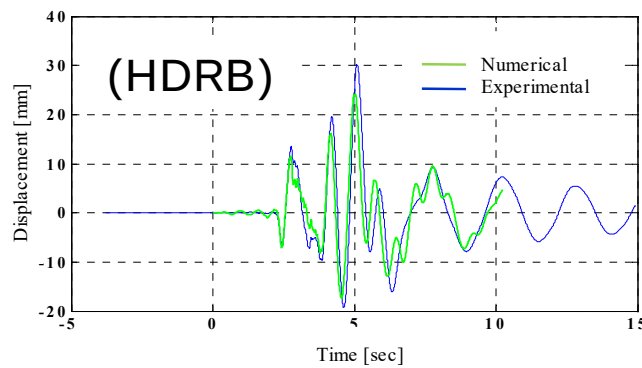


Convective motion



Impulsive motion

Tank base displacements



CONCLUSIONI

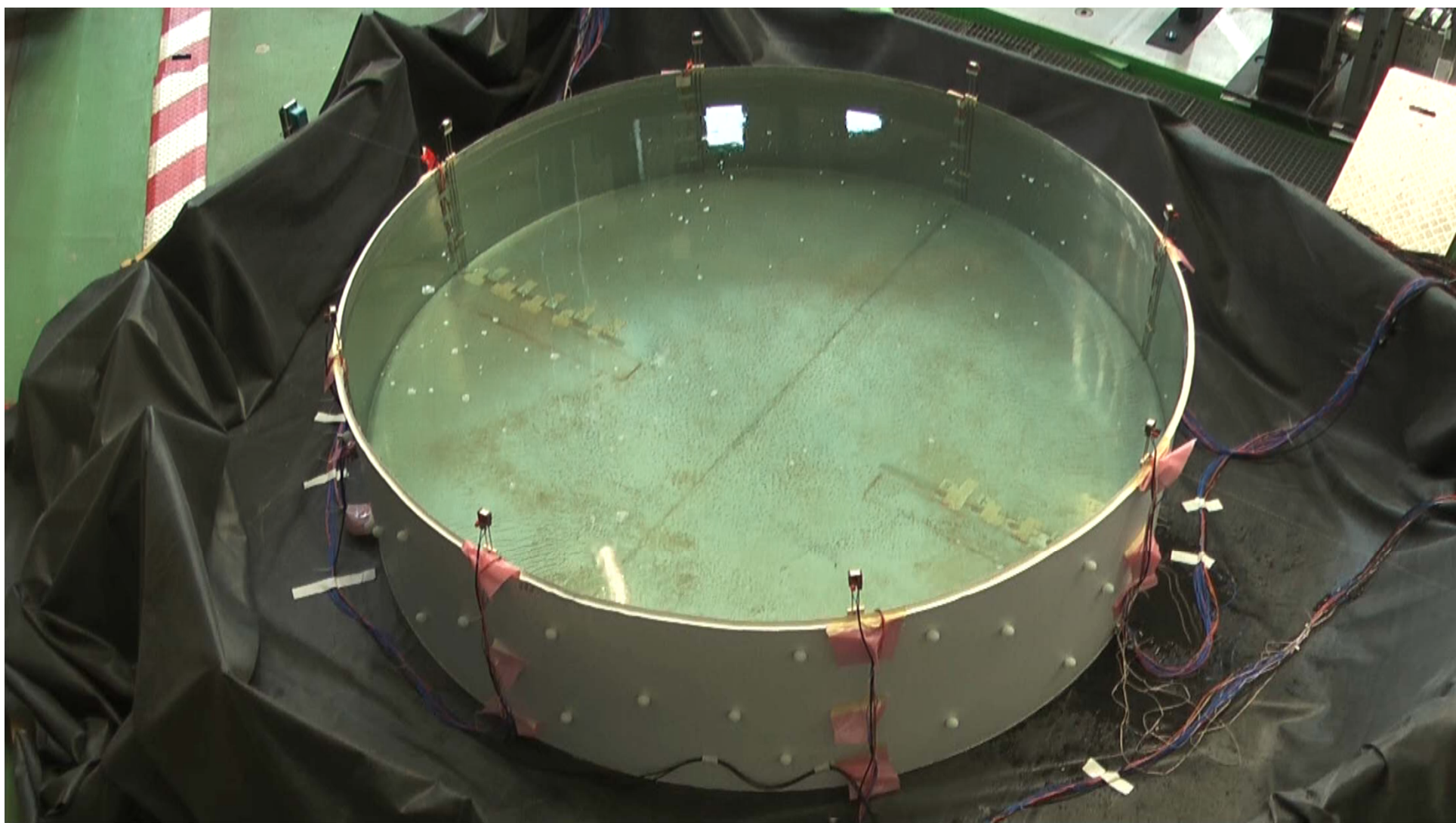
- E' stata indagata l'efficacia delle tecniche di isolamento sismico nella protezione degli impianti industriali, in particolare di serbatoi per impianti petrolchimici.
- Oltre all'impiego di modelli numerici, lo studio è stato condotto eseguendo una numerosa serie di prove dinamiche, utilizzando la tavola vibrante dell'ENEA alla Casaccia, su di un modello in scala 1:14 di un grande serbatoio per lo stoccaggio del petrolio greggio, in tre configurazioni: a base fissa con superficie libera e con tetto galleggiante, isolato con dispositivi elastomerici ed elasto-plastici.
- I risultati delle prove, confermano l'efficacia dei sistemi d'isolamento nel ridurre le pressioni totali generate dal sisma sulle pareti dei serbatoio. Gli isolatori EM hanno mostrato però una prestazione migliore.
- Si conferma infine gran parte di quanto previsto dai modelli teorici, aggiungendo comunque alcune informazioni interessanti, in particolare l'elevato smorzamento del moto di sloshing prodotto dall'isolamento mostra che questa tecnica ha un'influenza positiva anche su questo fenomeno.

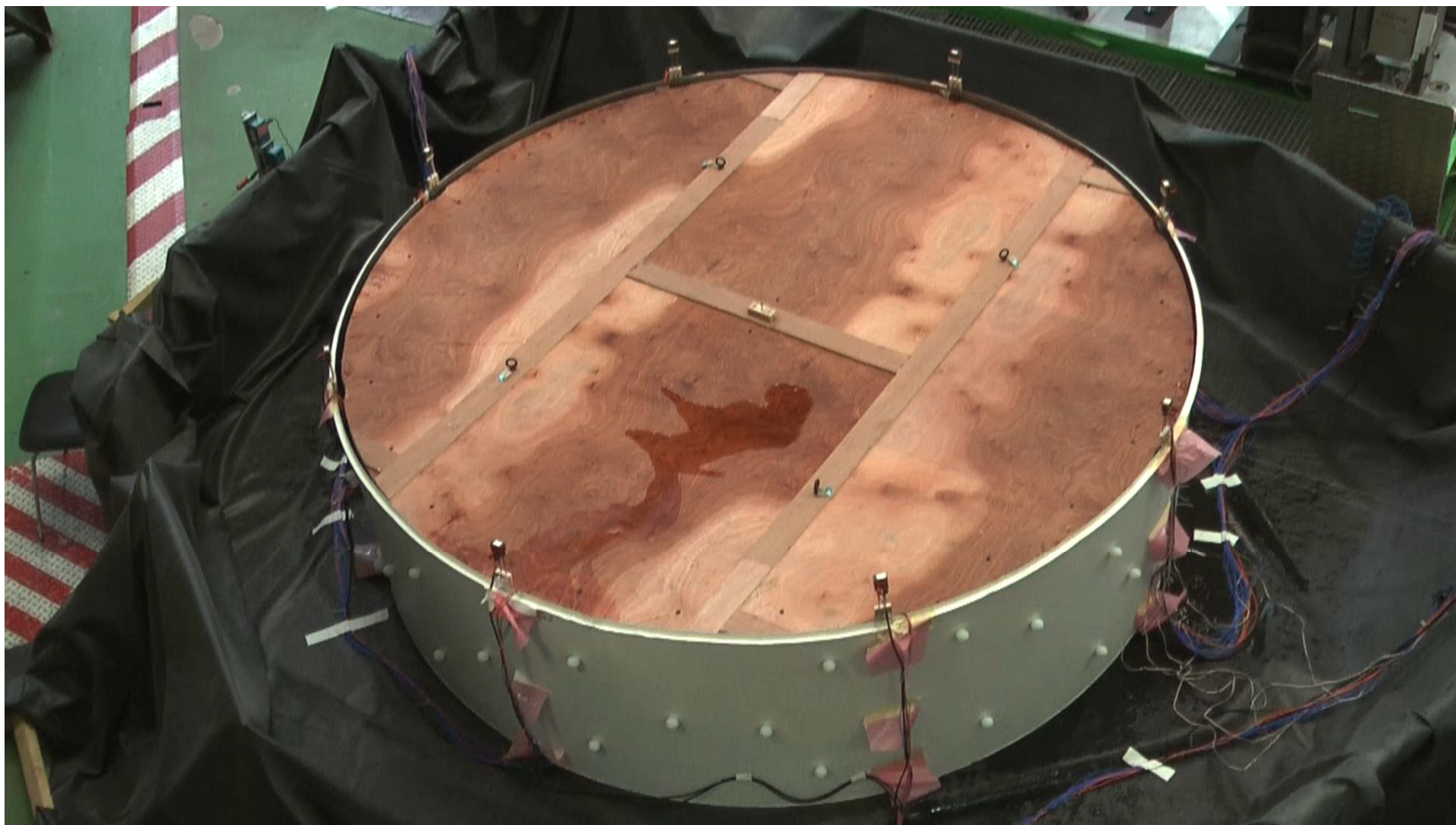


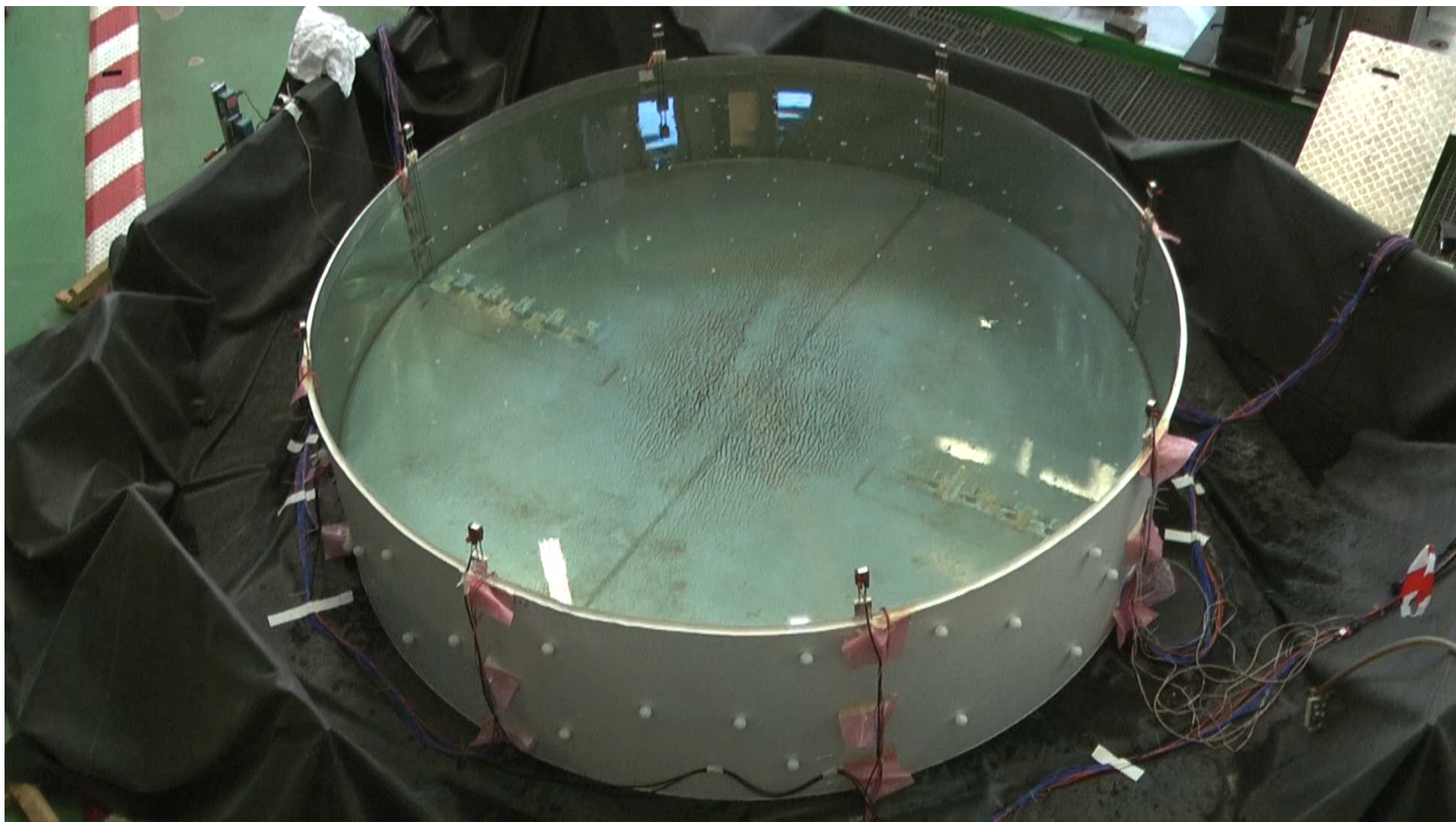
INDUSE² *safety*

COMPONENT FRAGILITY EVALUATION AND SEISMIC SAFETY
ASSESSMENT OF "SPECIAL RISK" PETROCHEMICAL PLANTS UNDER
DESIGN BASIS AND BEYOND DESIGN BASIS ACCIDENTS
(INDUSE-2-SAFETY)
PROJECT DURATION: JULY 2014-JUNE 2017









GRAZIE PER L'ATTENZIONE