

Confronto tra due sistemi di sbarramento Studio idrodinamico

Documento tecnico

RET.45.260.03 20/01/2009	C. BERHAULT G. DAMBLANS	J.M. HEURTIER B. MOLIN	C. BERHAULT	Approvazione
RET.45.260.02 15/09/2008	C. BERHAULT G. DAMBLANS	J.M. HEURTIER B. MOLIN	C. BERHAULT	Nuovi calcoli
RET.45.260.01 30/06/2008	C. BERHAULT	P. GUERIN A. LEDOUX	C. BERHAULT	Commenti
Numero del documento	Redatto da	Verificato da	Approvato da	Nomina

COMUNE DI VENEZIA
CA' FARSETTI
SAN MARCO 4136
30124 VENEZIA

Cliente :

Numero del contratto :

PRINCIPIA R.D.
Z.A.C. Athélia 1 - 215 Voie Ariane
13705 LA CIOTAT cedex
+33 (0)4.42.98.11.80 - +33 (0)4.42.98.11.89
www.principia.fr / commercial@principia.fr

Parte contraente :



Sistema di paratoie di Venezia

Progetto :

Numero del progetto PRINCIPIA : D8.43.8015

Diffusione interna	Diffusione esterna					
	Nome	Qtà	Azienda	Nome	Qtà	Azienda
Manager Tecnico Autori del dossier	GABINETTO DEL SINDACO	1	Comune di Venezia			

Numero pag + Annessi: 46 Riservatezza del documento:

Questo documento è di proprietà di PRINCIPIA non può essere riprodotto o copiato in nessuna delle sue parti o comunicato a terzi senza pervio consenso scritto di PRINCIPIADOR

DOCUMENTO DI REVISIONE

N° documento	Data	Lista di aggiornamenti/ sezioni modificate
RET.45.260.01	30/06/2008	commenti
RET.45.260.02	15/09/2008	calcoli non lineari
RET.45.260.03	20/01/2009	Condizioni iniziali- approvazione

SOMMARIO

La protezione della laguna veneta dall'elevato incremento del livello del mare è un obiettivo primario per il Comune di Venezia. È stato scelto il progetto di un sistema di paratoie ed è iniziata la costruzione da due anni. Il sistema di paratoie è costituito da una barriera di paratoie elementari che può essere chiusa per mantenere il livello massimo accettabile all'interno della laguna.

Un punto chiave del progetto è il comportamento idrodinamico sia della paratoia singola che della schiera di paratoie, attraverso la quale potrebbe essere possibile un passaggio di acqua anche in caso di condizioni di mare meno severe di quelle massime di progetto.

L'obiettivo di questo studio è di confrontare il comportamento dinamico dei due sistemi di barriere basate sul progetto di due paratoie elementari differenti.

Le differenze principali tra le due barriere di paratoie sono il principio di funzionamento di base della paratoia e il suo orientamento rispetto alla verticale:

- La paratoia MoSE contrasta la differenza dei livelli con la spinta della paratoia. La paratoia è inclinata verso la laguna.
- La Paratoia a Gravità contrasta la differenza dei livelli col peso della paratoia. La paratoia è inclinata verso il mare aperto.

Per lo studio si fa riferimento alla bocca di Malamocco. Ogni barriera è composta da 20 paratoie incernierate a fondo mare. Il confronto riguarderà il comportamento prima di una paratoia singola (analisi 2D e 3D) e successivamente della barriera completa (analisi 3D).

Il documento descrive:

- La metodologia, le assunzioni e gli strumenti usati per il confronto.
- Confronto degli strumenti usati con la bibliografia esistente.
- I dati di input: condizioni ambientali da considerare, caratteristiche delle paratoie
- Le analisi fatte e i principali risultati
- Commento dei risultati: moti delle paratoie e carichi trasferiti alle fondazioni

Conclusioni principali:

Metodologia

La Metodologia, le assunzioni numeriche e gli strumenti usati per le analisi, rappresentano lo stato dell'arte più avanzato nella modellazione idrodinamica non lineare e nella interazione tra più corpi in moto ondoso. È stato dato un incarico specifico su questo argomento al professore B. Molin della Università di Marsiglia. Per la risposta della schiera di paratoie, i risultati raggiunti, con analisi lineare, dal prof. Molin (Rif. 4) sono in accordo con i risultati pubblicati dal prof. C.C. Mei (Rif. 5, 6).

Per una comprensione completa del comportamento dinamico, sono stati eseguiti i calcoli sia con un'analisi lineare e successivamente con calcoli non lineari che rappresentano l'effettivo modello meccanico delle paratoie e della schiera.

Paratoia isolata

- Il confronto tra i calcoli lineari e non lineari dimostra che l'effetto idrostatico non lineare ha una notevole influenza per entrambe le paratoie: MoSE e Gravità. Le conclusioni sono state tratte dai calcoli non lineari effettuati per due spettri di mare aventi altezza significativa $H_s = 3.2$ m, e $T_p = 9,3s$ e $8s$.
- Considerando le condizioni di onda dei 1000 anni, $H_s = 3,2m$, $T_p = 9,3s$, la Paratoia a Gravità porta ad angoli di oscillazione più grandi dal 10% al 20% rispetto alla paratoia MoSE. La forza verticale si riduce per la Paratoia a Gravità e le componenti orizzontali sono simili per i due progetti. La forza media di "drift" induce una variazione della inclinazione media minore di 4° : verso il basso per il MoSE e verso l'alto per la Gravità.
- Per la paratoia MoSE, per il periodo di picco più basso, si è osservato un comportamento instabile in funzione dell'altezza significativa H_s . Un'analisi specifica è stata fatta per il periodo di picco $T_p = 8s$ riducendo H_s . Il limite di stabilità è stato trovato per $H_s = 2,0$ m per valori più alti la paratoia oscilla tra due posizioni di equilibrio instabile con ampiezze che non sono compatibili con la geometria della bocca di porto e che non sono trattabili con le tecniche di modellazione e di analisi possibili allo stato dell'arte.

La presenza del comportamento instabile è molto sensibile alla distribuzione delle masse (e della zavorra).

		Fx (N)		Fz (N)		Total	Pitch (°)	
		Min	Max	Min	Max	Max	Min	Max
$T_p=8.0$	Mose NL	UNSTABLE BEHAVIOUR — NON REALISTIC RESULTS						
$T_p=8.0$	Gravity NL	-7.82E+05	7.40E+05	-4.78E+05	4.74E+05	9.17E+05	-8.0	8.5

Per ottenere risultati presentabili con $H_s = 3.2$ m nel caso MoSE, è stato introdotto, per puro esercizio accademico, un ulteriore smorzamento quadratico pari al 15% dello smorzamento critico (aggiunto allo smorzamento dovuto all'onda di radiazione) che sembra molto più grande di quanto un flusso reale viscoso possa dare in realtà.

I valori ottenuti sono in tabella:

		Fx (N)		Fz (N)		Total	Pitch (°)	
		Min	Max	Min	Max	Max	Min	Max
$T_p=8.0$	Mose NL	-1.86E+06	1.53E+06	-9.47E+05	7.71E+05	2.09E+06	-17.9	18.9

I valori ottenuti non possono essere confrontati con quelli della paratoia a Gravità (Gravity NL).

Infatti, per sistemi come la paratoia MoSE, dove lo smorzamento dovuto alle forze viscoso è determinante, è molto difficile definire un modello matematico capace di rappresentare realisticamente il comportamento instabile della paratoia. In questi casi c'è anche la difficoltà di utilizzare la sperimentazione in vasca su modelli in scala, che segue la similitudine di Froude e non quella di Reynolds per le forze viscoso, e pertanto il comportamento forzatamente smorzato non consente al modello un corretto comportamento dinamico e di conseguenza non è possibile il trasferimento diretto dei dati misurati nelle prove al prototipo reale.

Schiere di Paratoie

- Il confronto del comportamento delle barriere MoSE e Gravità è stato fatto tenendo conto delle interazioni idrodinamiche fra le paratoie. Per comprendere meglio il comportamento della schiera ed evitare enormi complicazioni del calcolo, anche dovute alla suddetta già riscontrata instabilità dinamica della paratoia MoSE, è stata assunta una costante elastica lineare.
- L'analisi della schiera è stata effettuata tenendo conto della interazione idrodinamica tra le 20 paratoie e una differenza di 2 metri tra i livelli lato mare e laguna. Il moto ondoso non simmetrico è stato ottenuto modellando le pareti di contenimento della schiera e una piccola incidenza dell'onda.
- L'interazione idrodinamica ha una notevole influenza sul comportamento globale della schiera. Pertanto il tentativo di definire i periodi naturali sembra proprio non realistico in quanto i coefficienti idrodinamici sono molto sensibili ai moti relativi indotti dalle onde.
- Per i periodi d'onda corrispondenti alle condizioni dei 1000 anni ($H_s=3.2\text{m}$, $T_p=9.3\text{s}$), si ottengono angoli di rotazione assoluti limitati, simili a quelli ottenuti per la paratoia isolata ma più alti per le paratoie MoSE (v. punto 6.3.1) e con differenza di fase tra paratoie adiacenti. Gli angoli relativi di rotazione raggiungono 10° per la paratoia a Gravità e 25° per la paratoia MoSE. Per periodi più grandi si ottiene un comportamento ondulatorio della barriera con angoli di rotazione maggiori.
- I carichi sulle cerniere hanno valori simili come per le paratoie isolate.
- L'analisi lineare della schiera di paratoie ha dimostrato che la loro interazione ha una notevole influenza sui moti relativi tra paratie adiacenti e non introduce risposte sub-armoniche nel comportamento della paratoia singola e nella schiera.
- Come conclusione dello studio è stata effettuata l'analisi non lineare di due paratoie della barriera per la condizione di partenza della chiusura della bocca di porto con lo spettro $H_s = 3.2\text{ m}$, $T_p = 8\text{ sec}$. È stata considerata la configurazione semplice di due paratoie adiacenti vicino alla parete della bocca di porto. L'analisi non lineare del comportamento delle due paratoie ha dimostrato che la presenza della parete influisce sul comportamento dinamico delle paratoie adiacenti alla bocca di porto per entrambe le paratoie MoSE e Gravità. In particolare il comportamento dinamico della prima paratoia MoSE è regolare ed è possibile modellarlo, ma la paratoia adiacente mostra, di nuovo, un comportamento irregolare con risultati inattendibili.
- Le stesse analisi condotte per la paratoia a Gravità mostrano un comportamento dinamico regolare delle due paratoie con risultati affidabili.
- Sulla base dei risultati ottenuti si è ritenuto inutile continuare l'analisi con la intera barriera MoSE, essendo impossibile rappresentarla con i modelli matematici disponibili allo stato dell'arte attuale, e di non continuare l'analisi della barriera a Gravità non essendo possibile fare un confronto tra le due soluzioni.
- I risultati ottenuti dimostrano che per il progetto del sistema di chiusura delle bocche di porto è necessario fare un'analisi non lineare dell'intera schiera ed in particolare, considerando i risultati dei calcoli effettuati per la soluzione a Gravità con le paratoie isolate e la coppia di paratoie adiacenti alla parete della bocca di porto si può concludere che è necessario condurre

l'analisi 3D dell'intera barriera, e che approssimazioni con modelli 2D o con numero di paratoie ridotte non rappresentano il comportamento reale della barriera.

Commento Generale

- Il confronto delle due paratoie isolate, usando la costante elastica idrostatica lineare, porta a comportamenti simili, con moti più grandi per la paratoia a Gravità ma con carichi verticali maggiori per la paratoia MoSE per le condizioni di progetto estreme. Con la effettiva costante elastica idrostatica non lineare il comportamento delle due paratoie è significativamente differente: la paratoia MoSE mostra un comportamento instabile non solo con lo spettro massimo di progetto: $H_s = 3.2\text{m}$ and $T_p = 8\text{sec}$ ma anche con stati di mare meno severi.
- L'analisi lineare della schiera evidenzia i moti fuori fase e mostra, per gli stati di mare dei 1000 anni angoli relativi tra paratoie adiacenti entro i 10° per la Gravità ed entro i 25° per il MOSE. Angoli relativi maggiori si ottengono per periodi d'onda maggiori di 13 sec (non nel campo dei periodi delle onde incidenti).
- Il comportamento instabile, indotto dalla costante elastica idrostatica non lineare, si ha per la paratoia MoSE per spettri a banda stretta ovvero con periodi di picco $T_p = 8\text{s}$ corrispondente ad un valore $T_z = 7.5\text{s}$ e $H_s > 2.0\text{ m}$. Un'analisi preliminare di sensitività mostra che la instabilità è molto sensibile alla massa e l'inerzia della paratoia, alla distribuzione della energia delle onde e allo smorzamento viscoso del flusso del fluido. Ciò è di particolare interesse perché durante la campagna di prove di circa 4 anni alla bocca di Malamocco, nel sito di installazione della schiera, risulta che si è verificata almeno una tempesta con $H_s = 2.5\text{m}$ e $T_s = 7,5\text{s}$ corrispondente ad un periodo di picco $T_p = 8\text{s}$.
- Dato il limitato scopo di lavoro di questa analisi, usando lo stato dell'arte nella modellazione dinamica, questi sono i risultati raggiungibili. Un'analisi più approfondita sul meccanismo di smorzamento che si verifica tra un gruppo di paratoie, potrebbe essere richiesto per definire meglio i limiti e il campo di insorgenza dell'instabilità.
- In ogni caso, per molte condizioni di lavoro della paratoia MoSE, come dai disegni del progetto definitivo, rimane la risposta caotica con elevata amplificazione dinamica delle oscillazioni, con ampiezze che appaiono incompatibili con la geometria della bocca di porto e che non sono trattabili con le tecniche di modellazione e di analisi possibili allo stato dell'arte.
- L'impiego di strutture dinamicamente instabili al moto ondoso non ha precedenti nell'ingegneria marina ed offshore e pertanto lo stato dell'arte non consente di identificare un comportamento dinamico attendibile e di conseguenza un dimensionamento affidabile del sistema di connessione della paratoia MoSE alla base di fondazione per le condizioni di progetto previste. In aggiunta bisogna considerare che in presenza di tali amplificazioni delle oscillazioni verrebbe a mancare comunque l'efficienza della schiera di paratoie come barriera al dislivello di marea.
- La Paratoia a Gravità non mostra comportamenti instabili indotti dalla costante elastica idrostatica non lineare per gli stati di mare di progetto.
- La vicinanza della paratoia MoSE alla parete della bocca di porto introduce variazioni significative alle matrici di massa e di radiazione tenendo la paratoia fuori dalla instabilità, ma non è sufficiente ad influenzare il comportamento dinamico della seconda paratoia come dimostrato per il caso 3. Ciò conferma che una risposta caotica, quando esiste come per la paratoia MoSE, essa viene introdotta dalla paratoia nella barriera e non viceversa: se la paratoia è stabile la barriera non introduce instabilità o sub-armoniche come dimostrato con l'analisi lineare delle barriere complete.
- Il comportamento dinamico delle due paratoia a Gravità vicino la parete della bocca di porto si conferma essere regolare.
- Sulla base dei risultati ottenuti per la paratoia MoSE, ovvero la impossibilità di simularne il comportamento dinamico, e considerando che lo scopo di questo studio non è fare il progetto

del sistema di paratoie, ma soltanto fare l'analisi dinamica e confrontare il comportamento dinamico dei due concetti di paratoie, è stato deciso di non effettuare l'analisi dinamica non lineare dell'intera barriera anche per la paratoia a Gravità, non essendo possibile confrontare un sistema stabile con uno instabile:

φ₁ Il sistema stabile può essere analizzato con tecniche standard considerando il comportamento dinamico non lineare di più corpi che interagiscono con le onde ed è possibile ottenere risultati realistici ed affidabili per un progetto corretto.

φ₂ Il sistema instabile non può essere analizzato anche utilizzando i software di simulazione non lineari più avanzati esistenti sul mercato e non è possibile ottenere risultati affidabili per un progetto corretto.

- In aggiunta al confronto del comportamento dinamico in moto ondoso tra le due paratoie, si evidenzia un'altra differenza del loro comportamento dinamico alla variazione della marea: la paratoia MoSE richiede un sistema di controllo attivo dell'acqua di zavorra per mantenere la condizione di lavoro di progetto, mentre la paratoia a Gravità non ne ha bisogno.

INDICE

1	CONTESTO E OBIETTIVI	12
2	RIFERIMENTI... ..	12
3	CONDIZIONI AMBIENTALI	13
4	DESCRIZIONE DEL SISTEMA DI PARATOIE	14
4.1	CONFIGURAZIONE GLOBALE.	14
4.2	DESCRIZIONE DELLA PARATOIA.	14
4.2.1	Principio e disposizione generale.....	14
4.2.2	Caratteristiche delle paratoie.....	17
5	METODOLOGIA E PREMESSE PER LE ANALISI.....	19
5.1	COMPORAMENTO DELLE PARATOIE ED EFFICIENZA SOTTO MOTO ONDOSO	19
5.2	MODELLAZIONE NUMERICA	19
6	RISPOSTA DEL SISTEMA DI PARATOIE	21
6.1	ANALISI PRELIMINARE IDRODINAMICA... ..	21
6.2	ANALISI DINAMICA DI UNA PARATOIA ISOLATA.. ..	21
6.2.1	Assunzione idrostatica lineare.....	22
6.2.2	Effetto della rigidità idrostatica non lineare	24
	Influenza dello smorzamento viscoso sull'instabilità della paratoia MoSE	28
6.3	ANALISI DINAMICA DELLA BARRIERA	30
6.3.1	Condizioni di lavoro (risposta lineare)	30
6.3.2	Condizioni iniziali (risposta lineare).....	35
6.3.3	Condizioni iniziali (risposta non lineare)	37
7	CONCLUSIONI.. ..	43
8	APPENDICE 1: CARICHI D'ONDA DAL METODO DI CALCOLO.....	46
8.1	TRAMA 3D DI UNA PARATOIA ISOLATA.....	46
8.2	FUNZIONI DI TRASFERIMENTO 3D DI CARICHI DI ONDA.....	46

1 CONTESTO E OBIETTIVI

La protezione e la difesa della laguna di Venezia dalle acque alte rappresenta uno dei principali obiettivi del Comune di Venezia. E' stato scelto il progetto di un sistema di paratoie mobili e la sua costruzione è iniziata da due anni. Il sistema di paratoie è costituito da una barriera di singole paratoie che può all'occorrenza essere chiusa per mantenere il livello di acqua massimo consentibile nel bacino lagunare.

Un punto chiave è il comportamento idrodinamico della schiera di paratoie in relazione al comportamento della singola paratoia di progetto durante il passaggio di acqua anche in condizioni di massimo livello idrico in mare. L'obiettivo di tale studio è di confrontare il comportamento idrodinamico di due sistemi di sbarramento basati sul progetto di due paratoie singole diverse.

Le differenze principali tra i due sistemi di paratoie sono il principio di funzionamento della paratoia e la sua inclinazione rispetto alla verticale:

- La paratoia MoSE contrasta il dislivello di marea con la spinta di galleggiamento. La paratoia è inclinata verso la laguna.
- La paratoia a Gravità contrasta il dislivello di marea con il peso proprio della paratoia. La paratoia è inclinata verso il mare aperto.

Lo studio fa riferimento alla bocca di Malamocco. Ogni barriera è composta da 20 paratoie incernierate a fondo mare. Il confronto riguarderà prima il comportamento di una singola paratoia (analisi 2D e 3D) e poi quello di una barriera completa (analisi 3D).

Il comportamento è definito come :

- Moto di una singola paratoia: comportamento stabile, ampiezza di movimento
- Carico indotto sul punto di articolazione della paratoia e sulla struttura di fondazione
- Capacità di evitare la propagazione dell'acqua attraverso la barriera in relazione al comportamento ondulatorio globale della barriera
- Altezza delle onde irradiate nella laguna quando la barriera agisce da generatore di onde

Il presente progetto descrive :

- Metodologie, premesse e strumenti numerici usati per il confronto
- Dati di input: condizioni ambientali da prendere in considerazione, caratteristiche delle paratoie
- Analisi realizzate e principali risultati ottenuti
- Commenti sui principali risultati ottenuti: movimento delle paratoie e carico trasferito alla struttura di fondazione

2 RIFERIMENTI

Ref.1 "Rapporto Meteomarino" – Data 25/09/2002

Ref.2 "Studio di specifiche"

Ref.3 Progetti di disegno del Mo.S.E. (Progetto definitivo) Ref.4 Modello Autocad della paratoia "Paratoia a Gravità"

Ref.5 "Analisi idrodinamica del sistema di paratoia di Venezia - Parte I e II", B. Molin

Ref.6 "Soluzione numerica per i vincoli attorno alla paratoia inclinata di Venezia", C.Y. Liao, C.C. Mei, JWPCOE , ottobre 2000

Ref.7 "Modalità naturali di sbarramenti mobili delle acque", CG.L. Chiang, C.C.MeI, AOR, agosto 2003

3 CONDIZIONI AMBIENTALI

La barriera è chiusa in caso di gravi condizioni ambientali per prevenire la formazione di acqua alta nella laguna di Venezia a causa dell'innalzamento del livello del mare. L'obiettivo è quello di mantenere nella laguna in qualsiasi condizione un livello dell'acqua massimo di 15 m.

Le situazioni di lavoro più critiche della barriera sono determinate dal livello massimo di marea e dalle condizioni del moto ondoso:

- tirante di acqua sul lato del mare aperto: 15 m alla chiusura della barriera e 17 m con il progetto di massima marea (marea di progetto: 2 m)
- considerando il moto ondoso per un periodo di tempo di 1000 anni (ricavato dal rapporto meteomario):
 - φ_t periodo "zero-up-crossing": $T_z=7.5$ s (corrispondente a $T_z=7.5$ s)
 - φ_t Altezza di onda significativa: $H_s=3.2$ m
 - φ_t Il modello spettrale JONSWAP con il valore γ applicato al rapporto t_p/t_z
 - φ_t Direzione di onda: è stata considerata perpendicolare rispetto alla paratoia.

Commento:

- I dati meteomarini non danno indicazione del periodo di picco (T_p) in relazione a T_z , è stato quindi selezionato un intervallo che va da 8.0s a 9.3 s del periodo di picco per coprire le condizioni di mare attese, conformando ad ogni T_p il parametro γ per relazionarlo a T_z .
- Verranno prese in considerazione in una prima fase delle analisi onde monodirezionali, visto che la barriera è localizzata in un canale delimitato da due pareti parallele.

Le pareti a sinistra e a destra del canale non sono identiche e ciò causa un moto ondoso asimmetrico.

- Un punto critico da valutare è la capacità di ogni progetto di evitare la propagazione dell'acqua attraverso la barriera poiché la paratoia può muoversi con angoli diversi di ritardo. In seguito viene considerata la direzione e/o l'estensione di una piccola onda per le analisi della configurazione della schiera di paratoie, in modo da riprodurre l'effetto del moto ondoso asimmetrico.
- Può verificarsi anche un moto di onde costanti:
 - φ_t tra le due pareti di contenimento: a causa della larghezza del canale e della profondità dell'acqua, i movimenti laterali eccitati dalla marea entrante verrebbero rapidamente smorzati
 - φ_t davanti alla barriera: una combinazione di onde che entrano, onde riflesse e onde irradiate indotte dai movimenti della paratoia.

4 DESCRIZIONE DEL SISTEMA DI PARATOIE

4.1 CONFIGURAZIONE GLOBALE

Viene presa in considerazione la “Bocca di Malamocco”. Le 20 paratoie, ognuna di 20 m di larghezza, sono distribuite tra due pareti di un canale con apertura al mare a monte (controcorrente). La larghezza del canale è di 400m.

Le paratoie non sono unite tra loro, il che significa che ogni paratoia è libera di ruotare anche se la sua risposta idrodinamica è condizionata dal movimento globale della barriera e dal movimento delle altre paratoie.



Fig1 Esempio di metà della configurazione della barriera utilizzando il progetto della paratoia a Gravità

4.2 DESCRIZIONE DELLA PARATOIA

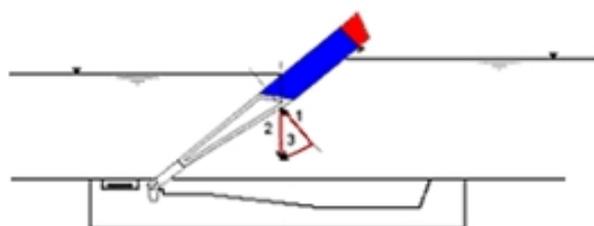
4.2.1 Principio e disposizione generale

.

Gli schemi generali della paratoia sono descritti nella Figura 3.

← Wave propagation from open sea to the barrier

GRAVITY GATE



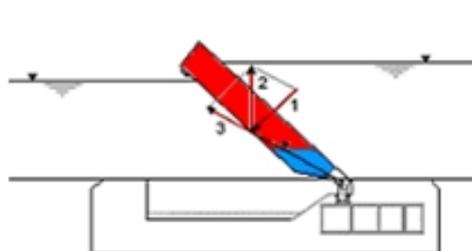
LEGENDA:

- 1- Tide Hydrostatic Pressure Force
- 2- Gate Net Weight
- 3- Force on the Hinges

 WATER BALLAST (FIX)

 AIR COMPRESSED

Mo.S.E. GATE



LEGENDA:

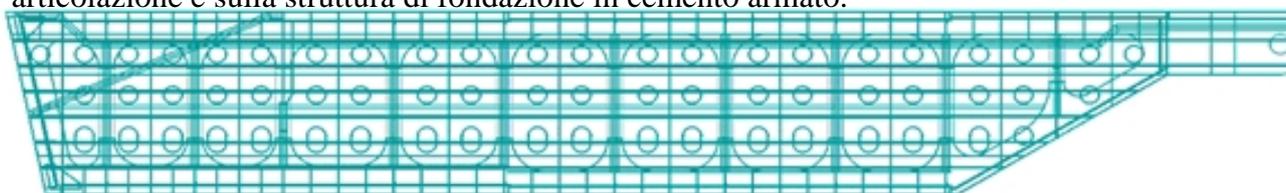
- 1- Tide Hydrostatic Pressure Force
- 2- Gate Net Buoyancy
- 3- Force on the Hinges

 WATER BALLAST (VARIABLE)

 AIR COMPRESSED

Paratoia MoSE (o paratoia a spinta di galleggiamento)

La paratoia è composta da strutture scatolari in acciaio parzialmente riempite di acqua e aria compressa. L'angolo di inclinazione durante l'azionamento della paratoia (45° verso la laguna) è dato dal momento di spinta di galleggiamento corrispondente alla differenza di livello di acqua tra il livello del mare e il livello dell'acqua di zavorra all'interno della paratoia. Il livello interno dell'acqua è conformato in funzione al dislivello di marea, in modo da procurare un'adeguata spinta di galleggiamento in grado di assicurare l'inclinazione costante richiesta. E' richiesto un sistema di controllo attivo per mantenere l'inclinazione specificata, adeguando il livello dell'acqua nelle casse interne (zavorra). La paratoia si basa su strutture di fondazione in cemento armato sul fondo del mare modellate per integrare la paratoia nella sua posizione rimovibile. Le operazioni di chiusura e apertura delle paratoie avvengono tramite pompaggio e svuotamento di casse zavorra con immissione di aria compressa. In assenza delle caratteristiche di massa della paratoia, è stato fatto un modello autocad, di cui una sezione è riportata nella parte sottostante. In condizioni di lavoro la spinta di galleggiamento induce una trazione verso l'alto sul punto di articolazione e sulla struttura di fondazione in cemento armato.



Paratoia a Gravità

La paratoia è composta da una struttura in acciaio rinforzata appoggiata sul fondale, da una camera permanentemente zavorrata con acqua e da una seconda camera posta all'estremità superiore della paratoia che ha la funzione di camera di manovra.

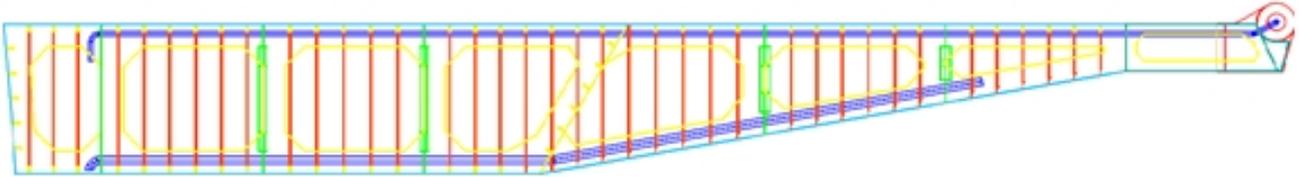
L'inclinazione durante l'azionamento della paratoia (alla partenza 32° verso il mare aperto) è data dal peso (acqua di zavorra + peso strutturale).

La camera di manovra è inizialmente svuotata (spiazzamento della zavorra di acqua con aria compressa) per fornire l'inclinazione e la stabilità richiesta indipendentemente dalla marea. L'inclinazione massima, ottenuta con la massima marea è di circa 46° .

La paratoia emerge svuotando solo la camera di manovra. Non è richiesto nessun sistema di controllo attivo per mantenere il livello di acqua descritto nella camera interna.

Una sezione del modello autocad è mostrata nella parte sottostante.

In posizione di lavoro l'acqua di zavorra induce una trazione verso il basso sul punto di articolazione della paratoia e sulla base in acciaio.



4.2.2 Caratteristiche delle paratoie

La tabella seguente fornisce le principali caratteristiche di ogni progetto di paratoia. I valori si riferiscono ad una struttura bilanciata al punto di articolazione e vengono forniti per le principali posizioni di lavoro delle paratoie per 15m di tirante di acqua verso il lato della laguna e 17m verso il lato del mare.

Principali dimensioni:

Paratoia	Gravità	MoSE
Lunghezza totale	31.5 m	29.6 m
Larghezza totale	20 m	19.9 m
Lunghezza cassa	3.8 m	4.5 m
Larghezza cassa	16.1 m	26 m
Totale massa strutturale	236.15 tonnellate	257.88 tonnellate
Totale massa in condizioni di lavoro iniz.	1469.80 tonnellate	1767.00 tonnellate
Totale massa in max. condizioni di lavoro	1469.80 tonnellate	1079.40 tonnellate
Inclinazione di lavoro/ orizzontale	÷ 46° verso il mare	45° verso la laguna

Le curve di stabilità per i due progetti sono fornite in appendice. Si può concludere che il momento idrostatico di ripristino è altamente non lineare e asimmetrico attorno all'inclinazione di lavoro, per esempio le rotazioni verso il basso e verso l'alto sono anticipate in modo diverso.

Basandosi su tali dati di rigidità di rotazione, vengono effettuati tentativi di derivare periodi di risonanza con test di oscillazioni libere (curva di attività) per una paratoia isolata, e da RAOs per le schiere di paratoie.

Si ottengono risultati abbastanza diversi in funzione della configurazione considerata: paratoia isolata modello 2D (o tutte le paratoie della barriera che si muovono in fase), paratoia isolata 3D, schiera di paratoie 2D (comprese interazioni idrodinamiche delle paratoie). La ragione è l'alta sensibilità dei coefficienti idrodinamici (carico idrodinamico) alla configurazione. Si può notare che l'alta variazione di inerzia aggiunta con il periodo oscillazione può condurre a un diverso periodo di risonanza, anche se viene considerata la rigidità idrostatica lineare. La tabella seguente fornisce il campo di variazione di valori ottenuti:

Configurazione	2D isolata	3D isolata	2D schiera di par.
Paratoia a Gravità	11s to 12s	> 18s	4s << 15s
Paratoia MoSE	5s to 6s	> 14s	4s << 15s

Valori più bassi vengono ottenuti per una semplice paratoia 2D e valori più elevati per una paratoia isolata (analisi 3D) per la quale l'onda di radiazione è predominante. La realtà della schiera di paratoie faceva dipendere le due condizioni "estreme" ai movimenti di paratoie adiacenti, e la risposta deriva principalmente dal numero di paratoie che, in questa analisi, sono uguali.

L'intervallo dei periodi di risonanza deve essere confrontato con i picchi nei 1000 anni dell'andamento del moto ondoso, ad esempio $T_p=9.3s - 8s$ per $T_z=7.5s$. Ad ogni modo i periodi naturali della paratoia isolata di Gravità sono più alti e fuori dall'intervallo dei periodi degli spettri di progetto con energia significativa. Poiché lo smorzamento dovuto all'onda di radiazione è generalmente alto per un periodo piccolo, si può allora anticipare che il verificarsi di fenomeni di risonanza "pura" sarà ridotto.

Quando molte paratoie sono in movimento, il movimento di ogni paratoia induce eccitazione sulle altre portando ad una serie di campi di moto vicini. Una soluzione semi analitica, derivata da una serie articolata di lastre piane inclinate, fornisce risposta per i periodi dai 4s ai 15s (vedi risultati dati da Li & Mei confermati da Molin nella presente indagine). Tuttavia verrà mostrato successivamente che le ampiezze di movimento sono minori di 10° per i periodi di irradiazione inferiori ai 12s.

La risonanza “pura” viene definita come risonanza ottenuta da una meccanica lineare standard, ad esempio il bilanciamento tra inerzia e rigidità lineare idrostatica. Un componente non lineare potrebbe portare a risonanza “indiretta” come la famosa “Mathieu instability”.

5 METODOLOGIA E PREMESSE PER LE ANALISI

5.1 COMPORTAMENTO DELLE PARATOIE ED EFFICIENZA SOTTO MOTO ONDOSO

L'azione delle onde induce una rotazione dinamica delle paratoie attorno al loro giunto rotante (cerniera). Diversi tipi di comportamento devono essere presi in considerazione:

- Rotazione dinamica alla frequenza delle onde che induce alla formazione di onde di radiazione nella laguna (generatore di onde). Questo effetto può essere previsto utilizzando la diffrazione lineare classica/un'analisi dell'irradiazione (eccitazione delle onde e coefficiente idrodinamico) inclusi trazione idrostatica e inerzia della paratoia. Le condizioni delle pareti non sono uguali per tutte le paratoie ma dipendono dalla loro ubicazione dalle pareti del canale. Successivamente ogni paratoia si muove con la sua fase che porta ad un comportamento ondulatorio o ad un comportamento instabile della barriera. Le paratoie non sono unite tra loro e questo potrebbe indurre il flusso di marea a passare attraverso la barriera (attraverso gli spazi delle paratoie) in funzione della differenza di ampiezza e fase di paratoie adiacenti.
- L'interazione tra onde entranti e onde irradiate può indurre a moti vincolati (campi di onde stazionari) che possono portare a eccitazioni armoniche alla frequenza simile al periodo naturale delle paratoie. Una risposta corrispondente è valutata usando un vicino campo di diffrazione.
 - In caso di larga ampiezza di rotazione il momento idrostatico di ripristino diventa non lineare e può condurre ad una risposta instabile. (come la risonanza parametrica)
 - Onde stazionarie trasversali possono verificarsi anche tra le pareti del canale e ciò può indurre a eccitazioni fuori fase supplementari sulle paratoie. Tuttavia il canale ha una larghezza di 400m e i primi moti corrispondenti hanno lunghezza di onda più elevate rispetto alle onde entranti. L'effetto potrebbe essere dunque trascurato.

Il presente studio si concentra sull'influenza di questi fenomeni fisici sul comportamento delle barriere sia della paratoia singola MoSe che della paratoia a Gravità.

I confronti vengono forniti per i seguenti parametri di progetto:

- Massima ampiezza assoluta di rotazione della paratoia lungo la barriera
- Ampiezze relative di rotazione tra due paratoie adiacenti
- Forze indotte e momento sulla cerniera

L'analisi è condotta per le due condizioni di lavoro estreme: a chiusura della barriera (tirante di acqua 15m) e a marea massima prevista (tirante di acqua 15 m lato della laguna, 17 m lato mare aperto).

5.2 MODELLAZIONE NUMERICA

L'approccio globale si basa su strumenti idrodinamici esistenti:

- Completa radiazione 3D / metodo della diffrazione :
 - I primi carichi di eccitazione di onda e massa aggiunta vengono elaborati con il codice Diodore di diffrazione lineare 3D (teoria del flusso potenziale risolta da un metodo di calcolo standard nel dominio della frequenza) I principali carichi di onde e i componenti di frequenza di onda sono derivati per un intervallo di periodi di onda.
 - Il fondo del canale di acqua viene dapprima considerato piatto nell'analisi di diffrazione. I tiranti di acqua controcorrente e secondo corrente sono ritenuti uguali per la previsione dei carichi di onda.
 - Coefficiente idrodinamico e carichi di onda vengono trasferiti ad un modello meccanico Deep Lines che opera in un dominio temporale e che considera l'esatta inerzia della paratoia e i carichi idrostatici tenendo in considerazione la differenza dei livelli di acqua controcorrente e secondo corrente.

- Le simulazioni nel dominio temporale vengono realizzate con onde irregolari per ottenere il movimento angolare attorno alla posizione di equilibrio statico. E' presunto un sistema di incernieramento sul fondo (nessuna frizione sulle cerniere).
 - Sia la rigidità idrostatica lineare che quella non lineare impongono nel modello di calcolo che considera la variabile tempo un momento di ripristino non lineare derivato da analisi statistiche. L'obiettivo dell'approccio lineare è quello di capire l'influenza dei diversi parametri sulla dinamica della barriera. L'obiettivo dell'approccio non lineare è quello di simulare un comportamento dinamico della barriera più realistico (movimenti e carichi) e di controllare l'eventuale insorgenza di risonanza parametrica.
 - Vengono analizzate diverse configurazioni in funzione della configurazione della paratoia e della sua ubicazione: una paratoia isolata, una paratoia isolata che si muove vicino alla parete del canale, una serie di paratoie che si muovono in fase tra le pareti del canale.
- modello 2D semi-analitico:
 - vengono inclusi i seguenti aspetti specifici della configurazione della paratoia: il livello dell'acqua può essere diverso ai due lati della barriera, la barriera è considerata come un ribaltamento mobile di più corpi con interazioni idrodinamiche tra le paratoie.
 - ogni paratoia è modellata come una sottile lastra inclinata, tale da procurare la corretta massa e spinta di galleggiamento.
 - movimenti angolari, carichi e fase corrispondente vengono elaborati per ogni paratoia della barriera nel dominio della frequenza (RAOs).

Il movimento della paratoia con un'ampiezza significativa induce alla formazione di un vortice ai suoi lati che a sua volta produce uno smorzamento viscoso nel movimento di rotazione. Tale smorzamento può essere valutato facilmente utilizzando i dati esistenti per i carichi frenanti su una lastra di una paratoia isolata. Nei modelli è inclusa la valutazione dello smorzamento viscoso, anche se lo smorzamento dovuto all'onda di radiazione è predominante.

Una serie di test di accertamento sono stati condotti prima di iniziare lo studio:

- confronto tra il metodo semi-analitico 2D con lo strumento numerico Diodore 3D per una paratoia di larghezza infinita.
- confronto del metodo semi-analitico 2D con i risultati forniti da Li & Mei per una serie di lastre piane verticali.

I confronti si sono focalizzati sui carichi idrodinamici: inerzia aggiunta, smorzamento e diffrazione di onda. I risultati sono forniti in appendice solo per accertamento dei software usati per l'analisi.

6 RISPOSTA DEL SISTEMA DI PARATOIE

6.1 ANALISI IDRODINAMICA PRELIMINARE

L'analisi segue due stadi principali:

- Analisi dinamica di una paratoia singola per due progetti
- Analisi dinamica delle configurazioni globali della barriera corrispondenti alle due paratoie di progetto.

E' stata tuttavia condotta un'analisi preliminare per configurazioni diverse, allo scopo di comprendere meglio le risposte dei sistemi di paratoia. (le illustrazioni sono fornite in appendice):

- Carichi idrostatici :
 - L'inclinazione principale della paratoia è altamente sensibile alle ubicazioni CoG e CoB. Un'accurata spinta di galleggiamento delle strutture scatolari è stata realizzata per ottenere la corretta inclinazione in condizioni di lavoro (due metri di differenza nei livelli dell'acqua). Per la paratoia MoSe è stato necessario un adeguamento della massa di zavorra.
 - La curva non lineare GM non è simmetrica (o anti-simmetrica) attorno all'inclinazione principale, il che significa che i movimenti verso l'alto e i movimenti verso il basso sono dati da comportamenti diversi.
- Inerzia aggiunta e smorzamento per radiazione :
 - vengono ottenuti diverse variazioni con il periodo di moti (e con il periodo di onda) perciò risulta difficile valutare un periodo naturale in modo classico.
 - Sia il coefficiente idrodinamico che lo smorzamento sono diversi per una paratoia 2D e una paratoia isolata 3D. Ciò significa che l'ampiezza di movimento di un'intera serie di paratoie "in fase" risulta diversa da una paratoia isolata o da una serie di paratoie "fuori fase".
 - Per una configurazione di schiere di paratoie, le interazioni idrodinamiche tra paratoie determinano il coefficiente idrodinamico e lo smorzamento.
- Le interazioni idrodinamiche portano a movimenti (delle paratoie) di diversa ampiezza e fase lungo la barriera, tra movimenti "in fase" o "fuori fase" in funzione al periodo di onda:
 - Per periodi d'onda brevi si ottengono comportamenti "instabili" ma con poca ampiezza angolare.
 - Per periodi di onda lunghi si ottengono comportamenti ondulatori con tanta ampiezza quanto il periodo di onda è vicino ai periodi naturali delle barriere.
 - La maggior parte della "risonanza" o meglio dei periodi di risposta si verifica nelle barriere nell'intervallo dai 12s ai 18s, ossia fuori dagli spettri di onda e ciò limita l'insorgenza di grandi ampiezze angolari. (l'instabilità non viene presa in considerazione in questo tipo di analisi)

6.2 ANALISI DINAMICA DI UNA PARATOIA ISOLATA

Vengono confrontati i risultati ottenuti per le paratoie isolate del sistema a Gravità e del sistema MoSE (modelli 3D). Le trame delle paratoie usate per l'analisi della diffrazione radiazione vengono fornite in appendice.

Le simulazioni nel dominio temporale sono state realizzate con il modello DeepLines per le condizioni di onda irregolari nei 1000 anni, considerando la direzione di onda perpendicolare alla barriera. In un primo stadio la rigidità idrostatica è stata considerata lineare (valida solo per rotazioni angolari minori di 5°). Quando sono state ottenute ampiezze di rotazione maggiori, sono stati fatti calcoli che comprendevano il momento idrostatico di ripristino.

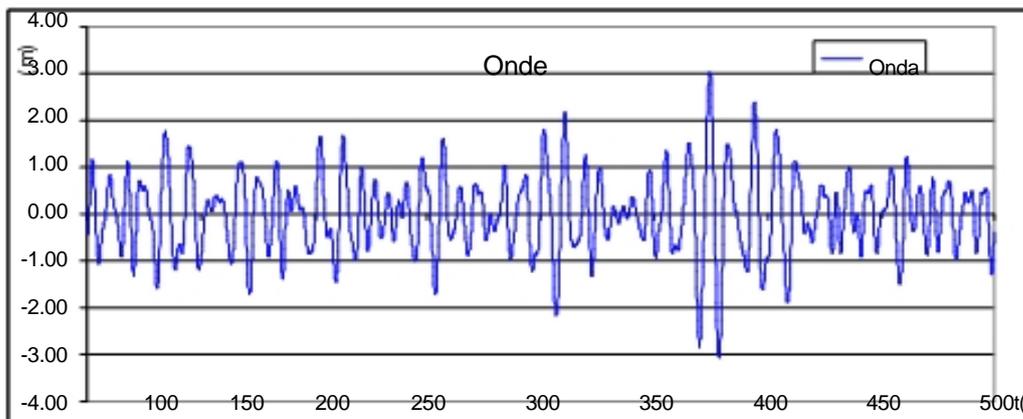
6.2.1 Assunzione idrostatica lineare

E' stato scelto un intervallo di tempo di 1200 sec. centrato sulla massima altezza di onda di 3hr per essere sicuri che i valori massimi di movimento angolare e forze si incontrino. E' stato imposto un rapporto H_{max}/H_s pari a 1.8

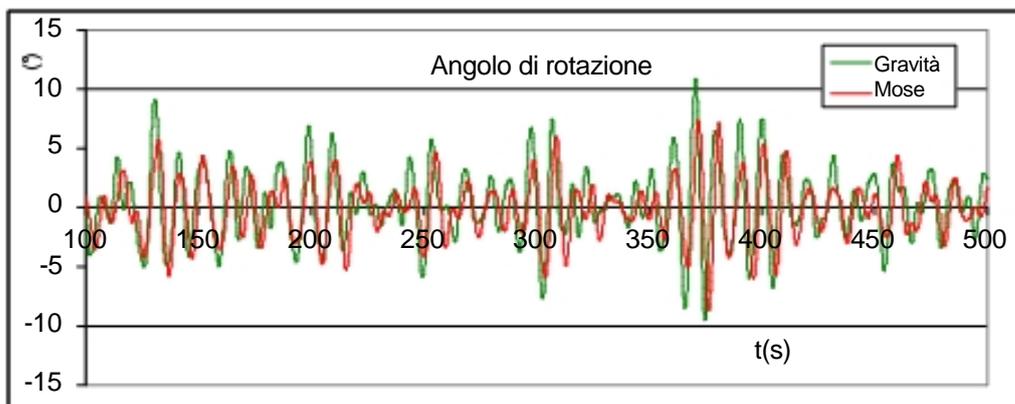
La tabella seguente riassume i risultati ottenuti per altezza significativa $H_s=3.2m$ e tempo di picco $T_p=9.3s$, considerando la rigidità idrostatica lineare. Vengono forniti solo i componenti dinamici e di forza di spinta corrispondenti all'eccitazione di onda.

MOSE						
Variabile	Unit	Min	Tz	Max	Mean	Std dev.
Forza globale Z	N	-4.29E+06	9.306	-7.40E+05	-2.36E+06	5.77E+05
Forza globale X	N	-1.42E+06	10.743	1.10E+06	-8.23E+04	3.96E+05
Forza globale	N	4.52E+06		1.33E+06		7.00E+05
Inclinazione	deg.	-8.617	10.827	7.819	-45.08	2.785
GRAVITÀ						
Forza globale Z	N	-2.54E+06	10.378	1.61E+05	-1.18E+06	4.43E+05
Forza globale X	N	-8.61E+05	8.772	9.06E+05	5.33E+04	2.89E+05
Forza globale	N	2.68E+06		9.21E+05		5.29E+05
Inclinazione	deg.	-9.524	10.397	10.825	46.32	3.337
Altezza d'onda	m	-3.07	9.50	3.02	-0.002	0.807

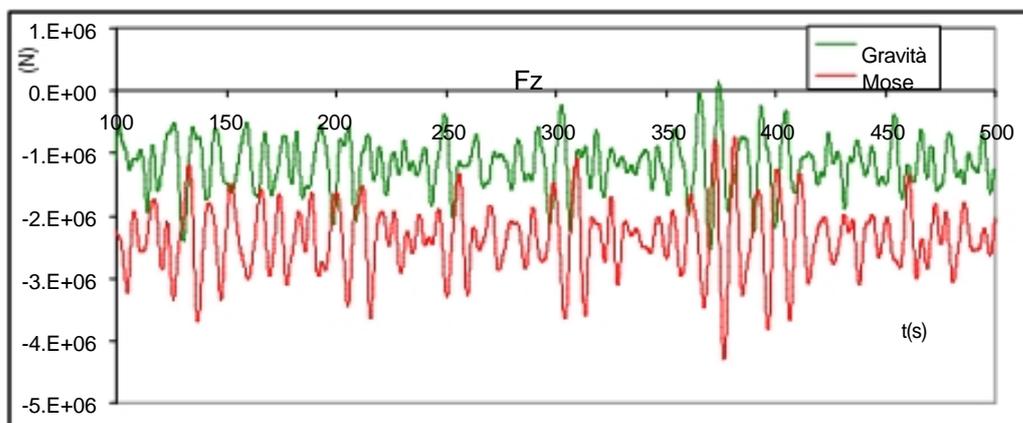
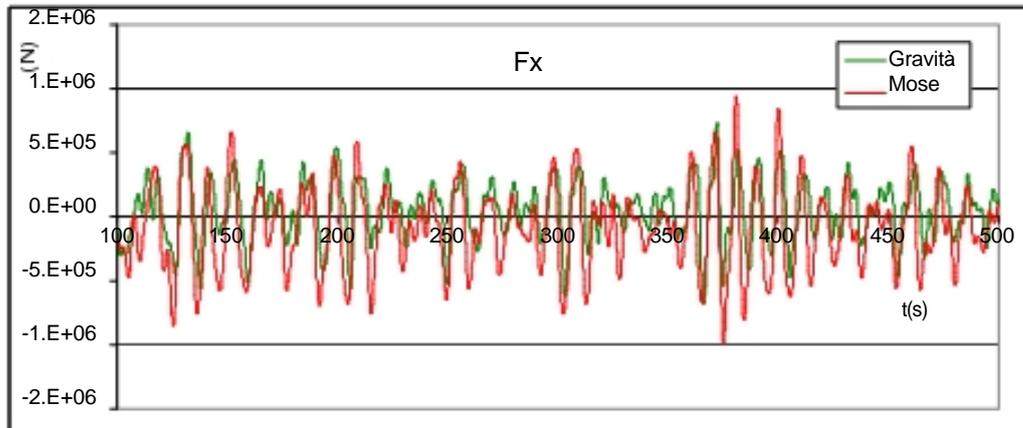
I risultati mostrano una migliore adattabilità della Paratoia di Gravità, per esempio una più grande ampiezza per l'inclinazione che corrisponde ad una drastica riduzione dei carichi al punto di incernieramento. Di seguito, il componente dinamico (compreso tra 100 sec fino a 500 sec inclusa H_{max}) è confrontato con spettri di risposta considerando un momento idrostatico di ripristino lineare.



L'angolo di rotazione è dato per ogni paratoia attorno all'inclinazione statica principale.

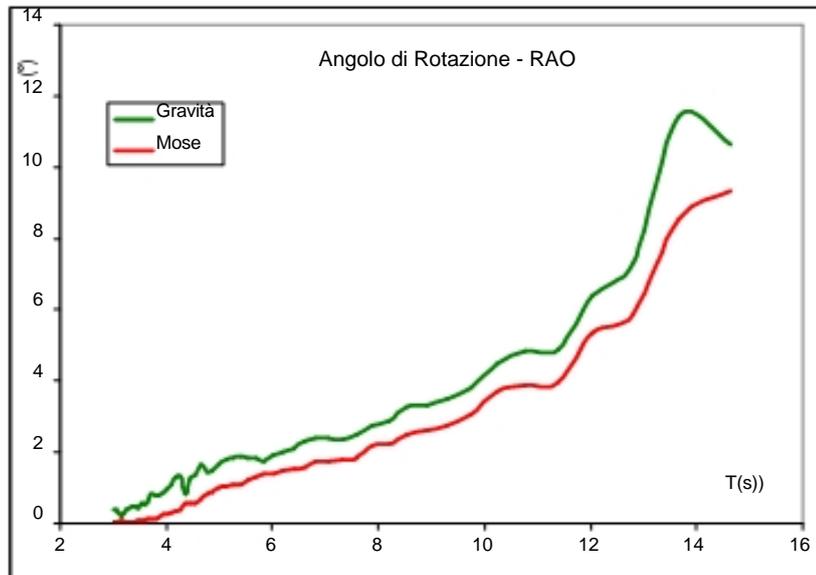


Carichi dinamici al punto di incernieramento sulla fondazione:



Anche se l'ampiezza di rotazione della paratoia a Gravità è maggiore dell'ampiezza della paratoia MoSE, la forza verticale è minore, in particolare la forza principale di spinta di onda.

Da analisi incrociate di correlazione degli intervalli di tempo degli angoli di rotazione e d'altezza di onda, sono state derivate RAOs che chiaramente mostrano un'ampiezza più grande del 10% per la paratoia a Gravità per tutto l'intervallo del periodo.



La stessa conclusione è ricavata qui di seguito per la configurazione della schiera di paratoie.

6.2.2 Effetto della rigidità idrostatica non lineare

Per un'ampiezza di rotazione maggiore ai 5° ci si aspetta che la variazione di galleggiamento e di volume sommerso della paratoia abbiano un'influenza sull'idrostatica.

Dei calcoli sono stati realizzati per le condizioni di 1000 anni con due spettri aventi la stessa altezza significativa $H_s = 3.2$ m e due periodi di picco: $T_p = 9.3$ sec e $T_p = 8$ sec.

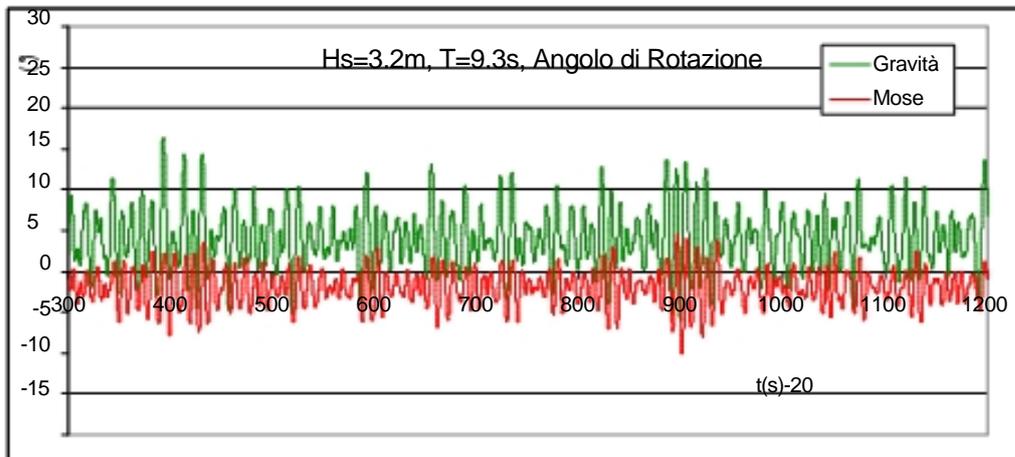
Per il periodo di picco maggiore $T_p = 9.3$ sec i confronti dei risultati ottenuti per la paratoia a Gravità e la paratoia MoSe sono indicati qui di seguito (solo componente "dinamico" indotto dalla onde) :

Forza (N)	Fx		Fz		Totale
	Min	Max	Min	Max	Max
MoSE Lin	-1.33E+06	1.18E+06	-1.93E+06	1.62E+06	2.34E+06
MoSE NL	-7.55E+05	5.61E+05	-3.51E+05	4.02E+05	8.33E+05
Gravità Lin	-7.79E+05	9.89E+05	-1.78E+05	2.52E+06	2.71E+06
Gravità NL	-1.04E+06	1.23E+06	-4.55E+05	4.94E+05	1.32E+06

Il componente idrostatico non lineare diminuisce leggermente i carichi paragonato ai calcoli lineari. Questa riduzione gioca a favore della paratoia MoSE. Considerando il periodo di picco minore, $T_p = 8$ sec, risultati simili vengono dati solo per la paratoia a Gravità, poichè per la paratoia MoSe si verificano fenomeni di instabilità. La paratoia a Gravità mostra carichi minori per $T_p = 8$ sec rispetto a $T_p = 9.3$ sec, anche se l'angolo di rotazione è abbastanza simile.

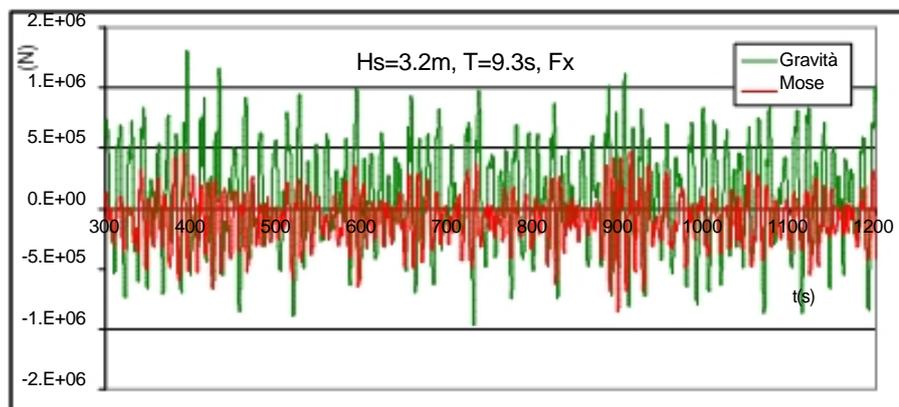
		Fx (N)		Fz (N)		Totale	Inclinazione (°)	
		Min	Max	Min	Max	Max	Min	Max
$T_p = 9.3$	Gravità NL	-1.04E+06	1.23E+06	-4.55E+05	4.94E+05	1.32E+06	-8.11	6.49
$T_p = 8.0$	Gravità NL	-7.82E+05	7.40E+05	-4.78E+05	4.74E+05	9.17E+05	-7.96	8.51

Angolo di rotazione per $T_p=9.3s$



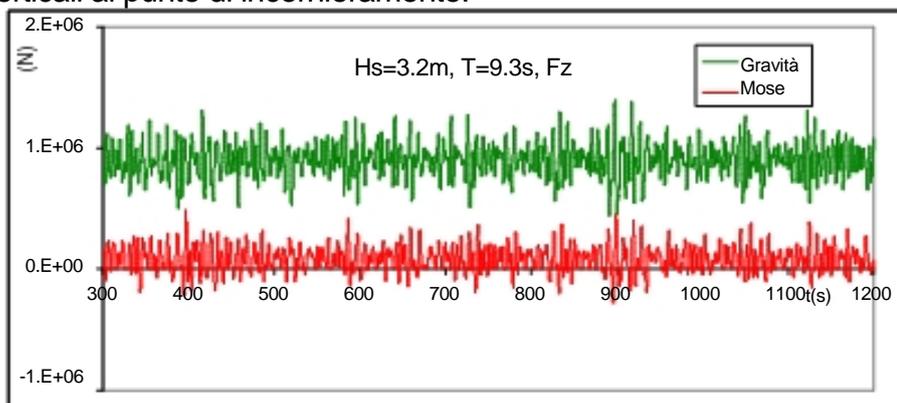
Inclinazioni principali ottenute: 2° verso il basso per la paratoia MoSE e 4° verso l'alto per la paratoia di Gravità. La trazione verso il basso riduce la sporgenza della barriera, la trazione verso l'alto aumenta la sporgenza. I componenti dinamici sono molto simili per le due barriere con un'ampiezza massima di 10° .

Carichi orizzontali al punto di incernieramento:



La forza massima ha un andamento lineare anche se i contributi del componente principale e del componente dinamico sono abbastanza diversi.

Carichi verticali al punto di incernieramento:



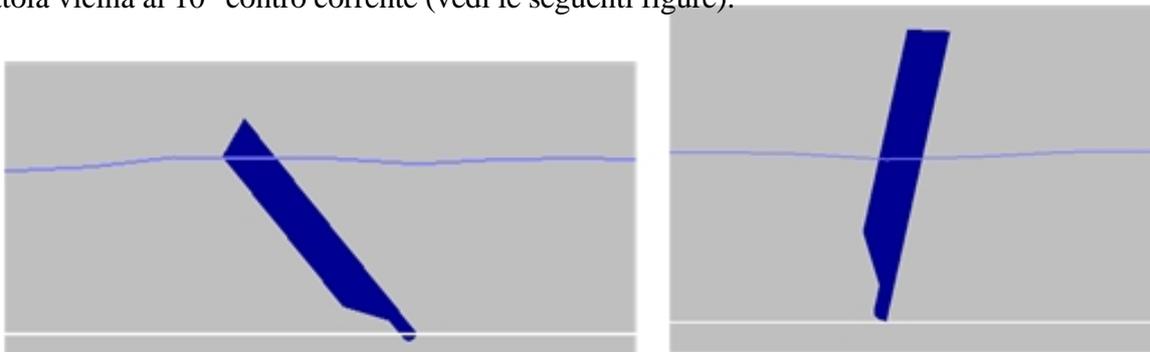
Sia il componente principale che il componente dinamico sono abbastanza diversi se confrontati ai calcoli lineari. Il componente dinamico è drasticamente ridotto.

Per il periodo di picco minore la paratoia a Gravità mostra una risposta migliore rispetto al periodo di picco maggiore, mentre è stata riscontrata l'insorgenza di fenomeni di instabilità per la paratoia MoSE. Basandosi su tali risultati è stata realizzata un'analisi di sensibilità alle condizioni di altezza significativa di onda per la paratoia MoSE. Da tale analisi sono state tratte le seguenti conclusioni:

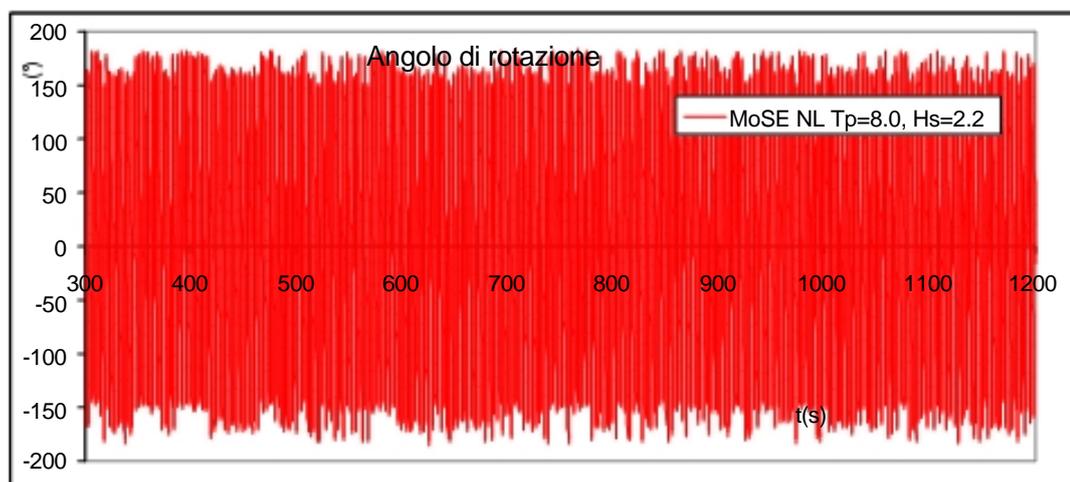
- Assumere altezza significativa $H_s=3.2\text{m}$ e tempo di picco $T_p=8\text{s}$ porta ad un comportamento instabile (caotico) con carichi e movimenti non realistici.

Uno smorzamento viscoso è stato aggiunto allo smorzamento dovuto all'onda di radiazione per ridurre tale effetto. (vedi di seguito)

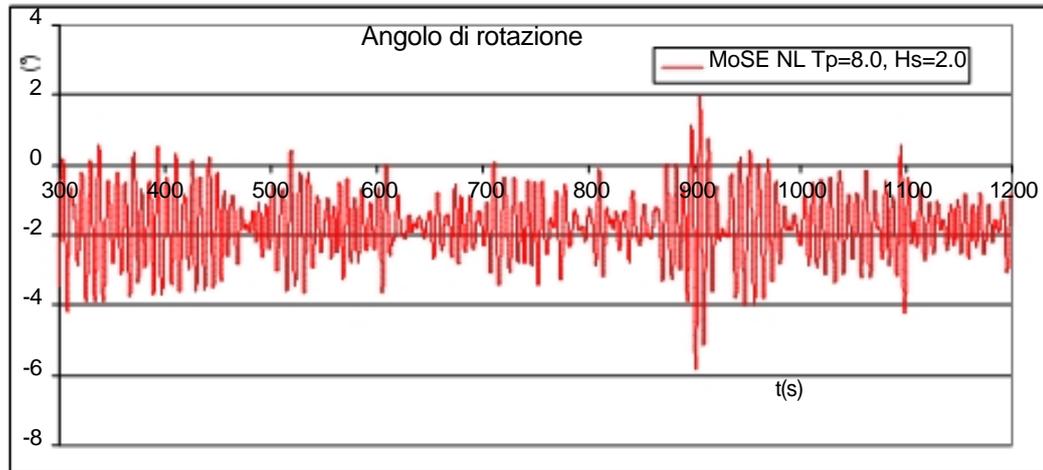
- L'analisi di sensibilità ha dimostrato che il massimo valore di altezza significativa H_s in grado di dare una risposta stabile è vicino a $H_s=2.0\text{m}$. Per $H_s < 2.0\text{m}$ l'angolo di rotazione massimo è minore di 6° attorno all'inclinazione di lavoro. Per $H_s > 2.0\text{m}$ si verificano maggiori ampiezze di rotazione (maggiori di 30°) sia attorno all'inclinazione di lavoro che ad un'altra inclinazione della paratoia vicina ai 10° contro corrente (vedi le seguenti figure).



Principale inclinazione della paratoia MoSE $T_p=8.0\text{s}$
A sinistra: $H_s=2.0\text{m}$, a destra: $H_s=2.2\text{m}$
Paratoia MoSE - $T_p=8.0\text{s}$, $H_s=2.2\text{m}$ – risposta instabile



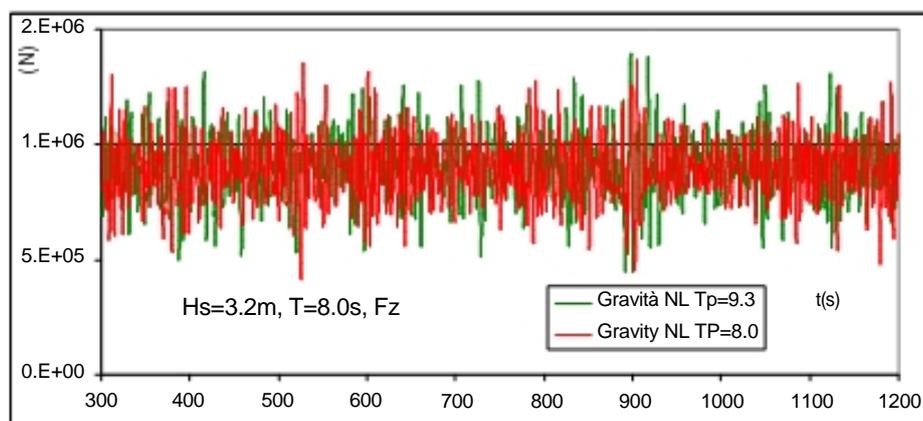
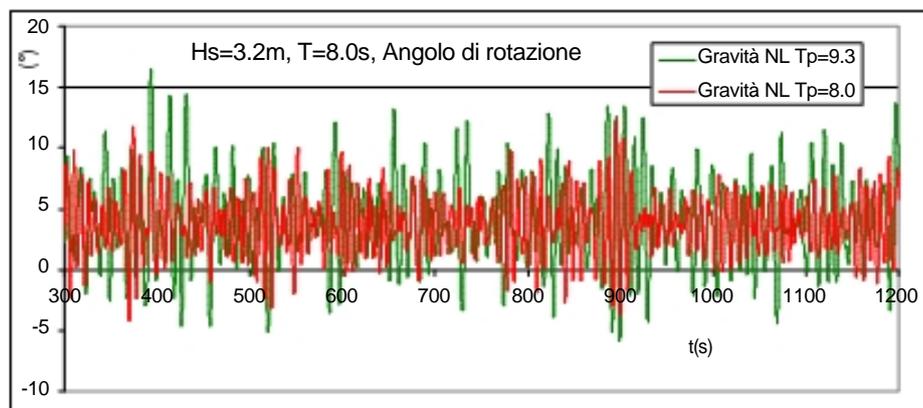
Paratoia MoSE - $T_p=8.0s$, $H_s=2.0m$ – risposta instabile

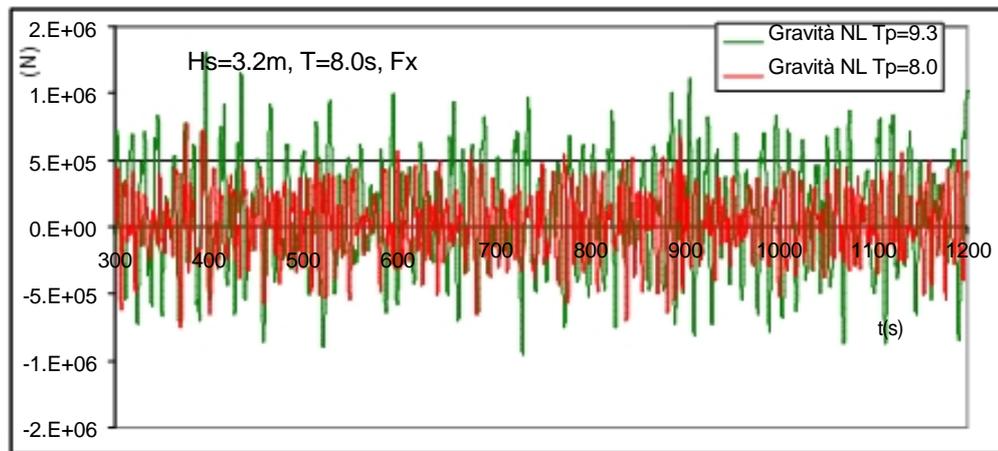


- Per lo stesso periodo di picco la paratoia a Gravità fornisce una buona risposta ad $H_s=3.2m$ con un angolo di rotazione minore e carichi simili a quelli ottenuti per $T_p=9.3s$ (vedi di seguito). La massima altezza dell'onda è ottenuta a $t=900s$.

Paratoia a Gravità – $T_p=8s$, $H_s=3.20m$

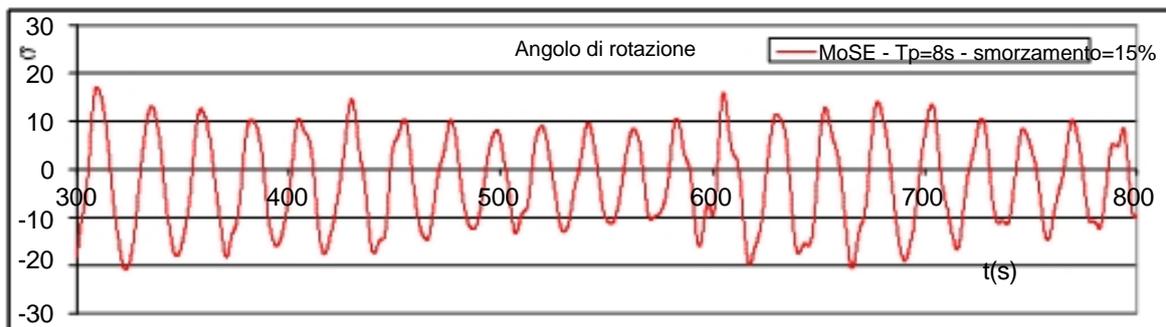
Angolo di rotazione compico e componenti di carico al punto di incernieramento





Influenza dello smorzamento viscoso sull'instabilità della paratoia MoSE

In seguito agli ultimi risultati è stata analizzata la sensibilità del comportamento instabile della paratoia MoSe rispetto allo smorzamento. Prendendo come valore dell'altzza significativa $H_s=3.2m$, una risposta stabile si ottiene imponendo uno smorzamento quadratico corrispondente al 15% dello smorzamento critico (aggiunto allo smorzamento dovuto all'onda di radiazione) che sembra molto più grande di quanto un flusso reale viscoso possa dare. I risultati sono mostrati qui di seguito:

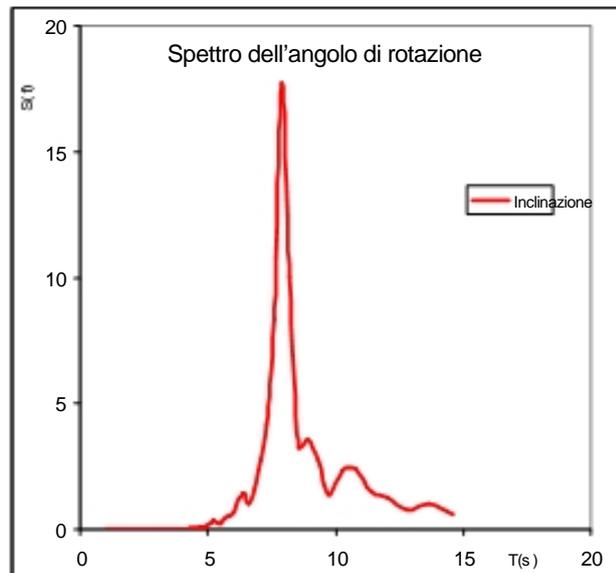
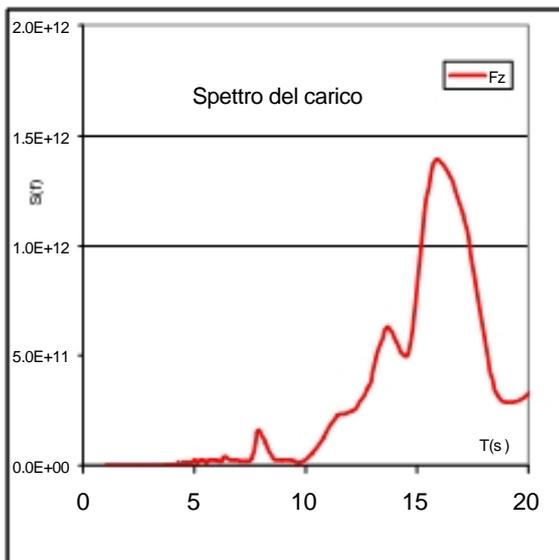


L'angolo di rotazione e i carichi al punto di incernieramento sembrano più elevati di quelli ottenuti per la paratoia a Gravità nelle stesse condizioni di onda. La seguente tabella confronta il componente dinamico derivato per ogni parametro:

		Fx (N)		Fz (N)		Totale	Inclinazione (°)	
		Min	Max	Min	Max	Max	Min	Max
Tp=8.0	Mose NL	-1.86E+06	1.53E+06	-9.47E+05	7.71E+05	2.09E+06	-17.9	18.9
Tp=8.0	Gravity NL	-7.82E+05	7.40E+05	-4.78E+05	4.74E+05	9.17E+05	-8.0	8.5

Nota: I valori corrispondenti alla paratoia MoSE non sono direttamente confrontabili ai valori della paratoia a Gravità, solo lo smorzamento dovuto all'onda di radiazione è stato considerato per la paratoia a Gravità (è stato invece ignorato lo smorzamento viscoso).

Paratoia MoSE- spettri del carico e inclinazione per $t_p=8s$ e Smorzamento aggiunto



Come si può osservare dallo spettro del carico la maggior parte dell'energia si verifica durante il periodo di risonanza della paratoia e non nei periodi di onda, anche se l'inclinazione reagisce ai periodi di onda. Da ciò appare che l'instabilità si è ridotta ma non è stata completamente eliminata. Questo conferma che una paratoia isolata del MoSe rimane instabile con il valore dell'altezza significativa (H_s) più grande di 2.2m (e $T_p = 8s$). Lo smorzamento aggiuntivo artificiale introdotto in questa simulazione può essere confrontato (solo quantitativamente) allo smorzamento artificiale che la paratoia ha in una simulazione di modello su scala che offusca il reale comportamento dinamico della barriera.

6.3 ANALISI DINAMICA DELLA BARRIERA

In questa sezione vengono confrontate le performance della barriera MoSE e della barriera a Gravità tenendo in considerazione le interazioni che avvengono tra le paratoie. Per motivi di coerenza è stata assunta inizialmente una sorgente idrostatica lineare. Successivamente è stato analizzato il comportamento non lineare di due paratoie vicine alla parete del canale.

6.3.1 Condizioni di lavoro (risposta lineare)

In un primo momento ci concentriamo sui casi dei 15 e dei 17m, dove vi sono inclinazioni quasi uguali.

I calcoli sono stati condotti su una serie di 20 paratoie uguali, ognuna larga 20 metri. Il livello dell'acqua ad ogni lato corrisponde alla massima marea (15m e 17m). La principale inclinazione delle paratoie corrisponde alla posizione di lavoro, ossia 46° verso il lato del mare per la paratoia a Gravità e 45° verso la laguna per la paratoia MoSE.

I movimenti sono calcolati per un intervallo di periodi di onda che corrisponde ai 100 anni d'onda, dai 3s ai 15s.

Nella teoria pura i moti vincolati e il comportamento ondulatorio lungo la barriera non avvengono per le onde perpendicolari alla barriera. È imposta l'incidenza di onda per iniziare la risposta della schiera di paratoie. Nella teoria pura per un campo di onda perpendicolare alla barriera e per pareti delimitanti simmetriche, tutte le paratoie si muovono con la stessa fase (comportamento simile alla paratoia isolata 2D. In realtà è previsto un campo di onda non simmetrico – configurazione di pareti, piccola incidenza di onda, diffrazione di onda 2D). Successivamente si verificano moti relativi tra paratoie adiacenti. Nella simulazione deve essere imposto un effetto artificiale non simmetrico: diverse condizioni iniziali per ogni paratoia lungo la barriera, poca incidenza per il campo di onde entranti.

Dettagli sul metodo teorico e accertamenti sono dati nei riferimenti B Molin. I confronti sono stati realizzati con i precedenti calcoli 3D per una paratoia isolata (paratoia MoSe e paratoia a Gravità), per confermare la coerenza dei risultati.

Dando uno sguardo ai massimi valori dei movimenti assoluti e dei corrispondenti carichi lungo la barriera, valori simili si ottengono confrontando il comportamento di una paratoia isolata, anche se vi è una variazione significativa lungo la barriera.

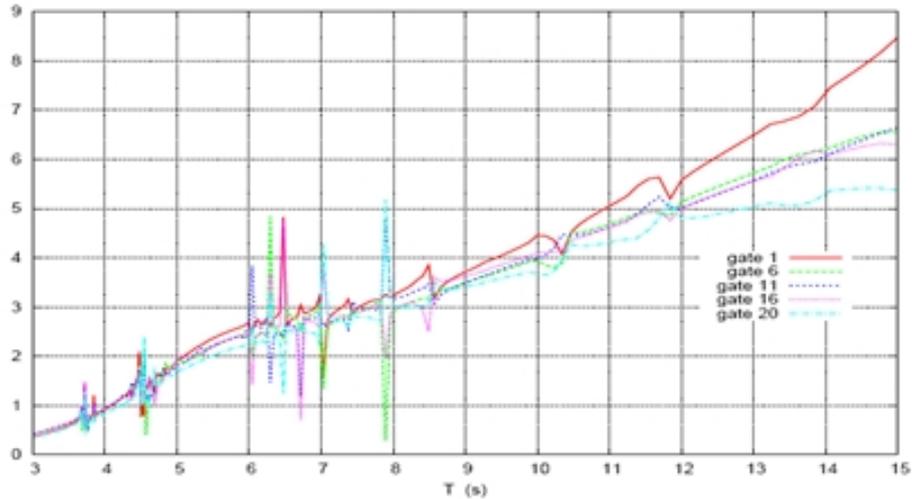
Successivamente l'analisi si è focalizzata sui moti relativi tra paratoie adiacenti. Ampiezze di rotazione attorno all'inclinazione di lavoro vengono fornite dalle seguenti figure per diversi periodi di onda:

- in rosso l'ampiezza di ogni paratoia
- in verde la fase corrispondente

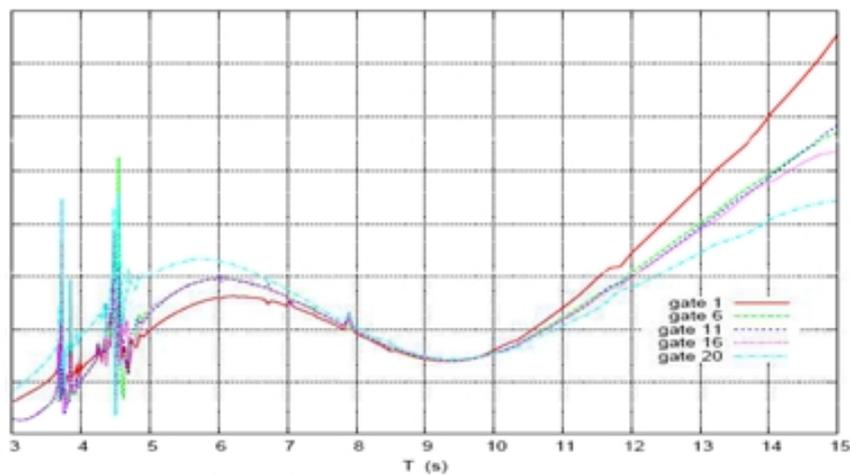
Dai risultati ottenuti si possono trarre i seguenti commenti:

- moti relativi massimi possono essere maggiori di 20° nelle condizioni di 1000 anni (moti “fuori fase”)
- La barriera MoSe è più sensibile agli effetti di interazione, movimento relativo cresce fino ai 25° confrontato ai 10° della paratoia a Gravità.
- Per periodi di onda maggiori, più grandi di 12s, si ottiene un comportamento ondulare in funzione delle condizioni iniziali delle paratoie vicine alle pareti e del picco. Si può osservare risonanza di picco, in particolare per la barriera MoSE.

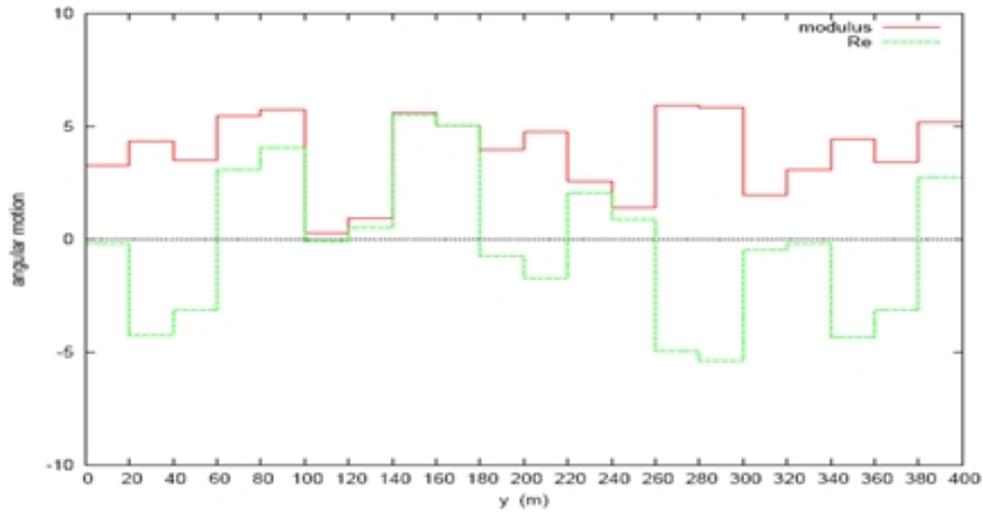
Paratoia a Gravità



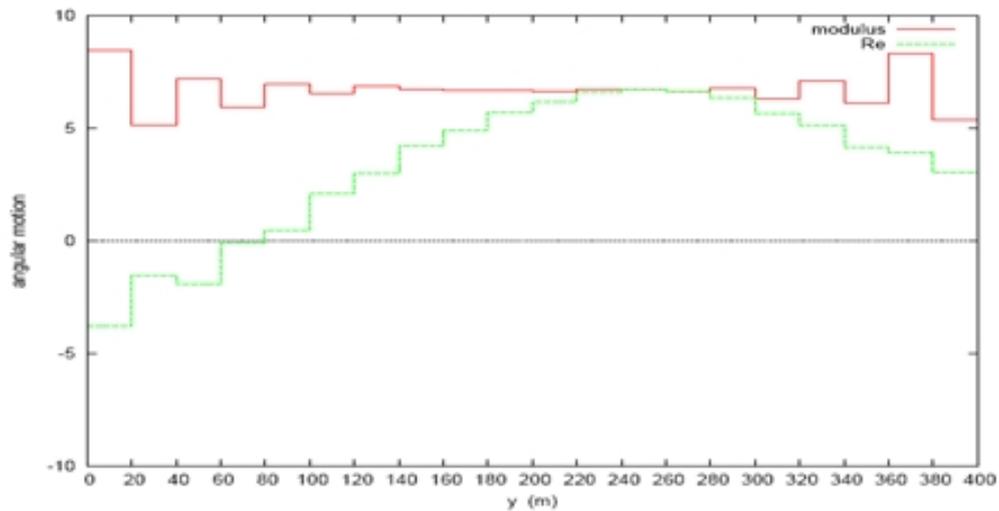
Paratoia a Gravità – condizione di lavoro- RAOs di moto angolare



Paratoia a Gravità – condizione di lavoro
RAOs di carico orizzontale al punto di incernieramento

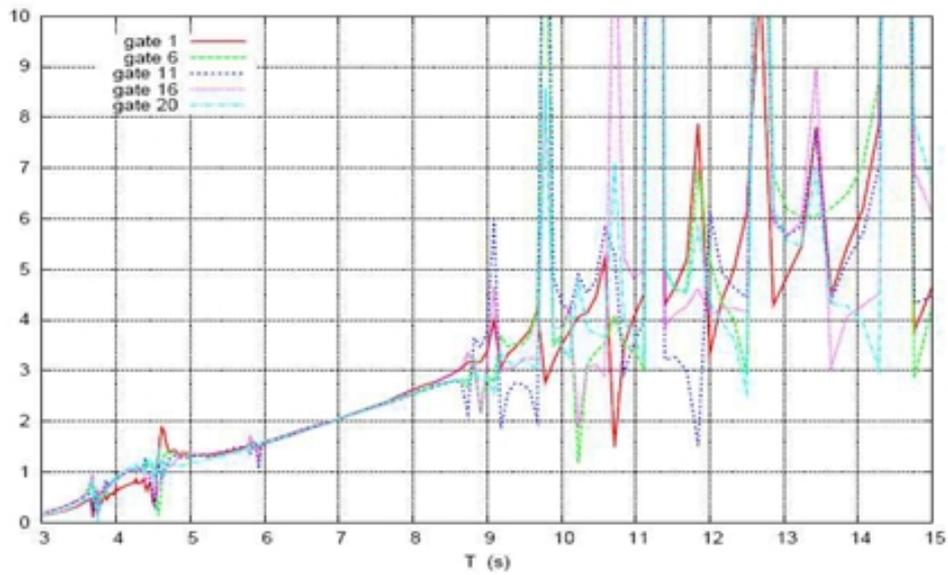


Moto angolare lungo la barriera - T=7.9s

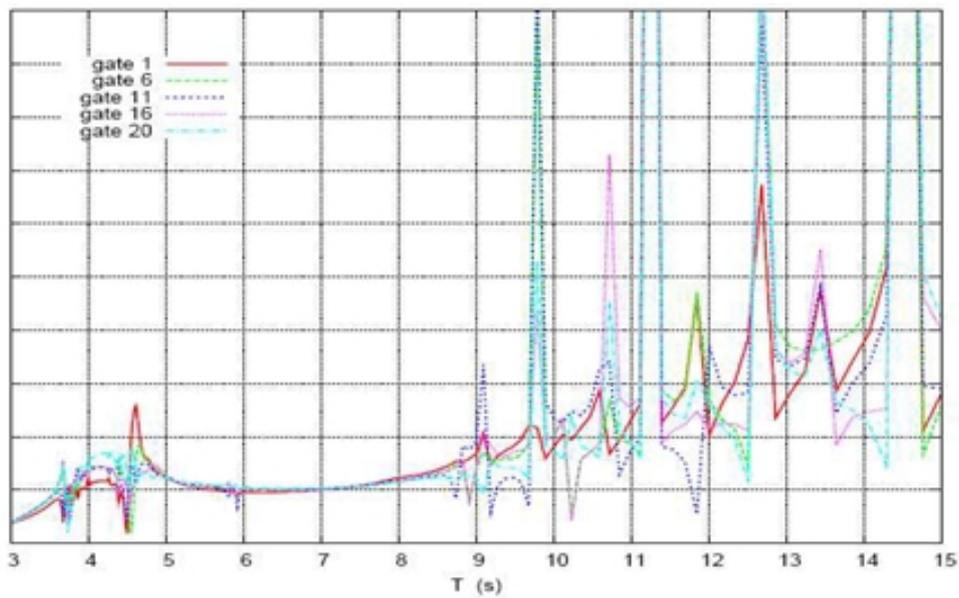


Moto angolare lungo la barriera T=15s

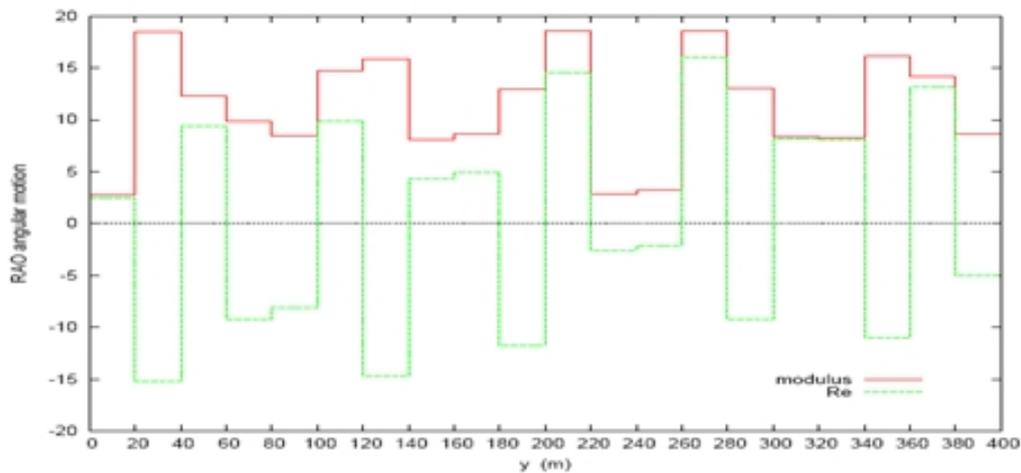
Paratoia MoSE



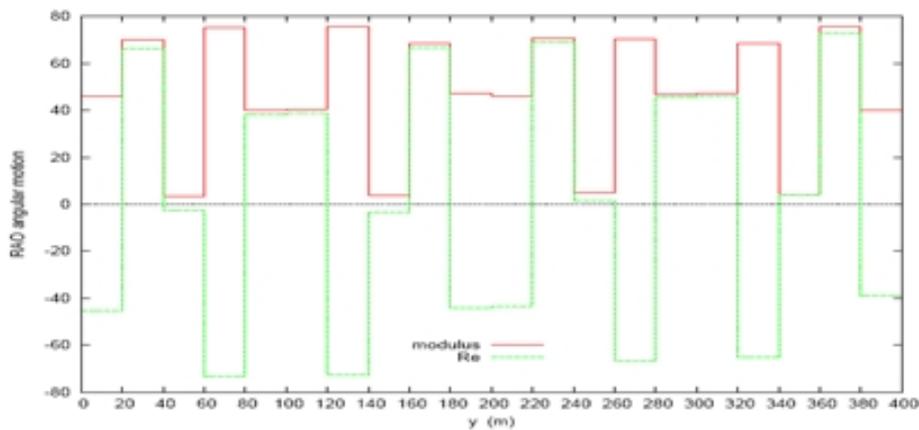
Paratoia MoSE – condizione di lavoro – RAOs di moto angolare



Paratoia MoSE - condizione di lavoro
RAOs di carico orizzontale al punto di incernieramento



Moto angolare lungo la barriera - T=9.8s



Moto angolare lungo la barriera - T=11.25s

Commenti sui risultati ottenuti :

- Si ottengono periodi di risonanza minori dovuti alle interazioni tra paratoie. A causa di maggiore rigidità, massa più piccola e inerzia aggiunta, la paratoia MoSe ha periodi di risonanza minore rispetto alla paratoia a Gravità.
- Le interazioni appaiono chiaramente nei movimenti. Tuttavia, lo smorzamento per radiazione è così elevato che non si può vedere alcun picco nei periodi di risonanza nella risposta angolare.
- Entrambi i concetti hanno simili RAOs dei movimenti angolari, che sono allo stesso tempo simili a quelli ottenuti per una paratoia singola modellata sulla stessa forma della paratoia reale (2D o 3D). Le interazioni hanno effetti maggiori per periodi più grandi degli 11s (fuori dall'intervallo dei periodi di onda) e solo per la paratoia MoSe.
- I movimenti "fuori fase" tra due paratoie adiacenti avvengono chiaramente con una rotazione relativa dai 5° ai 20° in funzione del periodo d'onda (nell'intervallo dei 100 anni dei periodi di onda). Questo effetto è abbastanza caotico per un periodo minore ai 10s per quanto concerne il movimento della paratoia lungo la barriera e in modo più significativo per la paratoia MoSe. Per un periodo più grande si osserva un comportamento ondulatorio come un sistema di ribaltamento che genera onde.
- Considerando le RAOs dei carichi dinamici al punto di incernieramento, queste sono più piccole con la paratoia a Gravità rispetto alla paratoia MoSe. Nel caso della schiera di paratoie, entrambe le barriere mostrano dei picchi che assomigliano a risonanza nella risposta.

I picchi che appaiono nell'intervallo di periodo minore sono molto vicini e non molto alti, quindi non dovrebbero destare preoccupazione con andamento del moto ondoso irregolare dove l'energia di onda è distribuita nel dominio delle frequenze.

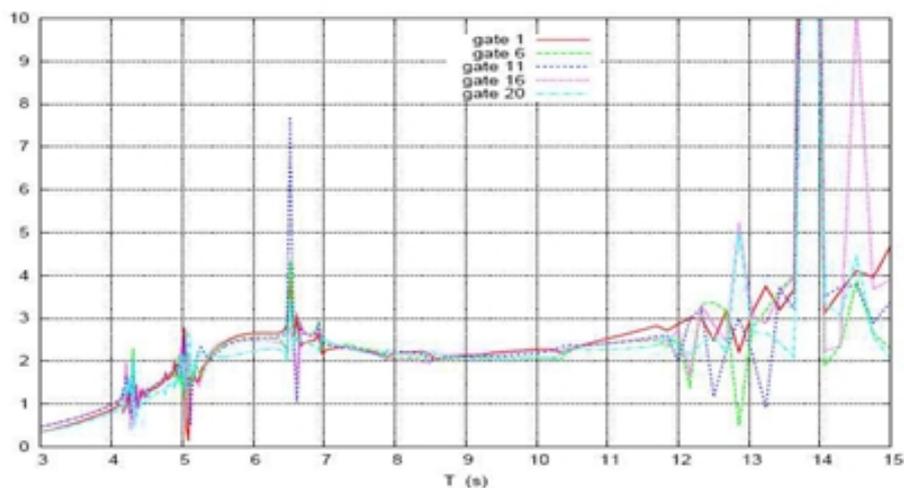
- Altri picchi, più ampi e più alti, appaiono nell'intervallo di periodo maggiore, oltre i 9s, con il concetto MoSe. Non compaiono con il concetto a Gravità nella configurazione dei 15 e 17m. Sembra che il concetto a Gravità sia pertanto superiore al concetto MoSe.

- Tuttavia, l'insorgenza di tali picchi è molto sensibile alla massa e alla rigidità del sistema. Abbiamo ripetuto i calcoli, per quanto riguarda il concetto MoSe, con la rigidità idrostatica divisa per 2. Si può allora vedere che i picchi di risonanza oltre gli 11s sono scomparsi. Non solo i picchi sono scomparsi, ma la RAO è diminuita nell'intervallo di periodo minore, a causa della minore rigidità. I picchi di risonanza si sono spostati a periodi di onda più bassi.

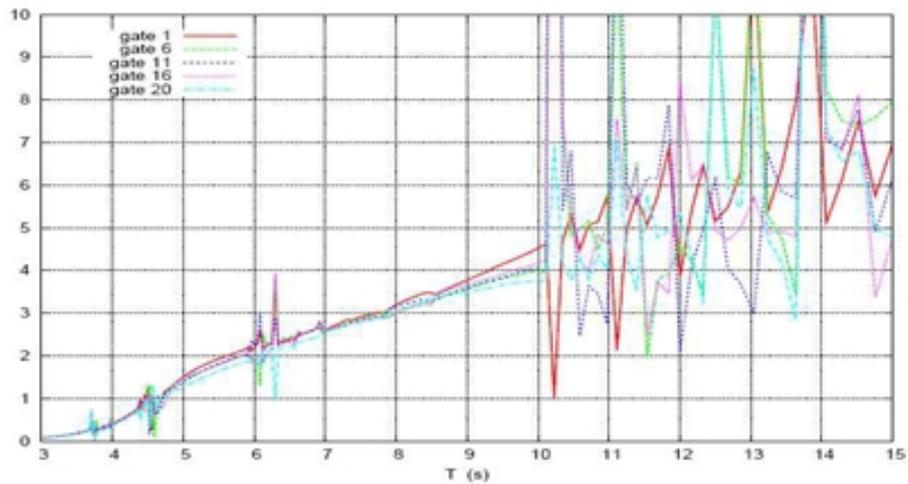
I picchi più bassi a 3.7s, 4.6s, e 6s non si sono spostati. Questi non sono collegati alla rigidità e alle frequenze naturali delle paratoie individuali. E' probabile che questi picchi siano associati ad altri tipi di risonanza, come ad onde intrappolate lungo la barriera. Il calcolo con la rigidità ridotta è stato realizzato per considerazioni accademiche considerando che la rigidità del MoSe, in funzione della sua geometria e della distribuzione del suo peso/spinta di galleggiamento (scatola forgiata in modo tale da lavorare come pendolo a direzione invertita), è derivata dal "progetto definitivo", il miglior progetto realizzabile per il concetto di galleggiamento.

6.3.2 Condizioni iniziali (Irisposta lineare)

In una seconda fase sono state analizzate le condizioni iniziali mantenendo un tirante di acqua di 15m da entrambi i lati della barriera. Risultati simili sono stati ottenuti:

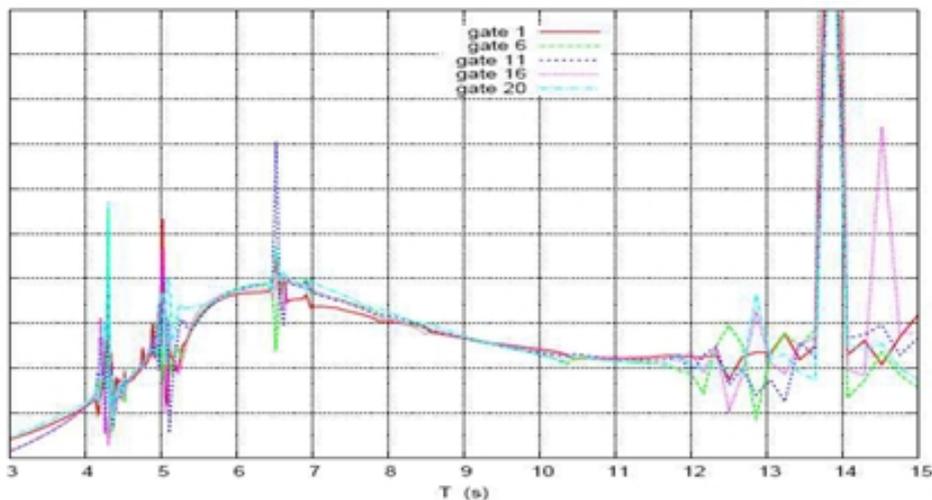


Paratoia a Gravità - condizioni iniziali – RAOs di moto angolare

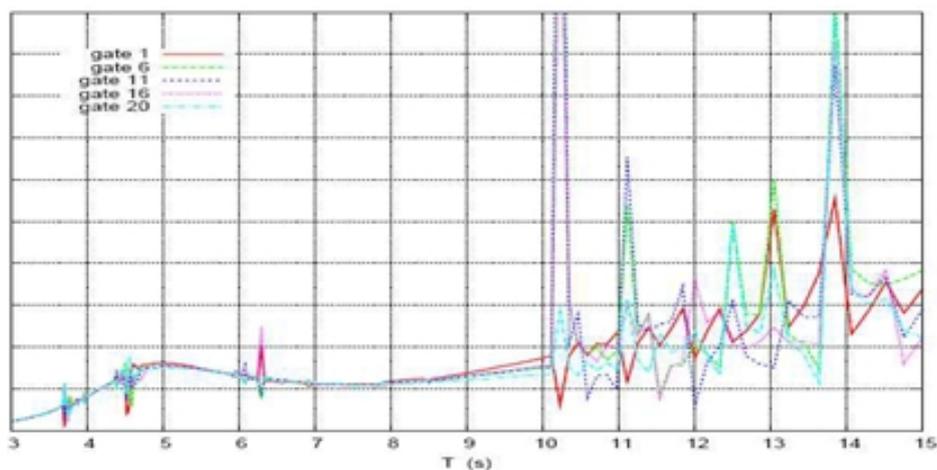


Paratoia MoSE - condizioni iniziali - RAOs di moto angolare

In condizioni di lavoro le RAOs sono maggiori per la paratoia MoSE, con rotazioni “fuori fase” relative più grandi tra paratoie adiacenti.



Paratoia a Gravità – condizioni iniziale – RAOs di carico orizzontale



Paratoia MoSE – condizioni iniziali - RAOs di carico orizzontale

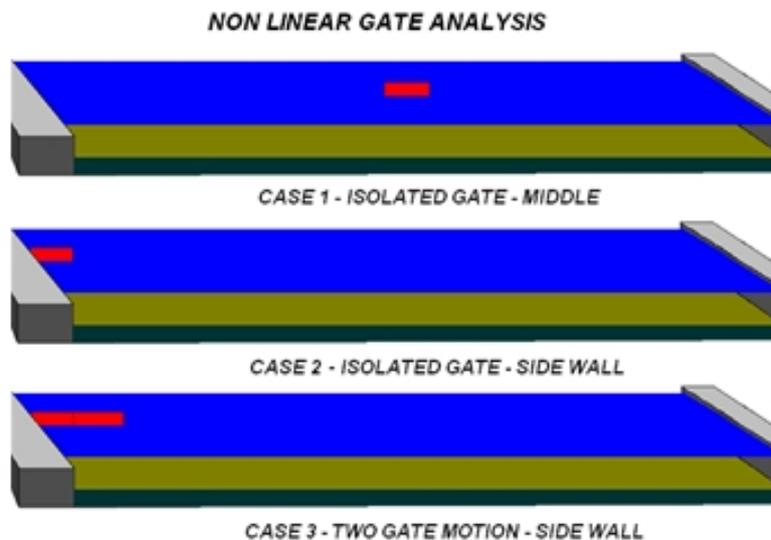
Anche se le RAOs del picco di carico sono più grandi per la paratoia a Gravità rispetto alla paratoia MoSE, tali RAOs portano a simili carichi massimi per le due paratoie.

6.3.3 Condizioni iniziali (risposta non lineare)

Anche se la modellazione del comportamento non lineare di una configurazione di più corpi in pura risonanza è ora possibile con un software avanzato come quello usato per questa analisi (Deep Lines) alcune difficoltà sono ugualmente emerse in tali casi:

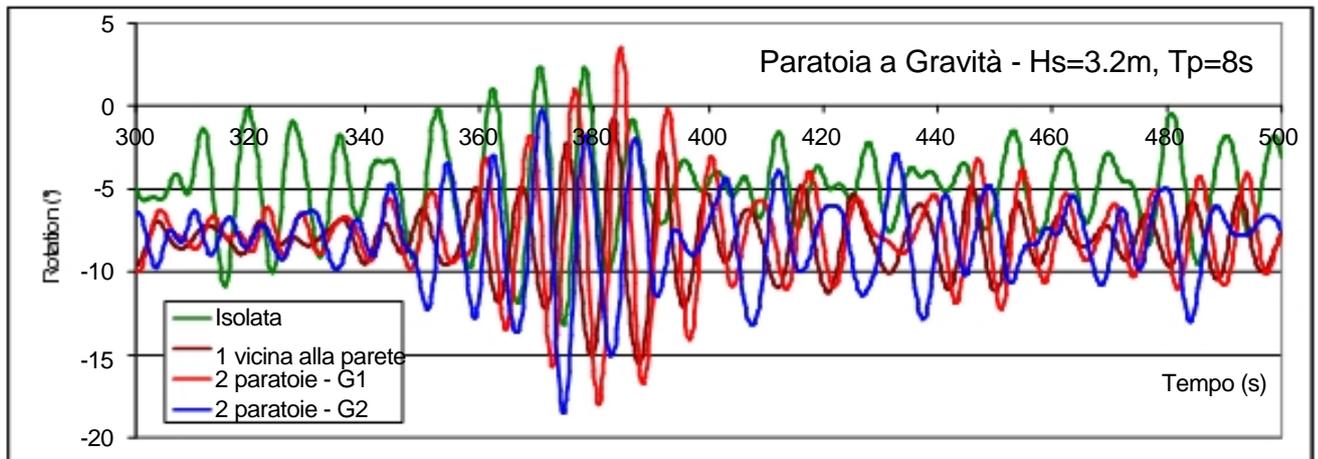
- Nel caso di insorgenza di larghi movimenti non realistici delle paratoie, caratterizzati dalla presenza di super-armoniche o sub-armoniche (instabilità dinamica secondo la definizione di Mathieu), come è stato osservato per una paratoia isolata in condizioni di lavoro, ci sono limiti per la loro simulazione numerica.
- Calcoli di tempo molto grandi richiedono di tenere in considerazione le interazioni idrodinamiche tra tutte le paratoie della barriera, sia per i calcoli preliminari idrodinamici che per l'analisi del dominio temporale di risposta, e non ci sono esperienze precedenti disponibili che permettano di convalidare i risultati delle analisi.

L'alternativa considerata è quella di simulare solo due paratoie in movimento, localizzate ad un'estremità del canale. È stata analizzata una configurazione intermedia, composta da una paratoia isolata in movimento vicino alla parete del canale (vedi illustrazione di seguito). Sono state imposte le condizioni al contorno (del mare) più critiche: $H_s=3.2$ m, $T_p=8$ sec. Quando è stato ottenuto un comportamento caotico (super-armoniche e sub-armoniche) per la paratoia MoSE, l'altezza di onda è stata ridotta a $H_s=2.2$ m per confermare i limiti "stabili" delle condizioni iniziali.

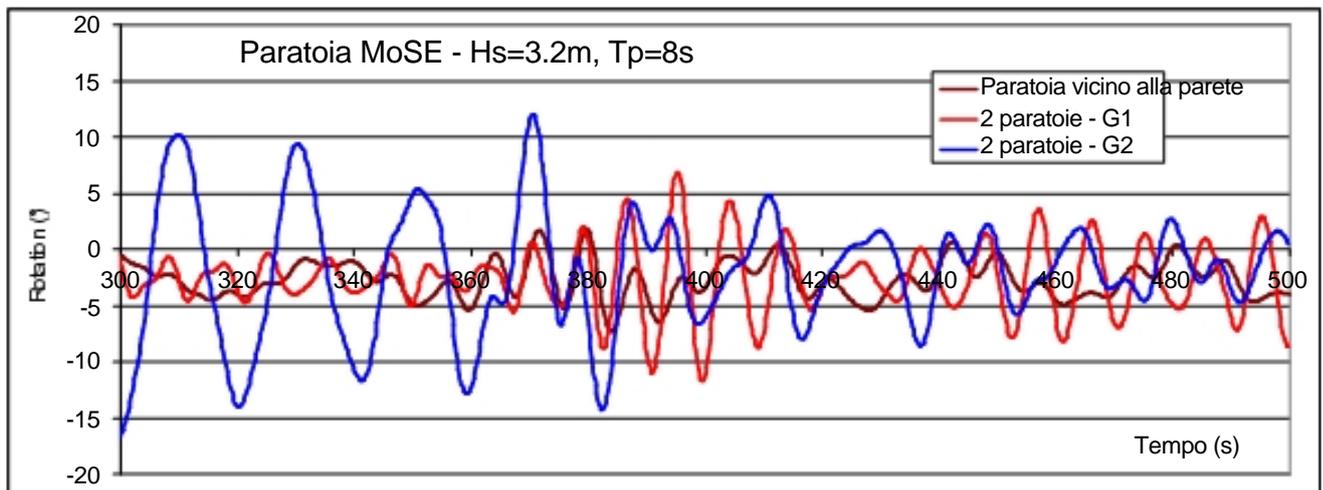


Configurazioni considerate per l'analisi delle condizioni iniziali

Le simulazioni sono state realizzate con onde irregolari sui 500 secondi (vicino agli 80 periodi d'onda). Lo smorzamento viscoso non è stato incluso presupponendo che le onde irradiate costituiscono la parte più importante della dissipazione di energia. I grafici seguenti mostrano chiaramente l'abilità lavorativa della paratoia a Gravità, e l'instabilità al contrario della paratoia MoSE, eccetto per le paratoie vicino alla parete del canale.



(a) Paratoia a Gravità – Massima altezza d'onda corrispondente
a t=370sec



(b) Paratoia MoSE

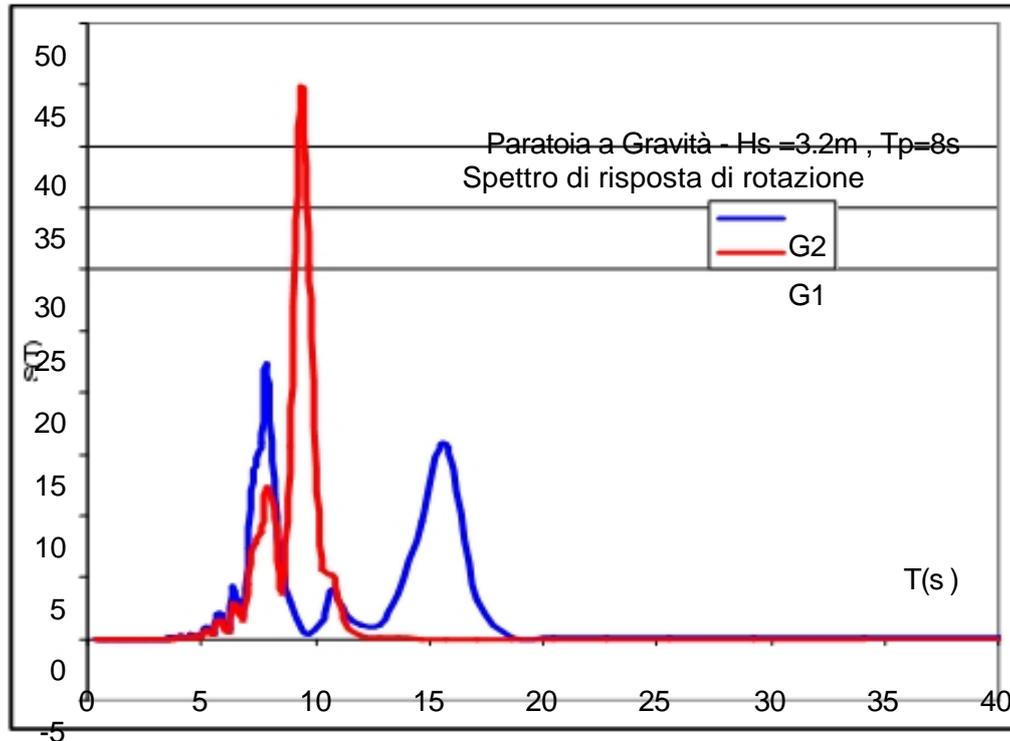
Le statistiche dei risultati sono mostrate nelle tabelle seguenti (rimuovendo i primi 100 secondi della simulazione corrispondenti alla parte transitoria).

Gravità Inclinaz(°)	Caso 1	Caso 2	Caso 3 / Hs=3.2		Caso 3 / Hs=2.2	
			Paratoia 1	Paratoia 2	Paratoia 1	Paratoia 2
Max	13.1	7.3	11.2	7.8	7.7	5.4
RMS	3.1	1.8	2.6	2.4	1.8	1.6

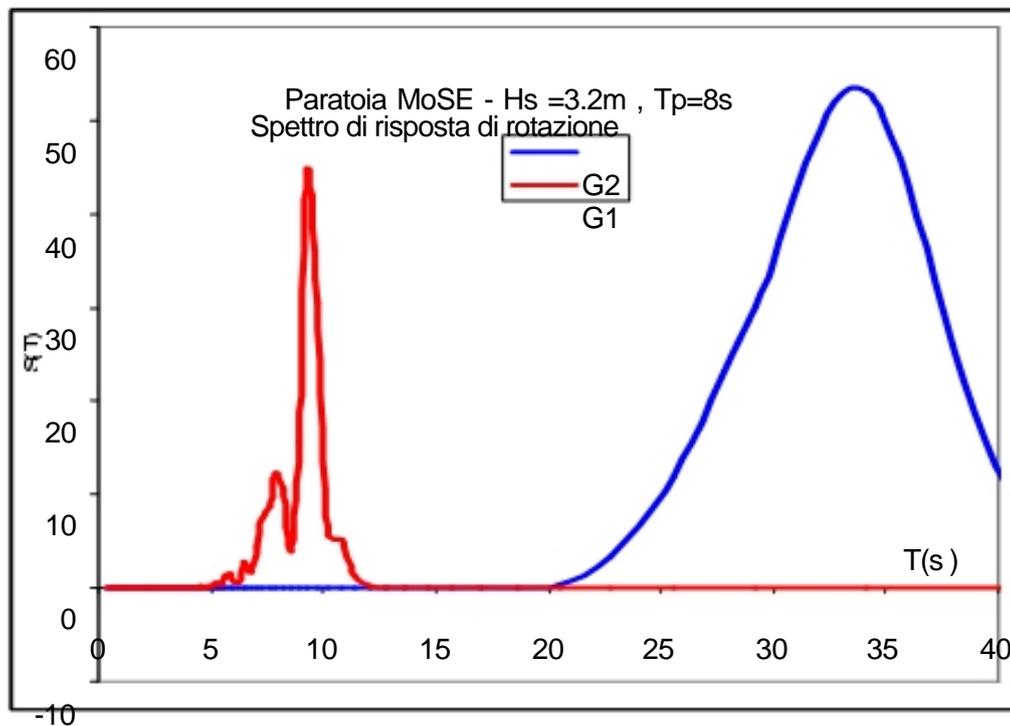
MoSE Inclinaz (°)	Caso 1	Caso 2	Caso 3 / Hs=3.2		Caso 3 / Hs=2.2	
			Paratoia 1	Paratoia 2	Paratoia 1	Paratoia 2
Max	179.0	4.3	6.8	11.9	6.5	7.6
RMS	24.9	1.5	3.1	5.4	1.8	3.1

Statistiche delle simulazioni in condizioni iniziali che si riferiscono ai valori principali

Concentrandosi sull'analisi fisica dei fenomeni sub-armoniche, sono stati ricavati per le due paratoie gli spettri di energia della risposta (Caso 3). L'energia di picco di onda è vicina alla frequenza 0.8 rad/s

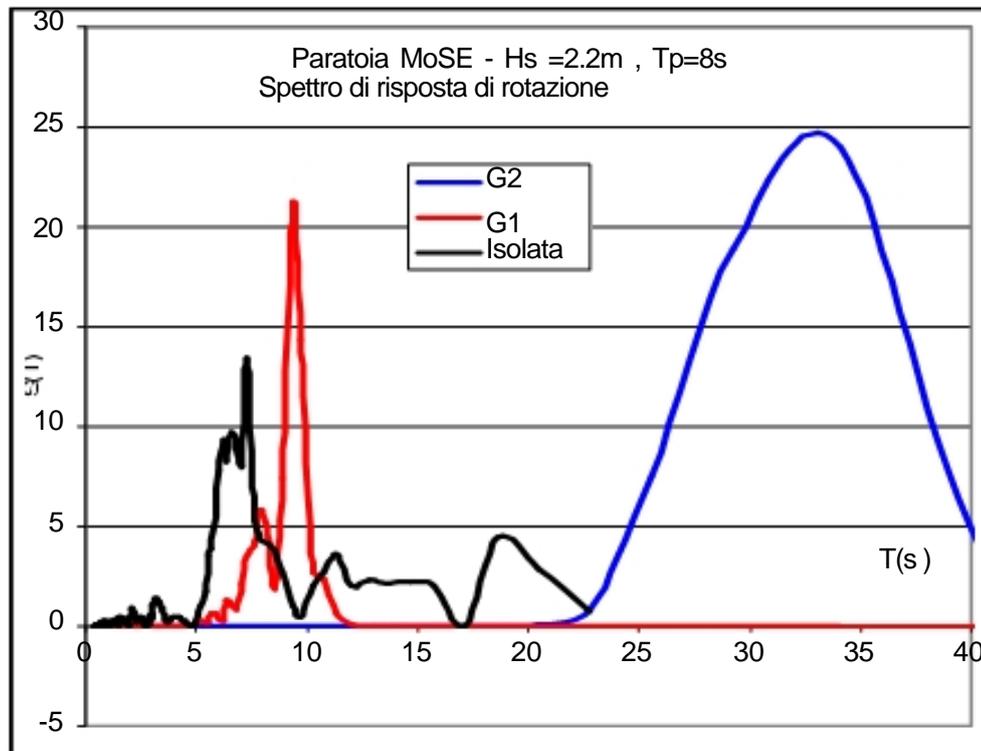


(a) Paratoia a Gravità – Spettro di rotazione – periodo di picco d'onda = 8 sec



(b) Paratoia MoSE spettro di risposta

Simili analisi sono state fatte per la paratoia MoSE per diverse configurazioni e per condizioni di onda minori, $H_s=2.2\text{m}$ e $T_p=8\text{sec}$, in modo da identificare l'effetto del coefficiente idrodinamico nei fenomeni di sub-armoniche e super-armoniche che potrebbero essere eccitate dai carichi di onda.

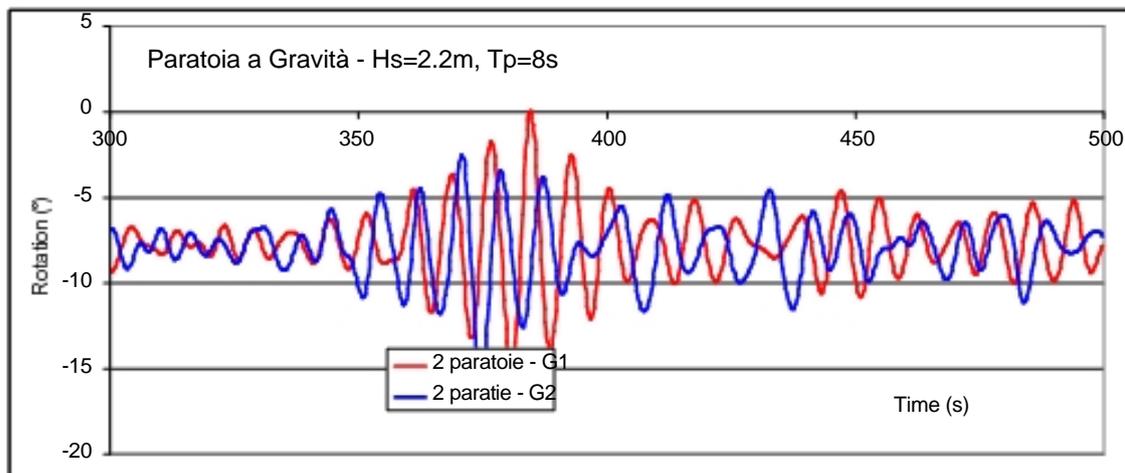


Paratoia MoSE- condizioni iniziali con andamento del moto ondoso moderato

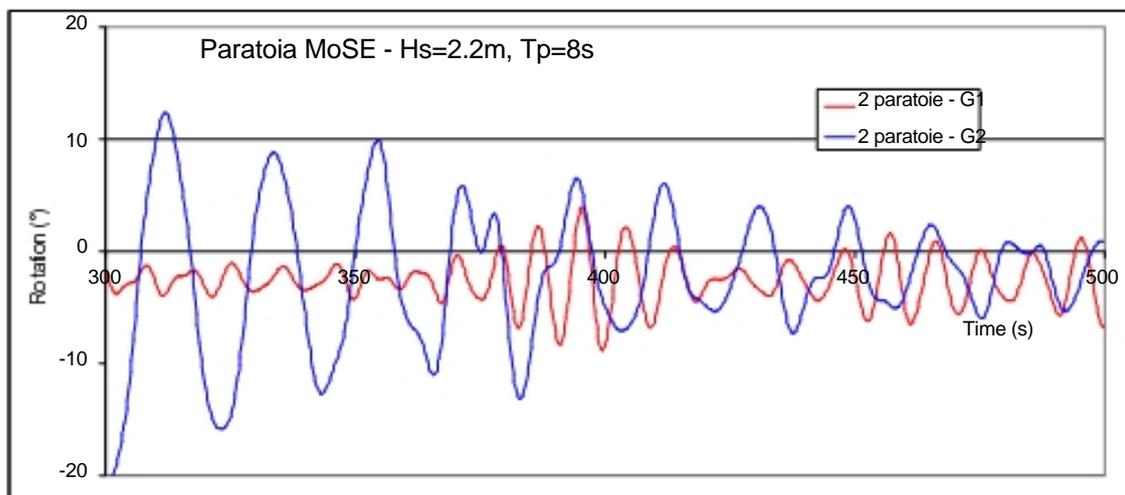
Commenti:

- Si osservano super-armoniche per la paratoia esterna (G2) sia per il progetto del MoSE che per quello della paratoia a Gravità, non è questo il caso invece della paratoia immediatamente vicina alla parete del canale (G1). Tuttavia il periodo di super-armoniche non è lo stesso per le due paratoie: due volte il periodo di picco di onda per la paratoia a Gravità confrontato a quattro volte il periodo di picco di onda per la paratoia MoSE.
- Osservando la risposta della paratoia MoSE in condizioni di onda moderate, si può vedere l'influenza del coefficiente idrodinamico che è diverso per una paratoia isolata e per varie paratoie influenzate dalla parete del canale. L'insorgenza di sub-armoniche e di super-armoniche si osserva per la paratoia isolata.
- La risposta super-armonica appare più critica per il MoSE perchè il suo periodo corrisponde ad un basso smorzamento dovuto all'onda di radiazione. E' mostrato chiaramente sia nel dominio temporale, che nello spettro (diviso per 100 nel grafico per G2).
- La risposta super-armonica della paratoia a Gravità sembra essere lo spettro normale di risposta alla frequenza naturale della paratoia.
- La ragione per cui nessuna sub-armonica si verifica per la paratoia vicino alla parete (G1) è da ricercare nell'aumento del coefficiente idrodinamico della paratoia indotto dalla parete.
- Osservando i risultati della paratoia a Gravità, è chiaro che il momento di forza di spinta è modificato dall'effetto parete, che aumenta i carichi di spinta. Interazioni idrodinamiche hanno anche una grande influenza sulle ampiezze di rotazione in funzione della configurazione analizzata.

Calcoli supplementari sono stati realizzati con $H_s=2.2\text{m}$ in modo da confermare i limiti dell'andamento del moto ondoso che porta a risposte stabili della paratoia MoSe ottenute in condizioni di lavoro. I risultati sono forniti dalle tabelle precedenti e nei grafici qui di seguito.



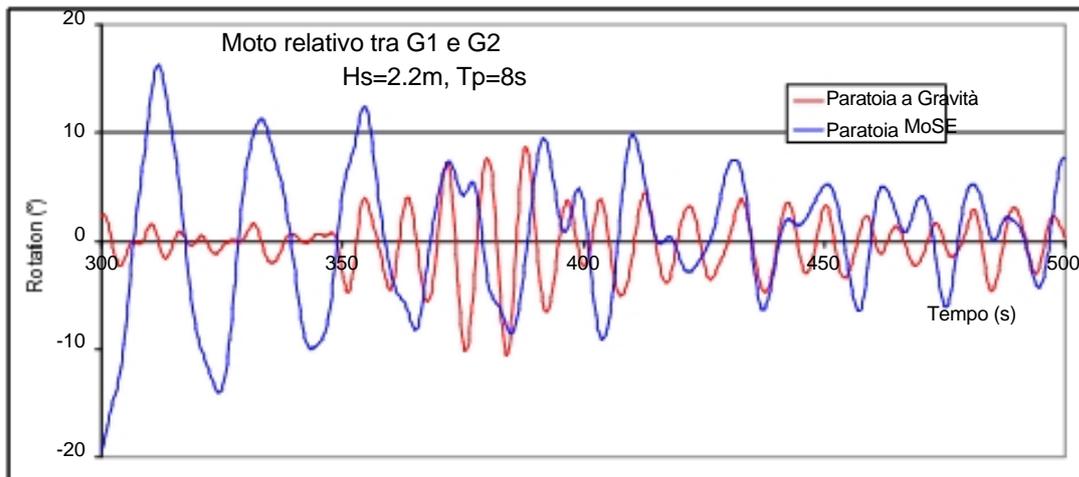
(a) Paratoia a Gravità



(b) Paratoia MoSE

Commenti:

- Se il componente super armonico rimane dominante per la Paratoia MoSe (paratoia esterna G2), la sua ampiezza è ridotta se confrontata all'altezza significativa $H_s=3.2\text{m}$
- Il massimo moto relativo tra le due paratoie è di 10° per la paratoia a Gravità e 20° per il MoSE (vedi dominio temporale analizzato qui di seguito).



Per concludere con questa sezione, la prossimità della paratoia alla bocca della parete del canale introduce variazioni significative alle matrici di massa e radiazione mantenendo la paratoia fuori dall'instabilità, ma non è sufficiente ad influenzare il comportamento dinamico della paratoia adiacente, come mostrato per il caso 3. Questo conferma che l'instabilità quando esiste per il MoSE è introdotta dalla paratoia all'intera barriera e non viceversa. Se la paratoia è stabile, la barriera non introduce instabilità o sub-armoniche.

7 CONCLUSIONI

La protezione e la difesa della laguna di Venezia dalle acque alte rappresenta uno dei principali obiettivi del Comune di Venezia. E' stato scelto il progetto di un sistema di paratoie mobili e la sua costruzione è iniziata da due anni. Il sistema di paratoie è costituito da una barriera di singole paratoie che può all'occorrenza essere chiusa per mantenere il livello di acqua massimo consentibile nel bacino lagunare.

Un punto chiave del progetto è il comportamento idrodinamico sia della paratoia singola che della schiera di paratoie, attraverso la quale potrebbe essere possibile un passaggio di acqua anche in caso di condizioni di mare meno severe di quelle massime di progetto. L'obiettivo di tale studio è di confrontare il comportamento idrodinamico di due sistemi di sbarramento basati sul progetto di due paratoie singole diverse.

Le differenze principali tra i due sistemi di paratoie sono il principio di funzionamento della paratoia e la sua inclinazione rispetto alla verticale:

- La paratoia MoSE contrasta il dislivello di marea con la spinta di galleggiamento. La paratoia è inclinata verso la laguna. (verso di azionamento contro corrente rispetto alla marea)
- La paratoia a Gravità contrasta il dislivello di marea con il peso proprio della paratoia. La paratoia è inclinata verso il mare aperto. (verso di azionamento nel senso della marea)

Lo studio fa riferimento alla bocca di Malamocco. Ogni barriera è composta da 20 paratoie, ciascuna larga 20 m, incernierate a fondo mare. Il confronto riguarderà prima il comportamento di una singola paratoia (analisi 2D e 3D).

Il presente progetto descrive :

- Metodologie, premesse e strumenti numerici usati per il confronto
- Dati di input: condizioni ambientali da prendere in considerazione, caratteristiche delle paratoie
- Analisi realizzate e principali risultati ottenuti
- Commenti sui principali risultati ottenuti: movimento delle paratoie e carico trasferito alla struttura di fondazione

Conclusioni principali: Metodologia

La Metodologia, le premesse e gli strumenti numerici utilizzati per le analisi, rappresentano lo stato dell'arte più avanzato nella modellazione idrodinamica non lineare e nella interazione tra più corpi in moto ondoso. È stato dato un incarico specifico su questo argomento al professore B. Molin della Università di Marsiglia. Per la risposta della schiera di paratoie, i risultati raggiunti, con analisi lineare, dal prof. Molin (Rif. 4) sono in accordo con i risultati pubblicati dal prof. C.C. Mei (Rif.5,6).

Paratoia isolata:

- Il confronto tra i calcoli lineari e non lineari dimostra che l'effetto idrostatico non lineare ha una notevole influenza per entrambe le paratoie: MoSE e Gravità. Le conclusioni per una paratoia isolata sono state tratte dai calcoli non lineari.
- Considerando le condizioni di onda nei 1000 anni, $H_s=3.2m$, $9.3s$, la Paratoia a Gravità porta ad angoli di rotazione più grandi dal 10% al 20% rispetto alla paratoia MoSE. La forza verticale al punto di incernieramento si riduce per la Paratoia a Gravità e le componenti orizzontali sono simili per i due progetti. La forza media di spinta induce una variazione della inclinazione media minore di 4° : verso il basso per il MoSE e verso l'alto per la Gravità. L'angolo di rotazione massimo è minore di 15° .

- Per il periodo di picco più basso, si è osservato un comportamento instabile della paratoia MoSE in funzione dell'altezza significativa H_s . Un'analisi specifica è stata condotta per il periodo di picco $T_p = 8s$ aumentando H_s . Il limite di stabilità è stato trovato per il valore dell'altezza significativa $H_s = 2,0$ m. Per valori più alti la paratoia oscilla tra due posizioni di inclinazione instabili: posizione di lavoro (-46°) e inclinazione verso il lato del mare aperto (7°).

La presenza del comportamento instabile è molto sensibile alla distribuzione delle masse (e della zavorra), ad esempio 10 tonnellate sono sufficienti a provocare un moto instabile.

Schiere di paratoie

- L'analisi lineare è stata effettuata per la schiera di paratoie tenendo conto della interazione idrodinamica tra le 20 paratoie e una differenza di 2 metri tra i livelli del lato del mare e della laguna. Il moto ondoso non simmetrico è stato ottenuto modellando le pareti di contenimento della schiera e una piccola incidenza dell'onda.
- L'interazione idrodinamica ha una notevole influenza sul comportamento globale della barriera. Pertanto il tentativo di definire i periodi naturali sembra proprio non realistico, in quanto i coefficienti idrodinamici sono molto sensibili ai moti relativi indotti dalle onde.
- Per i periodi di onda corrispondenti alle condizioni dei 1000 anni ($H_s=3.2m$, $T_p=9.3s$), si ottengono angoli di rotazione assoluti limitati, simili a quelli ottenuti per la paratoia isolata ma con differenza di fase tra paratoie adiacenti. Gli angoli relativi di rotazione raggiungono i 10° per la paratoia a Gravità e 25° per la paratoia MoSE. Per periodi più grandi si ottiene un comportamento ondulatorio della barriera con angoli di rotazione maggiori. I carichi al punto di incernieramento assumono valori simili a quelli della paratoia isolata.
- Le analisi non lineari condotte per le paratoie in condizioni iniziali (caso 1 e caso 2) hanno dimostrato che sia per la posizione a metà della paratoia che per la posizione vicina alla parete della bocca di porto la paratoia MoSE ha un comportamento dinamico e perciò è inutile condurre tale analisi per l'intera barriera MoSE, essendo questa impossibile con il modello di calcolo matematico disponibile al presente stato dell'arte. La paratoia a Gravità mostra un comportamento dinamico regolare. I risultati dei calcoli per il caso 3 dimostrano che l'interazione tra due paratoie adiacenti presenta ancora instabilità per la paratoia MoSE, mentre il comportamento della paratoia a Gravità è regolare.
- Considerati i diversi risultati ottenuti per la paratoia isolata a Gravità (caso 1 e caso 2) e per le due paratoie adiacenti a Gravità si può concludere che per il corretto calcolo dell'intera barriera è necessario realizzare un'analisi 3D non lineare.
- Per una valutazione più esaustiva è stata anche realizzata l'analisi dinamica per due paratoie adiacenti con lo spettro di onda (valori $H_s=2.2$ m e $T_p=8$ sec) sia per la paratoia MoSe che per la paratoia a Gravità. L'analisi è stata condotta con lo stesso coefficiente per lo smorzamento quadratico e senza alcun smorzamento artificiale aggiuntivo. Anche in questo caso vi è conferma del comportamento caotico della paratoia MoSE, e del comportamento regolare della paratoia a Gravità.

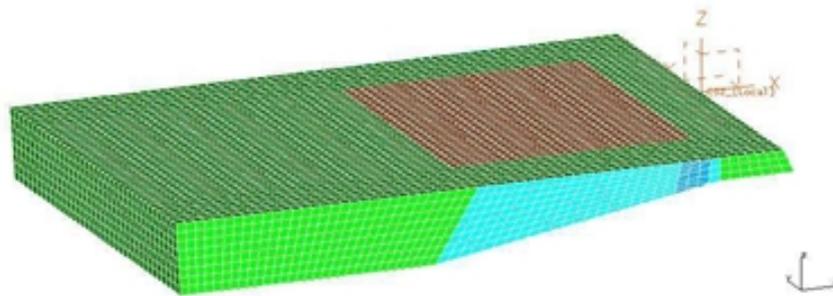
Commento generale:

- Il confronto delle due paratoie isolate, utilizzando la sorgente idrostatica lineare, porta a comportamenti simili, con moti più grandi per la paratoia a Gravità ma con carichi verticali maggiori per la paratoia MoSE in condizioni di moto ondoso estreme: $H_s = 3.2m$ e $T_p = 8sec$ e $9.3sec$.
- Sia la paratoia MoSe che la paratoia a Gravità hanno una sorgente idrostatica non lineare costante, perciò è necessaria un'analisi non lineare.
- Con l'effettiva sorgente idrostatica non lineare il comportamento delle due barriere è significativamente diverso, la barriera MoSe mostra un andamento instabile, non solo con lo spettro di progetto massimo ($H_s=3.2$ m, $T_p= 8sec$) ma anche con un andamento del moto ondoso meno critico.

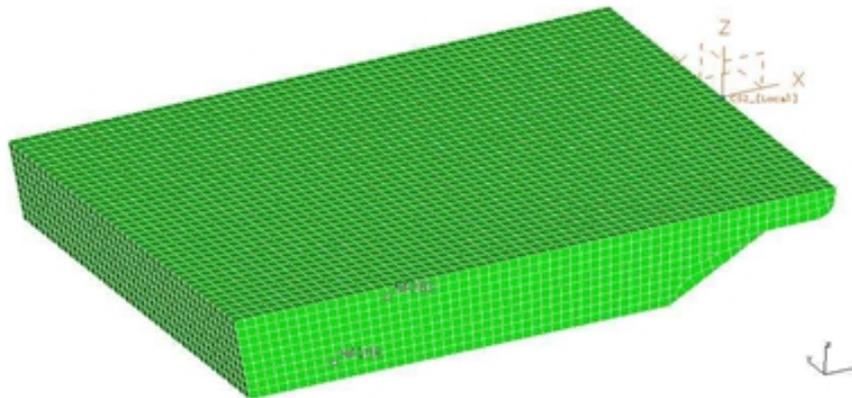
- Con l'analisi lineare i moti "fuori fase" potrebbero indurre ad angoli relativi tra paratoie adiacenti, limitati ai 10° nei 1000 anni dell'andamento del moto ondoso. Angoli relativi maggiori vengono ottenuti solo per periodi di onda superiori ai 13 sec (non nell'intervallo dei periodi di onda entrante)
- Il comportamento instabile, indotto da idrostatica, si ottiene nel caso della paratoia MoSE con onde ripide, ossia per i valori $T_p=8s$ corrispondente a $T_z=7.5s$. e $H_s>2.0m$. Un'analisi preliminare di sensibilità mostra che l'instabilità è altamente sensibile alla massa e all'inerzia della paratoia, alla distribuzione dell'energia di onda e allo smorzamento del flusso di marea.
Questo si rivela essere di particolare interesse perchè durante la campagna di misurazione al sito di installazione della barriera (lavori della durata di circa 4 anni) alla bocca di porto di Malamocco, vi sono prove dell'insorgenza di almeno una tempesta con valori $H_s = 2.5$ e $T_s = 7.5$ sec corrispondenti a $T_p = 8$ sec. A causa del delimitato ambito del lavoro della presente analisi, utilizzando lo stato dell'arte della modellazione idrodinamica, questi sono i risultati ottenibili. Un'analisi più profonda richiederebbe un meccanismo di smorzamento tra una schiera di paratoie, per poter meglio definire i limiti e l'intervallo dell'insorgenza di instabilità. Ad ogni modo, moti maggiori della paratoia MoSE hanno un forte impatto sull'efficienza della barriera contro i dislivelli di marea.
- La paratoia a Gravità non mostra un comportamento instabile indotto dalla sorgente idrostatica non lineare per l'andamento del moto ondoso di progetto.
- Basandosi sui risultati illustrati precedentemente è impossibile realizzare un'analisi dinamica per la paratoia MoSE. Considerato che l'ambito di questo studio non è quello di realizzare il progetto del sistema di paratoia, ma solo quello di condurre l'analisi dinamica e di confrontare il comportamento dinamico diverso dei due concetti di paratoie, è stato allora deciso di non condurre l'analisi dinamica non lineare dell'intera barriera anche per quanto riguarda la paratoia a Gravità, poichè è impossibile confrontare un sistema stabile con uno instabile:
 - ϕ_t il sistema stabile può essere analizzato con tecniche standard, prendendo in considerazione il comportamento dinamico non lineare tra più corpi che interagiscono con l'onda, ed è possibile ottenere risultati realistici e affidabili per un progetto.
 - ϕ_t il sistema instabile non può essere analizzato neppure utilizzando i software di simulazione non lineare più avanzati disponibili nel mercato, perciò non è possibile ottenere risultati affidabili per un progetto.
- In aggiunta al confronto del comportamento dinamico delle due barriere durante moto ondoso, è stato dimostrato che, rispetto alla variazione di marea, la paratoia MoSE richiede un sistema di controllo attivo dell'acqua di zavorra per mantenere le condizioni di lavoro, mentre la paratoia a Gravità non ne ha bisogno.

8 APPENDICE 1 : CARICHI DI ONDA DAL METODO DI CALCOLO

8.1 TRAMA 3D DI UNA PARATOIA ISOLATA



Trama della Paratoia a Gravità



Trama della Paratoia MoSE

8.2 FUNZIONI 3D DI TRASFERIMENTO DI CARICHI DI ONDA

Tutti i risultati vengono forniti in un dossier separato.

Rapporti separati pubblicati da B. MOLIN (Scuola Centrale di Marsiglia - consulente di Principia) descrivono il metodo teorico utilizzato e le analisi numeriche delle configurazioni delle schiere di paratoie.

Alcuni video di simulazioni si trovano in un DVD allegato.