			EL.	CON.	APP.
C0	30/11/2004	Emissione finale			
REVISIONE		DESCRIZIONE			

MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI

MAGISTRATO ALLE ACQUE

NUOVI INTERVENTI PER LA SALVAGUARDIA DI VENEZIA

CONVENZIONE REP. 7322 DEL 03.12.1992

LEGGE 29-11-1984 N. 798

Studio sulla risonanza sincrona dei modi propri della schiera di paratoie B.6.66

RELAZIONE FINALE DI SINTESI

ELABORATO	CONTROLLATO	APPROVATO
G.Pellegrini	G.Passacantando	Y.Eprim
ESECUTORE		DATA NOVEMBRE 2004

CONSORZIO VENEZIA NUOVA

VERIFICATO	CONTROLLATO	PROGETTAZIONE
COORDINAMENTO Consorzio Venezia Nuova		TECHNITAL IL RESPONSABILE : Ing. A. SCOTTI

INDICE

1. PREMESSA 3

2. OGGETTO DELLO STUDIO 4

3. ATTIVITÀ ESEGUITE SU MODELLO FISICO 5
   3.1. Descrizione del modello 5
   3.2. Prove eseguite 6
   3.3. Risultati ottenuti 7

4. TEORIA DEI MODI PROPRI DI UNA SCHIERA DI PARATOIE 10
   4.1. I modi propri della schiera di paratoie 10
   4.2. Modi propri di una schiera di larghezza infinita 10
   4.3. Modi propri di una schiera di larghezza finita 13

5. LA TEORIA DELLA RISONANZA SINCRONA DEI MODI PROPRI 16
   5.1. Il modello analitico per la configurazione semplificata di paratoie verticali (Rapporto intermedio B1) 18
      5.1.1. Chapter 2 - Formulation for single frequency response 18
      5.1.2. Chapter 3 - Radiation potential and reaction torques 19
      5.1.3. Chapter 4 - General identities 19
      5.1.4. Chapter 5 - Numerical Results 20
   5.2. Modello numerico per paratoie inclinate e fondale reale (Rapporto intermedio B2 e rapporto finale BF) 21
      5.2.1. Chapter 2 - Mathematical Formulation 23
      5.2.2. Chapter 3 - Series solutions in the far fields 23
      5.2.3. Chapter 4 - Hybrid Finite Element Method 23
      5.2.4. Chapter 5 - Validation for vertical gates 24
      5.2.5. Chapter 6 - Inclined gates 25

6. CONCLUSIONI 26

7. CONGRUENZA CON GLI OBIETTIVI DEL DISCIPLINARE TECNICO 28

1. PREMESSA

Il progetto per la difesa della città di Venezia e delle sua laguna dalle acque alte prevede il controllo del flusso di marea alle bocche lagunari mediante la realizzazione di quattro schiere di paratoie a spinta di galleggiamento. La configurazione progettuale delle opere da realizzare alle bocche è stata definita analizzando gli aspetti idrodinamici e il conseguente comportamento delle paratoie con numerosi studi su modelli matematici e fisici.
In particolare, negli ultimi anni, nel corso di diversi studi su modelli fisici bidimensionali e tridimensionali, è stata approfonditamente esaminata la dinamica delle oscillazioni trasversali della schiera di paratoie soggette all'azione ondosa, la cui conoscenza assume particolare rilevanza in relazione alla valutazione della sua tenuta idraulica.

La Commissione degli esperti internazionali (1998), in merito alle oscillazioni fuori fase delle paratoie e al conseguente rischio di riduzione di efficacia della schiera di paratoie in termini di tenuta idraulica, ha espresso il parere che dovessero essere condotti ulteriori studi sperimentali e teorici.
Gli aspetti da approfondire, sulla base delle osservazioni della Commissione, sono i seguenti:

I. L'analisi della forma dello spettro delle onde incidenti lungo il litorale veneziano (le oscillazioni fuori fase delle paratoie sono più marcate con spettri a bande strette);
II. Il comportamento delle paratoie con moto ondoso avente periodo corrispondente a quello che può dar luogo alle maggiori oscillazioni differenziali;
III. Gli effetti di scala che si possono essere manifestati nelle prove finora eseguite in modello fisico. In altri termini si tratta di verificare se l'ampiezza delle oscillazioni in prove condotte in scala ridotta (non superiore a 1:30) sia stata limitata dallo smorzamento causato dai vortici negli angoli della struttura e dall'attrito delle cerniere.

Tali aspetti sono stati trattati nell'ambito dello studio B.6.53 sugli effetti scala; con riguardo al punto II, il comportamento delle paratoie è stato studiato con stati di moto ondoso che presentano frequenze doppie rispetto a quella della schiera e che quindi generano risonanza subarmonica delle paratoie.
Sono state effettuate anche prove con onde estreme caratterizzate da frequenze di picco diverse da quelle che possono indurre risonanza subarmonica della schiera di paratoie.
Le analisi di dettaglio eseguite con il metodo della "wavelet analysis" sui risultati delle prove sperimentali hanno mostrato come uno sfasamento fra paratoie contigue possa

anche avvenire in stati di mare reali senza che sia presente una pronunciata risposta subarmonica fra i treni di onde incidenti e la schiera di paratoie. In alcuni casi uno sfasamento fra paratoie contigue è stato osservato in occasione di frequenze del treno d'onda incidente uguali alle frequenze di risposta delle paratoie (risposta sincrona e non di frequenza pari alla metà rispetto a quella della forzante).

In generale tale sfasamento delle oscillazioni delle paratoie è una naturale conseguenza della forma delle onde che si propagano lungo il canale e che, per gli effetti di rifrazione e diffrazione incidono sulla schiera con altezza variabile lungo l'asse della schiera stessa.
Tuttavia la possibilità di una risonanza sincrona del modo proprio non va esclusa e merita di essere investigata. A tal proposito si rammenta che le precedenti teorie si sono focalizzate sul fenomeno della risonanza subarmonica che si era manifestato in modo significativo nelle prove eseguite in un canale longitudinale che si estendeva sia lato mare che lato laguna. L'esistenza di tale tipo di risonanza è legata alla presenza di modi propri in cui l'energia resta intrappolata attorno alla schiera di paratoie proprio in virtù della presenza di pareti verticali ai lati del canale sia lato mare che lato laguna.

Quando invece si considera una geometria del tipo canale lato mare e bacino semi infinito ed aperto lato laguna, diviene possibile la propagazione radiale di energia nella laguna stessa. Il confinamento dell'energia attorno alla schiera diviene quindi imperfetto. In tale caso è allora possibile una risonanza sincrona, cioè una eccitazione del modo proprio tramite un'onda dello stesso periodo.

2. OGGETTO DELLO STUDIO

Il presente studio ha come oggetto quello di investigare la modalità di risonanza sincrona del moto fuori fase della schiera di paratoie. Tale indagine è consistita in:

- Esecuzione di una serie di prove sperimentali su modello fisico in scala 1:30
- Elaborazione di una teoria lineare basata sul moto a potenziale del fluido accoppiato con quello delle paratoie.

3. ATTIVITÀ ESEGUITE SU MODELLO FISICO

La descrizione di tutte le attività eseguite su modello fisico è contenuta, come previsto dal disciplinare tecnico dello studio, nel rapporto intermedio A1.

3.1. Descrizione del modello

Le prove sono state eseguite sul modello delle paratoie per la bocca di Chioggia in scala 1:30, già realizzato presso il Centro Sperimentale per modelli idraulici di Voltabarozzo del MAV nel corso dello studio sugli effetti scala (studio B.6.53).
Date le sue dimensioni, il modello è stato realizzato in modo semplificato, rappresentando 5 paratoie ai lati delle quali si trovano due ulteriori paratoie di lunghezza dimezzata: tale geometria è in grado di riprodurre le oscillazioni trasversali della schiera di lunghezza infinita che possono potenzialmente innescarsi in corrispondenza del clima ondoso locale (modi 1, 2, 3 e 5)
La schiera è contenuta in un canale di larghezza di 4.0 m e lunghezza di circa 30 m, tale struttura è stata modificata per la necessità di simulare un bacino di larghezza semiinfinita sul lato laguna: alle spalle delle paratoie è stata quindi realizzata una vasca di dimensioni 10mx10m come indicato in Fig. 3.1.

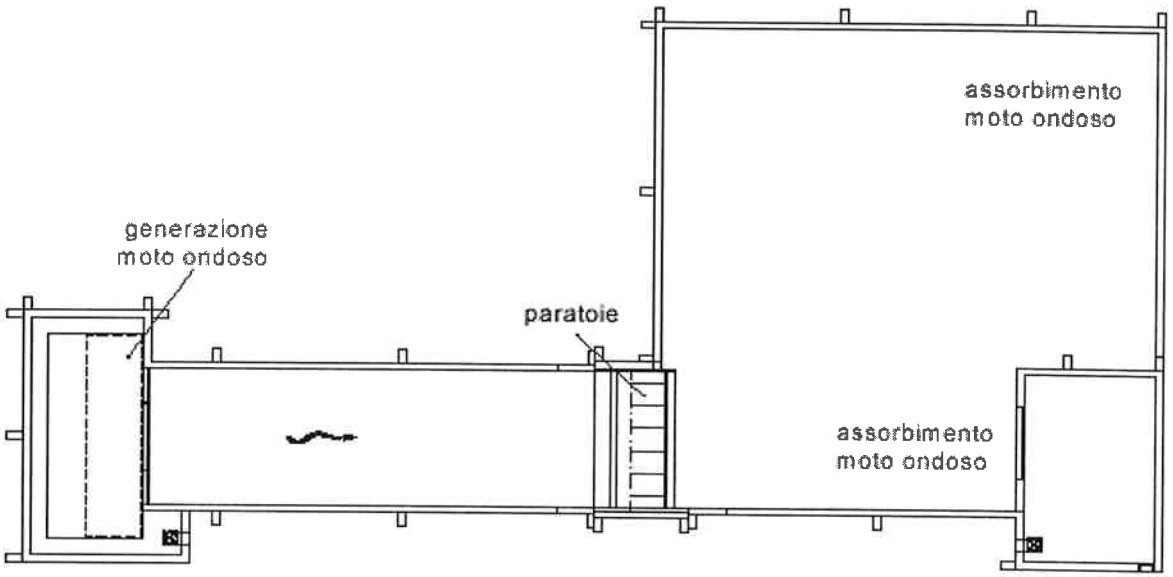


Fig. 3.1 Planimetria del modello fisico

3.2. Prove eseguite

Il programma delle attività ha previsto in una prima fase l'esecuzione di prove di oscillazione libera della schiera; in tali simulazioni le paratoie, inizialmente spostate dalla loro posizione di equilibrio secondo le posizioni che assumono nella forma modale di minor periodo della schiera (modo 1 o A di Fig. 3.2), vengono rilasciate libere di oscillare in moto smorzato sino al ritorno alla posizione iniziale.

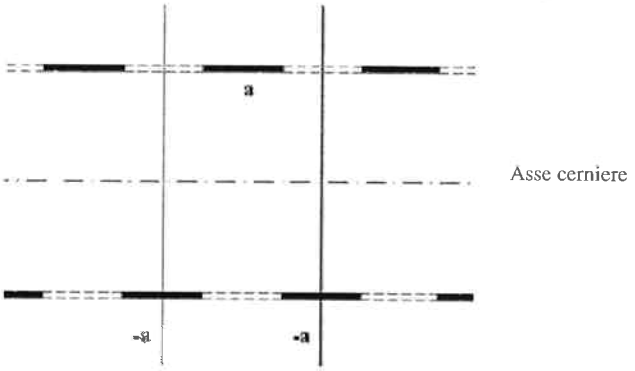


Fig. 3.2 Deformata modale corrispondente al modo 1 o modo A

Sono state eseguite 2 prove: la prima in condizioni di equilivello ai due lati delle paratoie, la seconda considerando un dislivello di marea pari ad 1.0 m. In entrambi i casi, sulla base delle registrazioni effettuate, si sono determinati i periodi propri di oscillazione della schiera di paratoie ed i rapporti di smorzamento.
Il periodo proprio del primo modo della schiera è risultato pari a 10.6 s in equilivello e 11.2 s nel caso di dislivello. Tali valori risultano in ottimo accordo con quelli noti dai precedenti studi effettuati in condizioni di canale indefinitamente lungo e non appaiono quindi significativamente influenzati dalla diversa condizione geometrica al contorno.

Successivamente sono state eseguite 16 prove di moto ondoso, le cui caratteristiche, concordate con il gruppo di ricerca del M.I.T, sono riassunte in Tab. 3.1.
Poiché lo spirito dello studio è quello di individuare le condizioni che maggiormente innescano il fenomeno della risonanza sincrona, si sono considerate essenzialmente prove (da n° 4 a 11 e da n°13 a 16) con onda regolare di 2.5m di altezza e con diversi valori del periodo (tra 9.0 e 13.0 s) in modo da comprendere il periodo di oscillazione della schiera relativo al modo A. Per fornire informazioni utilizzabili a livello progettuale è stata riprodotta anche una mareggiata reale asse-

gnando in generazione uno spettro caratterizzato da un periodo di picco pari a quello della monocromatica che ha eccitato il modo A.
Infine si sono considerate tre onde monocromatiche di caratteristiche analoghe a quelle in grado di suscitare risonanza subarmonica della schiera in condizioni di canale indefinitamente lungo (T=5.3-5.8 s).

Tab. 3.1 Caratteristiche delle prove di moto ondoso

N°	Nome prova	Livello mare	Livello laguna	H (m)	T (s)
1	Reg532000_30	0.6	0.6	2.0	5.3
2	Reg552000_30	0.6	0.6	2.0	5.5
3	Reg582000_30	0.6	0.6	2.0	5.8
4	Reg902500_30	0.6	0.6	2.5	9.0
5	Reg1002500_30	0.6	0.6	2.5	10.0
6	Reg1042500_30	0.6	0.6	2.5	10.4
7	Reg1062500_30	0.6	0.6	2.5	10.6
8	Reg1072500_30	0.6	0.6	2.5	10.7
9	Reg1102500_30	0.6	0.6	2.5	11.0
10	Reg1152500_30	0.6	0.6	2.5	11.5
11	Reg1302500_30	0.6	0.6	2.5	13.0
12	Irreg1042500_30 (spettro Jonswap con γ =3.3	0.6	0.6	2.5	10.4
13	Reg1102510_30	1.6	0.6	2.5	11.0
14	Reg1122510_30	1.6	0.6	2.5	11.2
15	Reg1132510_30	1.6	0.6	2.5	11.3
16	Reg1162510_30	1.6	0.6	2.5	11.6

3.3. Risultati ottenuti

La Fig. 3.3 sintetizza i risultati ottenuti nelle prove con onda monocromatica in termini di massime e minime posizioni angolari raggiunte nel corso della prova ed in termini di massime oscillazioni differenziali, cioè di massima apertura tra 2 paratoie contigue, in funzione del periodo dell'onda incidente.

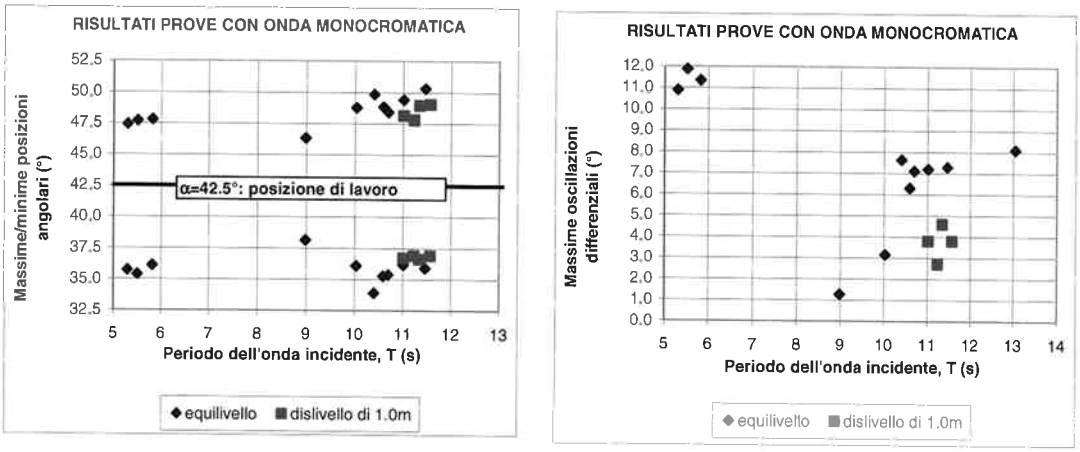


Fig. 3.3 Risultati delle prove con onda monocromatica in funzione del periodo dell'onda incidente: massime/minime posizioni angolari (sinistra), massime oscillazioni differenziali (destra)

Per quanto riguarda le prove con onde di periodo prossimo a quello del modo A si osserva che la massime oscillazioni assolute e differenziali sono state misurate in condizioni di equilivello nel caso di T=10.4 s. Il massimo scostamento dalla posizione di equilibrio non ha superato i ±9°, mentre la massima oscillazione differenziale è risultata pari a 8°. Il movimento della schiera è caratterizzato dallo stesso periodo dell'onda incidente ed è somma di un'oscillazione in cui tutte le paratoie si muovono in fase tra loro e dell'oscillazione caratteristica del modo A in cui le paratoie contigue si muovono in opposizione di fase.

Le prove con onde di periodo pari alla metà del periodo del modo A hanno evidenziato che la risonanza subarmonica può instaurarsi anche nella configurazione di laguna infinita: in tal caso il movimento delle paratoie è caratterizzato da un periodo pari al doppio di quello della forzante e le paratoie contigue si trovano in opposizione di fase. Il massimo scostamento dalla posizione di equilibrio non ha superato i ±7°, mentre la massima oscillazione differenziale è risultata pari a 12°, valore comunque inferiore a quello misurato nelle prove con canale infinitamente lungo.

Le due diverse modalità di movimento spiegano come mai nel caso di risposta sincrona si verificano le massime oscillazioni assolute, mentre nel caso di risposta subarmonica le massime oscillazioni differenziali. A titolo di esempio nelle Fig. 3.4 e Fig. 3.5 si riporta la posizione assunta da ciascuna paratoia nel corso di 2 prove in cui la schiera ha assunto una deformata corrispondente a quella del primo

modo proprio e quindi caratterizzata dal periodo $T_I \approx 11$ s, nell'istante t e nell'istante $t+T_I/2$, rispettivamente nel caso di onda incidente con periodo pari alla metà di T_I (Tinc=5.5s: risposta subarmonica di Fig. 3.4) e nel caso di onda incidente con periodo pari a T_I (Tinc=11.0 s: risposta sincrona di Fig. 3.5).

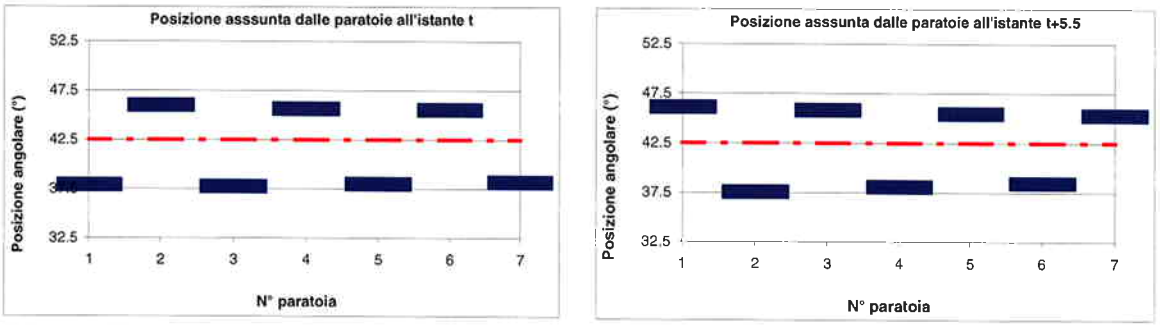


Fig. 3.4 Prova con onda regolare di periodo Tinc=5.5 s (=T_I/2): posizione delle paratoie all'istante t e all'istante t+ T_I/2

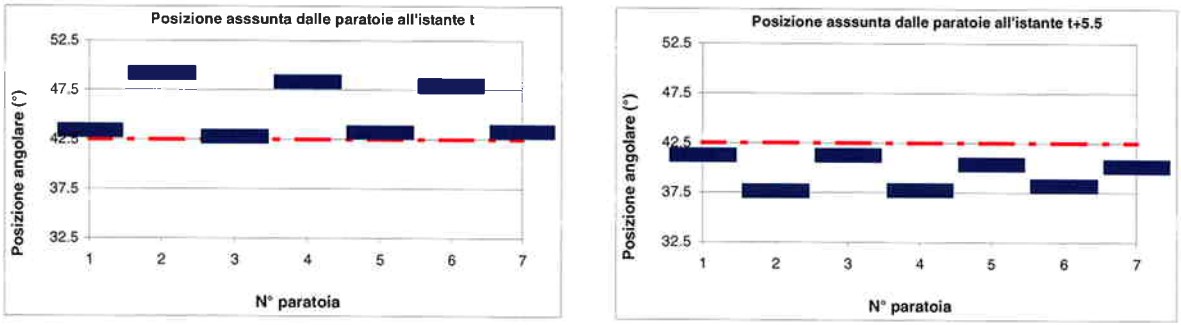


Fig. 3.5 Prova con onda regolare di periodo Tinc=11.0 s (=T_I): posizione delle paratoie all'istante t e all'istante t+ T_I/2

Infine la prova eseguita con onda irregolare ha confermato il corretto comportamento dinamico delle paratoie: le posizioni angolari massime e minime istantanee sono confrontabili con quelle misurate nella corrispondente prova con onda monocromatica, mentre l'oscillazione differenziale massima è risultata dell'ordine del 60%.

4. TEORIA DEI MODI PROPRI DI UNA SCHIERA DI PARATOIE

Prima di descrivere i risultati della teoria della risonanza sincrona dei modi propri delle paratoie di progetto, per completezza è opportuno richiamare le caratteristiche e la natura dei modi stessi.

4.1. I modi propri della schiera di paratoie

La recente teoria di Li e Mei modella l'intera gamma di modi propri che si possono instaurare in una schiera di paratoie galleggianti, quali quelle previste per la salvaguardia della Laguna di Venezia. Essa riprende ed estende la precedente teoria di Mei ed al del 1994 per il modo che si può instaurare in un canale sperimentale con due paratoie.

La teoria prevede due punti principali nella definizione di tali modi. Il primo è quello di definire i modi possibili in una schiera di larghezza infinita (leggi un numero infinito di paratoie), il secondo è quello di definire i modi possibili in una schiera di larghezza finita, cioè con un numero assegnato di paratoie. Nel passaggio dal primo al secondo punto la differenza è rimarchevole poiché nuovi modi divengono possibili: la teoria spiega così anche alcune peculiarità osservate sperimentalmente ma non correttamente interpretate nel corso delle prove.

Il concetto chiave nell'interpretazione delle forme modali è che, sia per la schiera infinita che per quella finita, le paratoie assumono una deformata che è la replica discontinua di una funzione sinusoidale (coseno). E' nella modalità di tale replica che si originano le differenze e le similitudini del caso della schiera di larghezza finita rispetto a quella infinita.

4.2. Modi propri di una schiera di larghezza infinita

Nel caso di schiera di paratoie di larghezza infinita i modi propri sono sempre e comunque una replica della deformata modale $\cos(\pi y / a)$, ove y è un asse orizzontale parallelo all'asse delle cerniere delle paratoie ed a è la semilunghezza della deformata modale. La replica della deformata modale in maniera discontinua

avviene imponendo che le aree sottese dal coseno e dalla sua replica con le paratoie siano le stesse. Fanno allora la differenza :

- il numero delle paratoie che ricadono in a
- l'intersezione delle rette $y = 0$ ed $y = a$ con la schiera

Maggiore è il numero di paratoie che concorrono a descrivere il $\cos(\pi y / a)$, "migliore" è la rappresentazione del coseno, maggiore è il periodo proprio del modo e minore è l'apertura fra paratoie contigue (vedi Fig. 4.1).

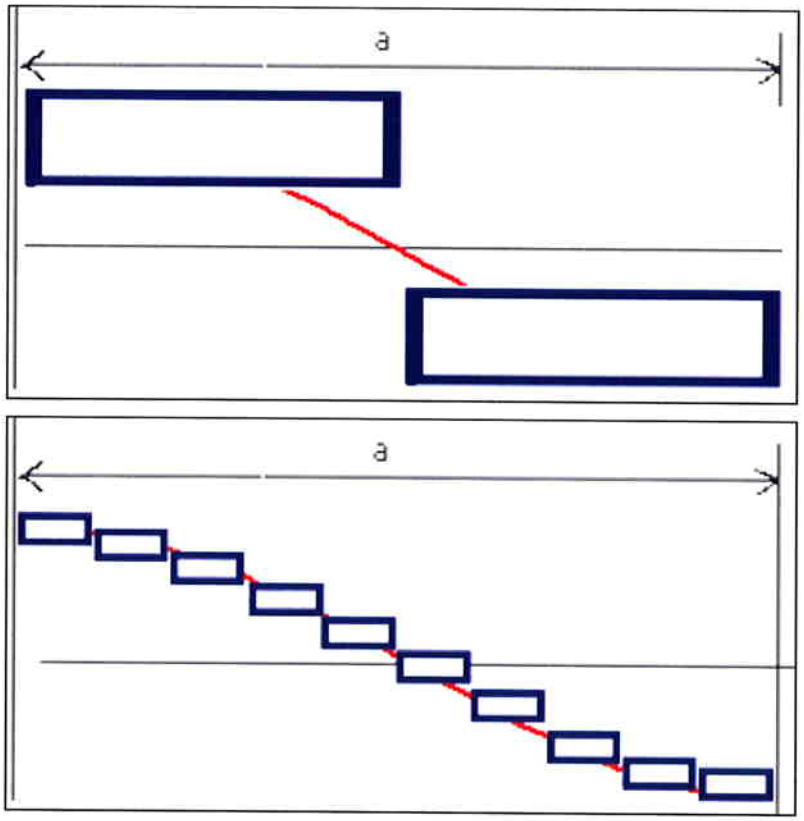


Fig. 4.1 Rappresentazione del cos(πy/a) ad "a" fissato

Viceversa, se le paratoie sono di larghezza assegnata, all'aumentare del numero di paratoie che descrivono il $\cos(\pi y / a)$ aumenta il valore della semilunghezza a; volgarizzando, quanto meglio si vuol descrivere il coseno tanto maggiore è la sua lunghezza (a larghezza paratoie assegnata), come illustrato in Fig. 4.2.

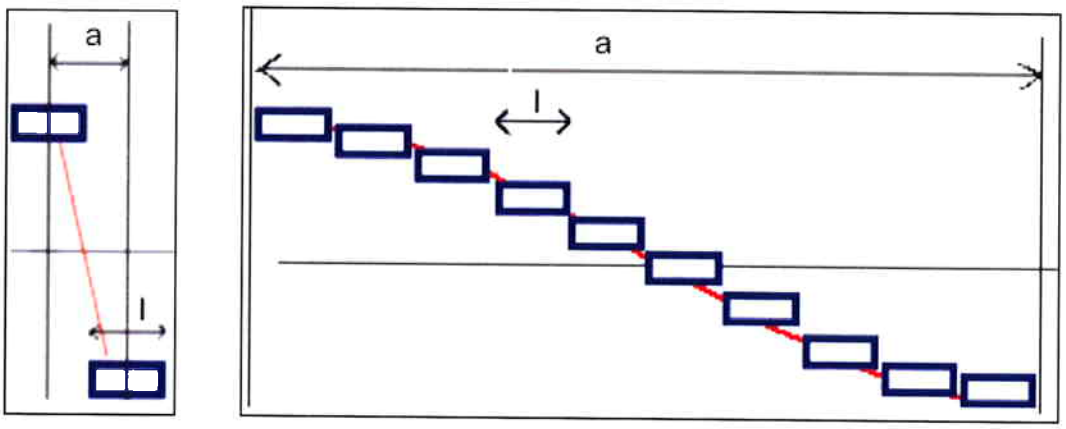


Fig. 4.2 Rappresentazione del cos(πy/a) a "larghezza fissata"

Le rette $y = 0$ ed $y = a$ ed possono ricadere o fra due paratoie contigue o tagliare una paratoia. Le modalità di intersezione sono indicate nella Fig. 4.3.

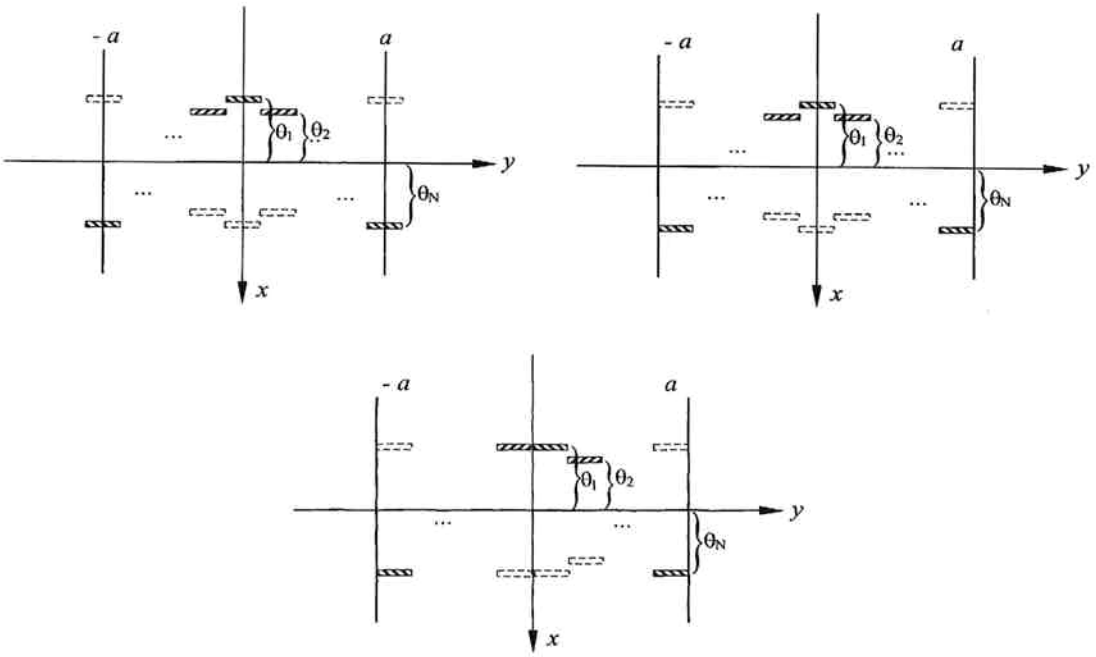


Fig. 4.3 Modalità di intersezione delle rette y=0 e y=a con le paratoie

Indicato con N il numero di paratoie compreso nella semilunghezza della generica deformata modale, il modo proprio corrispondente verrà indicato con M_{2N-1}.
Dunque i modi $M_1, M_2, M_3, \ldots$ riportati nelle figure del report di Li e Mei sono una rappresentazione via via migliore del $\cos(\pi y / a)$.

La semilunghezza a è quindi in primis una grandezza teorica. Nella progettazione di alcuni esperimenti è stata utilizzata come semiampiezza del canale sperimentale. Alcune volte si sono poi utilizzate mezze paratoie agli estremi della schiera per simulare quei modi per i quale $y = a$ biseca la paratoia.

Tuttavia nel momento stesso in cui si considera un canale sperimentale o lo stesso prototipo (cioè una schiera di larghezza finita) la dinamica si arricchisce.

4.3. Modi propri di una schiera di larghezza finita

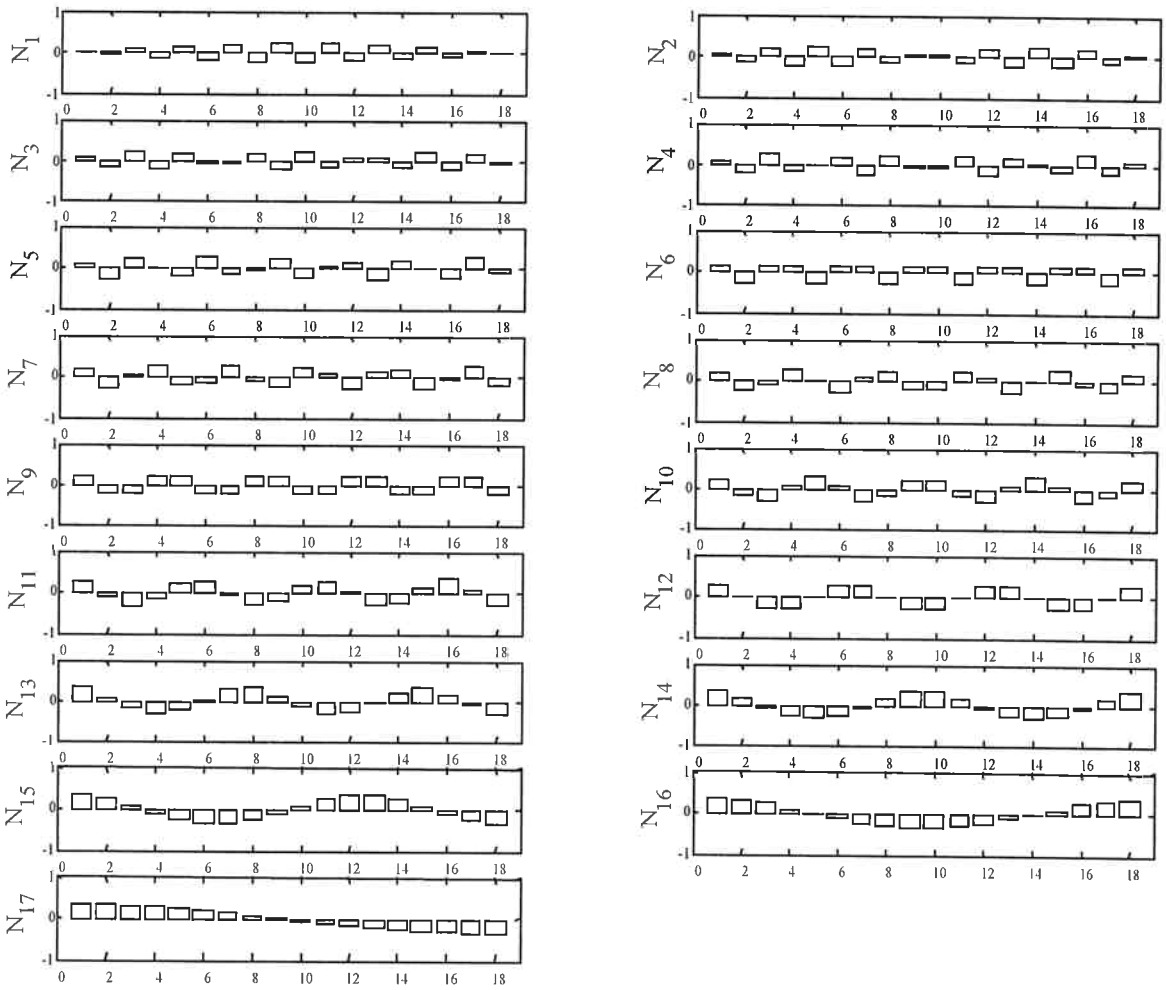
Come primo passo si ipotizzi di prendere un canale di larghezza proprio pari a $2a$, con il desiderio di replicare il modo di deformata $\cos(\pi y / a)$ con il numero di paratoie presenti nel canale. E' intuitivamente comprensibile come la presenza stessa delle pareti del canale impedisce tutti i modi in cui partecipa alla semilunghezza del modo una mezza paratoia, tranne i casi in cui tale mezza paratoia viene espressamente costruita. In questo modo ed in base alla teoria per una schiera di larghezza infinita si riesce però a spiegare/ realizzare solo un modo: il più lungo. Quello cioè che fa disporre le paratoie secondo $\cos(\pi y / a)$. Se si indica $L = 2a$ la larghezza del canale, si realizza cioè la sola deformata modale $\cos(2\pi y / L)$. Se si hanno M paratoie, si realizza il modo in cui le M paratoie si dispongono secondo e "meglio descrivono" $\cos(2\pi y / L)$.

In realtà nel canale sono possibili altri $M-2$ modi. Per giustificare questi altri $M-2$ modi bisogna considerare il fatto che le M paratoie possono rappresentare in modo discontinuo non solo $\cos(2\pi y / L)$ ma anche una deformata modale ancora più lunga quale $\cos(\pi y / L)$ e tutte le deformate modali di lunghezza inferiore quali $\cos(3\pi y / L)$, $\cos(4\pi y / L)$ fino a $\cos((M-1)\pi y / L)$. Tutti questi modi sono infatti compatibili con la condizione di assenza di radiazione (deformata media nulla etc) e possono rappresentare un modo intrappolato.

La "bontà" della rappresentazione delle $M-1$ deformate modali è tanto maggiore quanto maggiore è la lunghezza della deformata. Tutte le M paratoie devono "descrivere" infatti una sola semilunghezza d'onda per il $\cos(\pi y / L)$ (vedi ad esempio il modo N_{17} di Fig. 4.4), mentre devono essenzialmente distribuirsi prossime ai vertici quando devono descrivere il $\cos((M-1)\pi y / L)$, apparendo come in oppo-

sizione di fase (vedi ad esempio i modi N_1, N_2, N_3 della stessa figura). Dovendo rispettare la condizione di sottendere la stessa area $\cos((M-1)\pi y / L)$, le paratoie si dispongono in alcuni casi in posizioni frazionarie della lunghezza del modo risultando in una apparente "modulazione" dell'oscillazione modale (vedi ad esempio i su citati modi N_1, N_2, N_3). Si intuisce poi che se il numero di paratoie della schiera che descrivono una lunghezza d'onda ("gates per wavelength") è intero, questo modo corrisponde ad uno dei modi "teorici" della schiera infinita.

Fig. 4.4 Deformate modali per una schiera di 18 paratoie



Il risultato è che quello che nella letteratura tecnico-ingegneristica è noto sperimentalmente nei modelli 1/60 come modo A "sporco o localizzato" è una manifestazione dei modi a lunghezza minore $N_1, N_2, N_3, \ldots$ che hanno infatti le frequenze proprie molto prossime fra loro e possono essere facilmente eccitati anche da una monocromatica "ben centrata".

Dunque anche l'evidenza sperimentale dell'apparire di una certa modulazione lungo la schiera del modo A è spiegata teoricamente.

Per una deduzione rigorosa basata sulle equazioni della meccanica di quanto sopra descritto si rimanda ai report sdi Li e Mei. ("*Natural modes of mobile gates for Venice inlets" Part I: theory and numerical results (august 2002), Part III: eigenfrequencies and modal shapes for a 20-gates barrier in a channel (july 2003)*"

5. LA TEORIA DELLA RISONANZA SINCRONA DEI MODI PROPRI

Le deformazioni modali individuate dalla teoria di Li e Mei (2003) riassunta nel paragrafo precedente fanno riferimento ad una schiera di paratoie posta in un canale infinitamente lungo e possono essere eccitate in maniera non lineare attraverso la risonanza subarmonica. L'esistenza di tale tipo di risonanza è legata alla presenza di modi propri in cui l'energia resta intrappolata attorno alla schiera di paratoie proprio in virtù della presenza di pareti verticali ai lati del canale sia lato mare che lato laguna.

Quando invece si considera una geometria del tipo canale lato mare e bacino semi infinito ed aperto lato laguna, diviene possibile la propagazione radiale di energia nella laguna stessa. Il confinamento dell'energia attorno alla schiera diviene quindi imperfetto. In tale caso è allora possibile una risonanza sincrona, cioè una eccitazione del modo proprio tramite un'onda dello stesso periodo.

Le deformazioni modali di cui al paragrafo precedente valgono sia per il caso ideale semplificato di paratoie verticali che per quello reale delle paratoie inclinate. Dall'uno all'altro caso cambiano invece le relative frequenze e le modalità di calcolo. Infatti nel caso di paratoie verticali l'espressione del potenziale delle velocità del fluido e delle relative condizioni dinamiche sono esprimibili in forma analitica chiusa, mentre nel caso di paratoie inclinate (come nel prototipo) è necessario ricorrere a tecniche numeriche quali quella del metodo ibrido agli elementi finiti.
La funzione fondamentale del modello analitico derivato da Adamo e Mei per la configurazione semplificata è stata quella di permettere di tarare e verificare la correttezza del modello numerico sviluppato per le paratoie inclinate.
Infatti in tale geometria, pur se semplificata, è possibile una soluzione analitica e quindi un'analisi dell'influenza dei parametri fondamentali (frequenza e ampiezza dell'onda incidente, geometria del canale, caratteristiche geometriche ed inerziali della paratoia ecc..) sull'ampiezza della risposta angolare delle paratoie.
Nel rapporto intermedio B1 è presentata una discussione della dipendenza della risposta delle paratoie verticali dalla frequenza dell'onda incidente per una configurazione rappresentativa di quella di paratoie inclinate.
Nel rapporto intermedio B2 il modello analitico viene ripreso e discusso nell'ambito della taratura del modello numerico.

Nel quadro seguente è riassunto sinteticamente lo stato dell'arte delle teorie sulla dinamica modale delle paratoie sviluppate ad oggi. In grigio è evidenziato l'oggetto dello studio della risonanza sincrona

Definizione dei modi propri di una schiera	Teoria lineare di Mei et al (1994): Modi per 2 paratoie in un canale • Calcolo analitico delle frequenze proprie • Canale infinito Teoria lineare di Li e Mei (2003): Modi per una schiera infinita e finita di M paratoie • Canale infinito • Definizione analitica della deformata modale • Calcolo analitico delle frequenze proprie	Teoria lineare di Liao e Mei (2000): Modi per 2 paratoie in un canale • Estensione di Mei et al (1994): calcolo numerico delle frequenze proprie con il Metodo Ibrido agli Elementi Finiti (HFEM) Teoria lineare di Li e Mei (2003): Modi per una schiera infinita e finita di M paratoie (Report II) • Definizione analitica della deformata modale • Estensione Li e Mei (2003): calcolo numerico delle frequenze proprie con l'HFEM • Programma di calcolo fornito a CVN/ Technital
Risonanza Sincrona	Teoria lineare di Adamo e Mei (2004): Risonanza dei modi per una schiera finita (Rapporto B1) • Rappresentazione analitica dei potenziali della velocità del fluido • Calcolo analitico dei diagrammi di risposta angolare delle paratoie • Canale semi infinito – laguna 2D	Teoria lineare di Li e Mei (2004): Risonanza dei modi per una schiera finita (Rapporto B2) • Rappresentazione numerica dei potenziali della velocità del fluido (HFEM) • Calcolo analitico/ numerico dei diagrammi di risposta angolare delle paratoie • Canale semi infinito – laguna 2D • Programma di calcolo fornito a CVN/Technital (Rapporto BF)
Risonanza Subarmonica	Teoria nonlineare di Sammarco et al (1997): Risonanza dei modi per 2 paratoie in un canale • Rappresentazione analitica dei potenziali della velocità del fluido • Calcolo analitico dei diagrammi di risposta angolare delle paratoie • Analisi risposta onda bicromatica • Canale infinito	

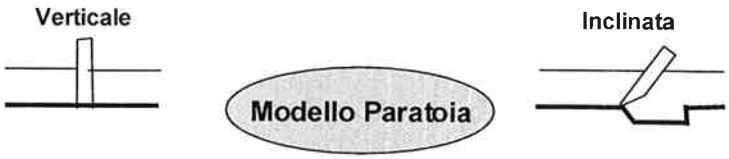


Fig. 5.1 Stato dell'arte delle teorie sulla dinamica modale delle paratoie

5.1. Il modello analitico per la configurazione semplificata di paratoie verticali (Rapporto intermedio B1)

Di seguito viene analizzato e commentato ognuno dei paragrafi del Report.

5.1.1. Chapter 2 - Formulation for single frequency response

Viene introdotto il dominio di calcolo riassunto nello schema grafico di Fig. 5.2.

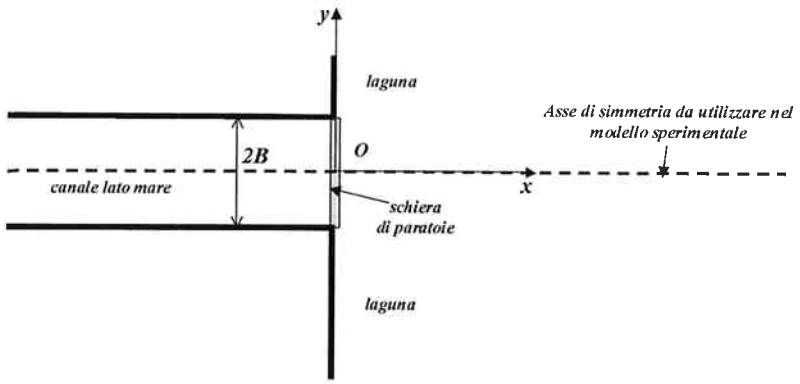


Fig. 5.2 Schematizzazione del sistema canale-laguna-schiera di paratoie

Le paratoie sono verticali. Il potenziale delle velocità del fluido viene diviso in due parti in virtù della linearità dello schema

1. Scattering potential: è quello relativo all'onda incidente dall'Adriatico e riflessa dalle paratoie; è presente solo nel canale.
2. Radiation potential: è il potenziale delle onde radiate dalle paratoie in moto; è presente sia nel canale che nella laguna.

Vengono definite le equazioni del moto e le condizioni al contorno.

Il potenziale di scattering di cui al punto 1 è la forzante (momento delle forze esterne), mentre il potenziale di cui al punto 2 è parte della risposta (inerzia aggiunte e smorzamento per radiazione). Essi vengono "cuciti" dalle equazioni del moto (equilibrio dinamico alla rotazione) per tutte le singole paratoie. In particolare, vengono calcolati (i) il momento del potenziale di scattering (integrazione sulla superficie delle paratoie) che rappresenta il momento forzante (diffraction torque) e (ii) il momento del potenziale di radiazione (integrazione sulla superficie delle paratoie), esplicitando il momento che si esercita sulla paratoia generica β al seguito del moto della paratoia generica α : la parte immaginaria fornisce l'inerzia aggiunta mentre la parte reale lo smorzamento dovuto alla radiazione di onde (la

paratoia nel suo moto emette appunto delle onde). L'equazione del moto della generica paratoia β richiede l'integrazione dei potenziali di radiazione di *tutte* le rimanenti paratoie della schiera (reaction torque).

5.1.2. Chapter 3 - Radiation potential and reaction torques

Viene risolto il problema del potenziale di radiazione per la geometria in esame.
Prima dal lato del canale (Adriatic side): poiché il dominio è rettangolare (paratoia e lati del canale verticali), il problema è risolvibile con il metodo della separazione delle variabili ed il potenziale è quindi esprimibile in serie di autofunzioni di una sola delle coordinate geometriche (x, y, z). Vengono esplicitati i termini relativi ad un'onda propagantesi verso l'Adriatico (a cui è associato il radiation damping) e i termini evanescenti locali (a cui è associata l'inerzia aggiunta).
Successivamente dal lato laguna: il dominio è semicircolare, ma il problema è ancora risovibile con la separazione delle variabili, stavolta in coordinate polari; ne consegue una maggiore complessità formale (funzioni di Hankel invece di esponenziali) ma sostanzialmente lo sviluppo in serie del potenziale dal lato laguna consiste ancora di onde propagatorie verso la laguna (a cui è associato il radiation damping) e i termini evanescenti locali (a cui è associata l'inerzia aggiunta).
Viene poi data l'espressione del momento forzante dato dall'onda incidente. Poiché trattasi di onda progressiva che incide su una parete verticale (paratoia) l'espressione del potenziale è quella semplice dell'onda stazionaria. L'integrazione sulla superficie della paratoia stessa ne fornisce il momento, espresso quindi da una semplice formula monomia.
Vengono poi calcolati i momenti del potenziale di radiazione integrando sulle due superfici della paratoia (Adriatico e laguna) le rispettive espressioni del potenziale di radiazione. Ne consegue una formulazione analitica esplicita, in forma di sviluppo in serie.

5.1.3. Chapter 4 - General identities

Utilizzando il teorema di Green e le equazioni che governano i potenziali di radiazione e diffrazione, vengono dedotte identità di validità generale, utili per la verifica della correttezza delle soluzioni trovate. Vengono messe in evidenza solo quelle con rilevanza applicativa.

Una prima proprietà generale è che i coefficienti di inerzia aggiunta e di smorzamento sono simmetrici; fisicamente ciò significa che l'azione idrodinamica indotta sulla paratoia generica β a seguito del moto della paratoia generica α è uguale all'azione sulla paratoia α a seguito del moto della paratoia β (simile al principio di reciprocità della scienza delle costruzioni).

La seconda è il cosiddetto teorema di Haskind, che fornisce una relazione tra il momento forzante dovuto al potenziale di diffrazione (onda incidente) sulla generica paratoia α e l'onda di radiazione dovuta al moto della stessa. Nel presente caso di paratoia verticale, le due espressioni sono esplicite e quindi la relazione può essere verificata simbolicamente. Il teorema acquista una rilevanza fondamentale nel caso di paratoia inclinata, quando le espressioni divengono numeriche e l'uguaglianza conseguentemente può essere verificata solo in modo numerico, il teorema di Green assicura la conservazione dell'energia. In particolare si dimostra che la potenza fornita dall'onda incidente (diffraction potential) è pari alla potenza irradiata verso l'Adriatico e verso la laguna dal moto delle paratoie. Viene fornita una espressione analitica di tale principio.

5.1.4. Chapter 5 - Numerical Results

Vengono presentati i risultati della teoria per una schiera di 20 paratoie verticali le cui caratteristiche inerziali sono prossime a quelle delle paratoie di Chioggia. Poiché, pur essendo analitiche, le espressioni contengono sommatorie multiple di infiniti termini, sono introdotti e presentati alcuni criteri numerici di stima dell'errore, che si dimostra essere sempre prossimo a zero.

Il grafico principale della massima ampiezza delle oscillazioni al variare del periodo dell'onda incidente viene presentato e discusso (Fig. 5.3). Ad ognuno dei picchi di tale grafico corrisponde l'eccitazione sincrona di uno dei modi propri della schiera. Ciò è verificato dal fatto che l'andamento delle ampiezze dell'oscillazione delle diverse paratoie riproduce i diversi modi della teoria di Li e Mei e che il picco di risonanza avviene proprio in corrispondenza della frequenza teorica del modo riprodotto. I modi che si ritrovano sono tutti i modi pari rispetto alla mezzeria del canale (N2, N4, N6,..., N18) : ciò è conseguenza della simmetria della forzante e della scelta di uno sviluppo in serie dei potenziali intrinsecamente pari (funzioni coseno).

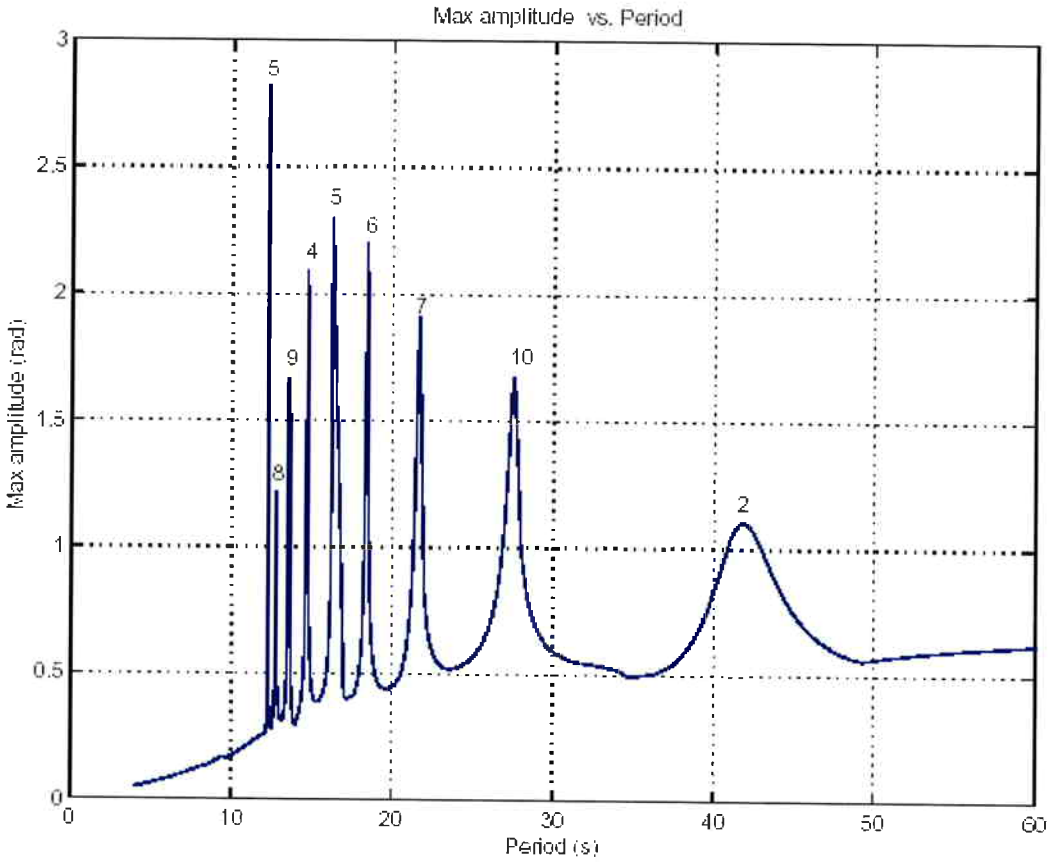


Fig. 5.3 Massima ampiezza dell'oscillazione delle paratoie in funzione del periodo dell'onda incidente. Il numero in corrispondenza dei picchi indica la paratoia che ha raggiunto il maggior spostamento.

Vengono discussi gli andamenti in funzione della frequenza dei coefficienti di smorzamento e di inerzia aggiunta e discusse le discontinuità nella soluzione al variare del numero di onde radianti verso l'Adriatico e la laguna al variare della frequenza. Tale discussione ha il necessario carattere di completezza matematica nella descrizione di una soluzione ingegneristica.

5.2. Modello numerico per paratoie inclinate e fondale reale (Rapporto intermedio B2 e rapporto finale BF)

L'estensione alle batimetrie reali ed alla reale configurazione del canale e della laguna e geometria delle paratoie è stata effettuata facendo ricorso al metodo ibrido agli elementi finiti. Infatti pur se le equazioni e la tipologia delle condizioni al contorno restano le stesse della geometria ideale delle paratoie verticali (quindi

simile è da aspettarsi la natura della risposta del sistema), la complessità del dominio non rende possibile una soluzione analitica in forma chiusa.
Con il modello elaborato ed il codice di calcolo consegnato dal gruppo di ricerca del MIT è ora possibile verificare l'entità del fenomeno per tutte le configurazioni reali di progetto (fondali, caratteristiche delle paratoie,ecc..) delle bocche, investigando tutte le frequenze dell'onda incidente climatologicamente rilevanti.
Il modello basato sul metodo ibrido agli elementi finiti è di tipo tridimensionale (3D) per poter rappresentare la parte lagunare del dominio e la fisica tridimensionale della radiazione-attenuazione di energia.
Il modello si articola nel seguente modo

- A distanza sufficiente dalle paratoie e dalle irregolarità del fondo si utilizzano sviluppi analitici in serie.
- Tutta la zona di irregolarità del fondo (leggi cassoni di alloggiamento delle paratoie) e di non verticalità del dominio (leggi contorno inclinato delle paratoie) viene discretizzata con elementi finiti.
- I valori dei diversi potenziali di diffrazione e radiazione nei nodi di discretizzazione del dominio prossimo alle paratoie ed i coefficienti degli sviluppi in serie vengono determinati assieme risolvendo il sistema algebrico che si ottiene dalla condizione di minimizzazione della forma variazionale debole specifica del problema ed equivalente alla soluzione del problema stesso; questo ultimo passo è simile a tutte le procedure ad elementi finiti utilizzate nella soluzione dei problemi di meccanica del continuo.
- I valori dei potenziali così calcolati vengono utilizzati nelle equazioni del moto delle paratoie (forzante, inerzia aggiunta e smorzamento) per ricavare l'ampiezza dell'oscillazione angolare.

Il gruppo di ricerca ha simulato le seguenti configurazioni:

- Modello 1/30 con sette paratoie (½+ 5 + ½) approntato presso il centro sperimentale di Voltabarozzo.
- Prototipo della bocca di Chioggia, ma con 20 elementi.

Di seguito viene analizzato e commentato ognuno dei paragrafi del Report B2.

5.2.1. Chapter 2 - Mathematical Formulation

Il dominio di calcolo è quello schematizzato in Fig. 5.2.

Le paratoie sono inclinate e la geometria del loro alloggiamento inclusa. Il potenziale delle velocità del fluido viene diviso in due parti in virtù della linearità dello schema

1. Diffraction potential: è quello relativo all'onda incidente dall'Adriatico e riflessa dalle paratoie; è presente solo nel canale.
2. Radiation potential: è il potenziale delle onde radiate dalle paratoie in moto; è presente sia nel canale che nella laguna.

Vengono definite le equazioni del moto e le condizioni al contorno.

La logica è che il potenziale di diffrazione 1 è la forzante (momento delle forze esterne), mentre il potenziale 2 è parte della risposta (massa aggiunte e smorzamento per radiazione). Essi vengono "cuciti" dalle equazioni del moto per tutte le singole paratoie.

Rispetto al caso di paratoia verticale, le condizioni al contorno sulla paratoia e sul loro alloggiamento non sono più esprimibili su superfici verticali semplici, conseguentemente nella zona prossima alle barriere non è possibile applicare la separazione delle variabili ed esprimere la soluzione in serie di autofunzioni. Viceversa, lontano dalla barriera ove si è ormai in un dominio regolare la soluzione può essere espressa tramite una serie analitica, ma a coefficienti non ancora determinati. Questo approccio viene articolato nel proseguo del report.

5.2.2. Chapter 3 - Series solutions in the far fields

Vengono definite le espressioni analitiche dei potenziali 1 e 2 di cui sopra nelle zone lontano dalla schiera delle paratoie, nel canale e nella laguna rispettivamente, ove valgono gli opportuni sviluppi in serie analitiche. Tali serie hanno la stessa forma di quelle determinate nel caso di paratoia verticale, ma sono formalmente espresse con coefficienti non determinati (vedi nel proseguo la loro determinazione).

5.2.3. Chapter 4 - Hybrid Finite Element Method

Tutto il dominio attorno alle paratoie viene discretizzato in elementi finiti e il problema differenziale con condizioni al contorno assegnate BVP (cioè il moto accoppiato paratoie-fluido) viene ridefinito in termini di un principio variazionale

equivalente. La soluzione discreta viene imposta uguale allo sviluppo in serie del *Chapter 3* lungo il contorno di separazione fra i rispettivi domini di validità. La soluzione del conseguente complesso sistema di equazioni lineari fornisce in estrema sintesi il potenziale nei nodi di discretizzazione e i coefficienti degli sviluppi in serie. La procedura viene effettuata sia per il potenziale di diffrazione che per tutti i potenziali di radiazione, dotati di forme variazionali e conseguenti sistemi algebrici diversi.

Successivamente il potenziale viene integrato sulla superficie delle paratoie per fornire i momenti delle onde incidenti e i coefficienti di inerzia aggiunta e smorzamento: la soluzione delle equazioni del moto fornisce poi l'ampiezza e la fase del moto delle paratoie per ognuna delle frequenze individuate.

5.2.4. Chapter 5 - Validation for vertical gates

La procedura viene applicata al caso delle paratoie verticali. In tal modo si verifica la correttezza della procedura confrontando i risultati con la teoria analitica. Il confronto illustrato in Fig. 5.4 (tratto continuo: metodo ibrido elementi finiti, puntini: soluzione analitica) è eccellente. Si osserva che la teoria analitica di Adamo e Mei di confronto è intrinsecamente corretta in virtù della ulteriore verifica che si ottiene dal rispetto dei teoremi di conservazione dell'energia.

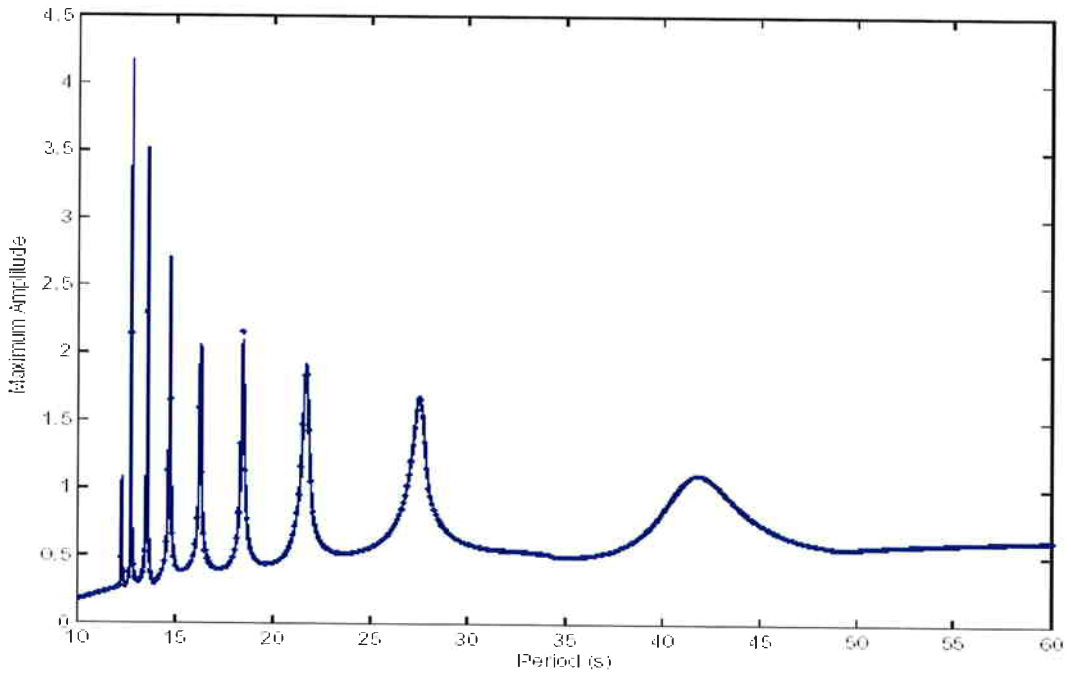


Fig. 5.4 Confronto tra soluzione analitica (puntini) e numerica (tratto continuo)

Tali teoremi sono stati illustrati nel report B1, capitolo 4, e vengono ripresi e particolarizzati in *Appendix A* del presente report. Essi vengono rispettati nella loro forma numerica e analitica rispettivamente dalla soluzione HFEM e da quella analitica. Il doppio controllo incrociato è dunque una verifica della correttezza della procedura indipendente dal confronto con i dati sperimentali.

5.2.5. Chapter 6 - Inclined gates

Viene dapprima riprodotta la configurazione degli esperimenti in scala 1/30 realizzata presso il centro sperimentale di Voltabarozzo. Vengono riprodotte le onde monocromatiche realizzate negli esperimenti e calcolata la risposta angolare. Il confronto, illustrato in Fig. 5.5 è molto soddisfacente. Non vengono rilevati numericamente picchi di risonanza, in accordo con le osservazioni sperimentali. Estendendo la simulazione numerica a periodi d'onda maggiori (sino a 22 s) si rilevano 3 picchi di risonanza ,essi cadono in corrispondenza di frequenze maggiori rispetto alle frequenze proprie calcolate secondo la teoria di Li e Mei.

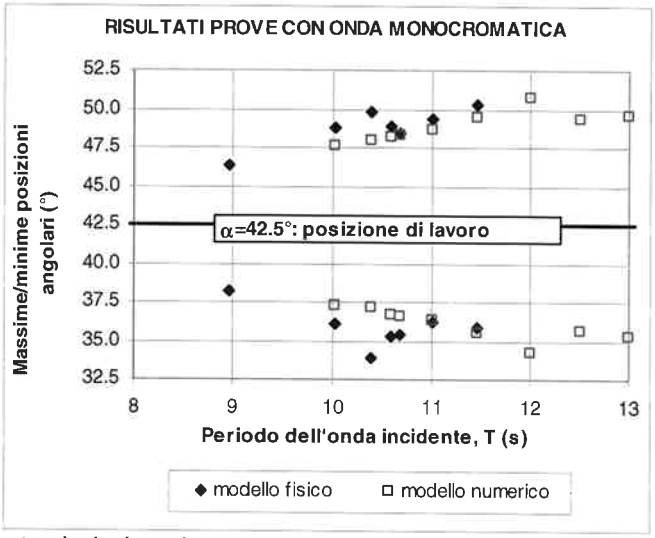


Fig. 5.5 Confronto tra risultati sperimentali e modello numerico

Successivamente viene calcolata la risposta di una schiera di 20 paratoie con le caratteristiche inerziali e di galleggiamento del modulo di Chioggia. Vengono determinati i picchi di risonanza e le deformate modali dei primi modi e con successo confrontate con le deformate modali della teoria lineare di Li e Mei, pur essendo caratterizzate da periodi maggiori.

Non sono verificate altre configurazioni, ma viene fornito il codice di calcolo con il quale effettuare le desiderate simulazioni.

6. CONCLUSIONI

Il presente studio teorico-sperimentale B.6.66 ha esplorato in maniera esaustiva il meccanismo della risonanza sincrona dei modi propri delle schiere di paratoie delle bocche di porto.

Lo studio ha fornito risposte ai seguenti due quesiti fondamentali

1. E' possibile che un'onda di periodo prossimo a quello di un modo proprio della schiera possa eccitare il modo stesso?
2. Se si, quale è l'efficacia del meccanismo di risonanza e quale il fattore di amplificazione?

Per rispondere a tali quesiti è stata sviluppata una teoria lineare analitica per il caso di paratoia verticale, estesa poi al caso di paratoia inclinata e fondale reale. La teoria (nella sua estensione al prototipo ed al modello) è stata poi confrontata con gli esiti delle attività sperimentali.

Per quanto concerne il quesito 1 la risposta è affermativa. Risolvendo le equazioni del moto linearizzate della paratoia e del fluido si ottiene un diagramma di risposta che mostra un'amplificazione significativa dell'ampiezza della risposta angolare della paratoia quando la forzante onda monocromatica ha una frequenza prossima ad una delle frequenze proprie della schiera. Non solo, la deformata della schiera segue la deformata teorica del modo individuata dalla teoria precedente di Li e Mei.

Tuttavia il meccanismo di risonanza, sempre dal punto di vista teorico, non è efficace (quesito numero 2): a fronte di un'ampiezza elevata della risposta, la larghezza in frequenza di ognuno dei picchi è significativamente limitata, vale a dire strettissimi intervalli in cui la risonanza si può manifestare. Questo si traduce nella realtà in una difficoltà intrinseca nell'eccitare il modo in modalità sincrona.

Una ulteriore conferma di tale difficoltà reale di eccitazione viene fornita dal gruppo sempre da un punto di vista teorico. Infatti, pur se non previsto dal disciplinare, il gruppo di ricerca del MIT ha affrontato il problema della risposta ad uno spettro di moto ondoso a banda larga. In base alla teoria della risposta dei sistemi lineari, si è osservato come il contributo dei picchi di risonanza alla varianza dell'oscillazione (e quindi all'ampiezza significativa e massima) sia bassissimo, proprio in virtù della piccolezza delle bande di risonanza. Non solo, tutti i modi propri delle quattro schiere di paratoie

alle bocche di porto hanno periodi propri superiori ai 10 secondi (fino anche ai 30 secondi per i modi più "lunghi"): in tale intervallo di frequenze gli spettri rappresentativi del clima al largo della laguna veneta hanno un basso contenuto energetico.
Dunque si può sicuramente affermare che il meccanismo di risonanza sincrona è molto meno efficace di quello della risonanza subarmonica, già riconosciuto essere tale da non compromettere in alcun caso la stabilità e l'operatività delle schiere.

Passando all'evidenza sperimentale, le risposte ai quesiti 1 e 2 e le relative deduzioni vengono confermate. Nelle prove di oscillazione forzata con onda monocromatica si osserva si l'oscillazione modale del modo M1, ma con una ampiezza sempre limitata (stavolta si hanno anche le dissipazioni di tipo viscoso non incluse nel modello teorico) e confrontabile con la componente di moto in cui tutte le paratoie oscillano in fase con la cresta delle monocromatica.
Si evince inoltre che l'oscillazione angolare relativa fra paratoie contigue in seguito a fenomeni di risonanza sincrona non è mai tale da indurre un'apertura dei traferri.

7. CONGRUENZA CON GLI OBIETTIVI DEL DISCIPLINARE TECNICO

Si rileva che tutti gli obiettivi specificati nel disciplinare tecnico sono stati conseguiti. In particolare nei seguenti quadri si delineano i principali elementi disciplinati e l'avvenuto conseguimento di essi.

ATTIVITA' SPERIMENTALI		
Elemento del Disciplinare Tecnico	**Conseguito**	
	SI	**NO**
Riproduzione in scala 1/30 del canale di accesso e della condizione di laguna semi infinita tramite apertura della vasca e approntamento di pareti assorbenti.	√	
Prove di oscillazione libera del modo A	√	
Prove di oscillazione forzata	√	
Report A1: apparato sperimentale, prove eseguite e risultati ottenuti	√	

ATTIVITA' ANALITICO – NUMERICHE		
Elemento del Disciplinare Tecnico	**Conseguito**	
	SI	**NO**
Modello analitico per paratoie verticali	√	
Modello numerico per paratoie inclinate	√	
➢ Confronto con soluzione analitica paratoia verticale per taratura modello	√	
➢ Confronto con risultati modello scala 1/30	√	
➢ Simulazione configurazione prototipo bocche	√	
Report B1: teoria paratoie verticali	√	
Report B2: analisi modello numerico, confronto con risultati sperimentali, risultati della simulazione del prototipo	√	
Report BF: sintesi delle attività svolte	√	