

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

**MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI
MAGISTRATO ALLE ACQUE**


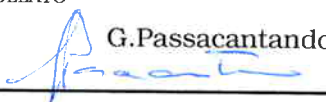

**NUOVI INTERVENTI PER LA SALVAGUARDIA
DI VENEZIA**

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


CONSORZIO VENEZIA NUOVA

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

	Rev.	Data	EI. MV038C- ST - RF0001	Pag. n. 2
	Rev.CO	Data 30/11/2004	Studio della risonanza sincrona dei modi propri della schiera di paratoie	

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

	Rev.	Data	EI. MV038C- ST - RF0001	Pag. n. 3
	Rev.C0	Data 30/11/2004	Studio della risonanza sincrona dei modi propri della schiera di paratoie	

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.

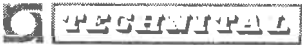
La Commissione degli esperti internazionali (1998), in merito alle oscillazioni fuori fase delle paratoie e al conseguente rischio di riduzione di efficacia della schiera di paratoie in termini di tenuta idraulica, ha espresso il parere che dovessero essere condotti ulteriori studi sperimentali e teorici.

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

	Rev.	Data	El. MV038C– ST – RF0001	Pag. n. 4
	Rev.C0	Data 30/11/2004	Studio della risonanza sincrona dei modi propri della schiera di paratoie	

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.

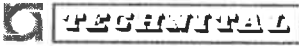
Tuttavia la possibilità di una risonanza sincrona del modo proprio non va esclusa e merita di essere investigata. A tal proposito si rammenta che le precedenti teorie si sono focalizzate sul fenomeno della risonanza subarmonica che si era manifestato in modo significativo nelle prove eseguite in un canale 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.

	Rev.	Data	El. MV038C- ST - RF0001	Pag. n. 5
	Rev.C0	Data 30/11/2004	Studio della risonanza sincrona dei modi propri della schiera di 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.

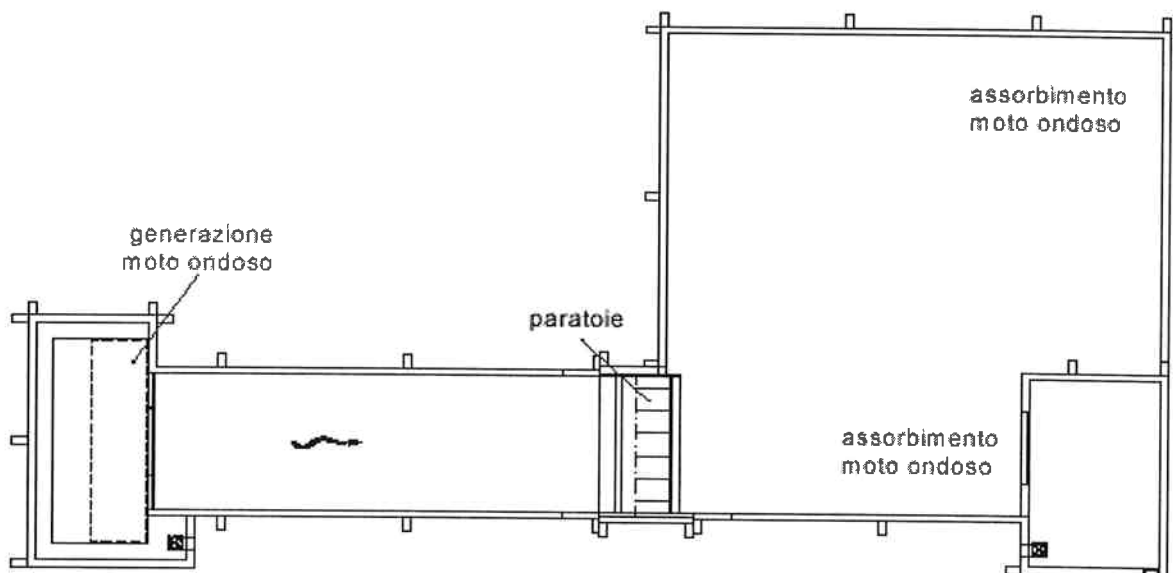
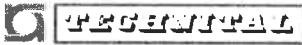


Fig. 3.1 Planimetria del modello fisico

	Rev.	Data	El. MV038C- ST - RF0001	Pag. n. 6
	Rev.C0	Data 30/11/2004	Studio della risonanza sincrona dei modi propri della schiera di paratoie	

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.

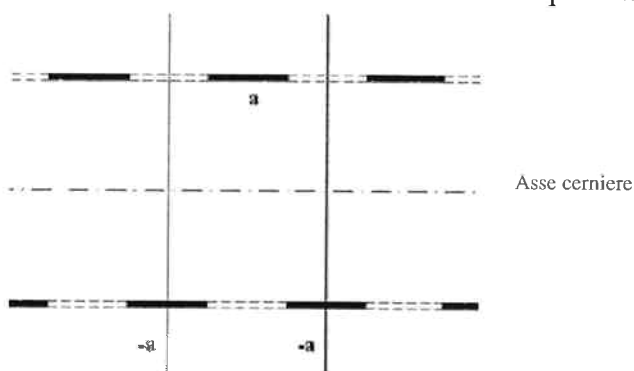


Fig. 3.2 Deformata modale corrispondente al modo 1 o modo A

Sono state eseguite 2 prove: la prima in condizioni di equivello 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 equivello 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 $\gamma=3.3$)	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.

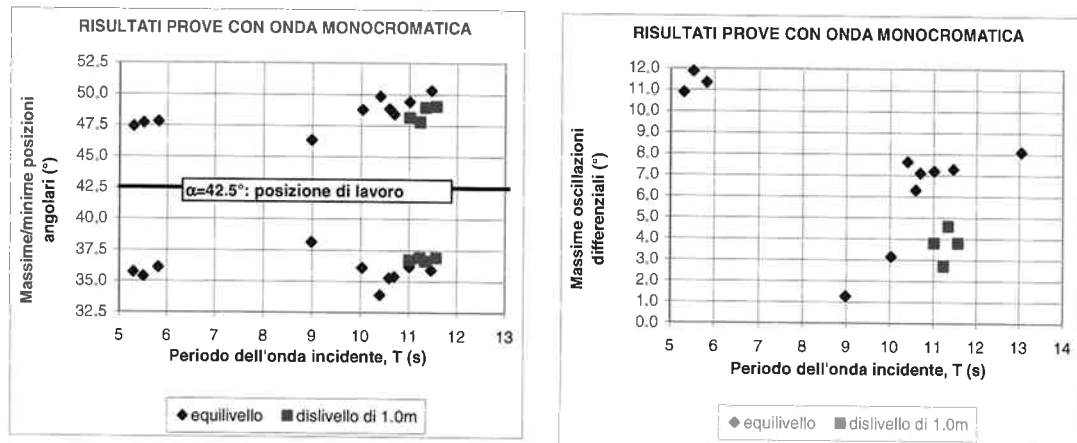


Fig. 3.3 Risultati delle prove con onda monocromatica in funzione del periodo dell'onda incidente: massime/minime posizioni angolari (sinistra), massime oscillazioni differenziali (destra)

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 $\pm 9^\circ$, 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 $\pm 7^\circ$, 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

	Rev.	Data	El. MV038C– ST – RF0001	Pag. n. 9
	Rev.C0	Data 30/11/2004	Studio della risonanza sincrona dei modi propri della schiera di paratoie	

modo proprio e quindi caratterizzata dal periodo $T_1 \approx 11$ s, nell'istante t e nell'istante $t+T_1/2$, rispettivamente nel caso di onda incidente con periodo pari alla metà di T_1 ($T_{inc}=5.5$ s: risposta subarmonica di Fig. 3.4) e nel caso di onda incidente con periodo pari a T_1 ($T_{inc}=11.0$ s: risposta sincrona di Fig. 3.5).

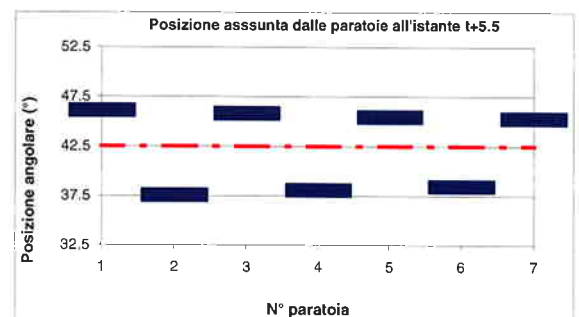
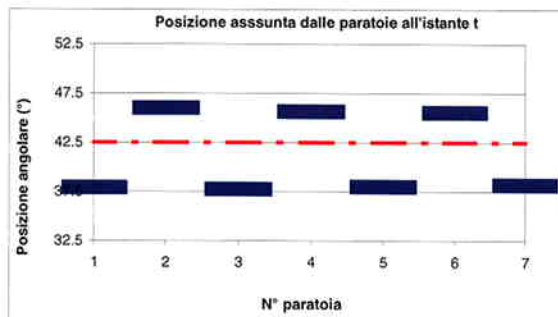


Fig. 3.4 Prova con onda regolare di periodo $T_{inc}=5.5$ s ($=T_1/2$): posizione delle paratoie all'istante t e all'istante $t+ T_1/2$

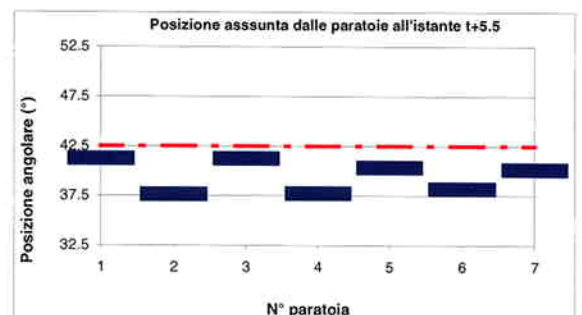
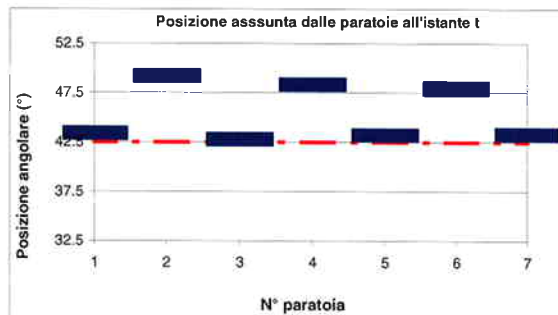
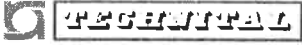


Fig. 3.5 Prova con onda regolare di periodo $T_{inc}=11.0$ s ($=T_1$): posizione delle paratoie all'istante t e all'istante $t+ T_1/2$

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%.

	Rev.	Data	EI. MV038C- ST - RF0001	Pag. n. 10
	Rev.C0	Data 30/11/2004	Studio della risonanza sincrona dei modi propri della schiera di paratoie	

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

	Rev.	Data	El. MV038C– ST – RF0001	Pag. n. 11
	Rev.C0	Data 30/11/2004	Studio della risonanza sincrona dei modi propri della schiera di paratoie	

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).

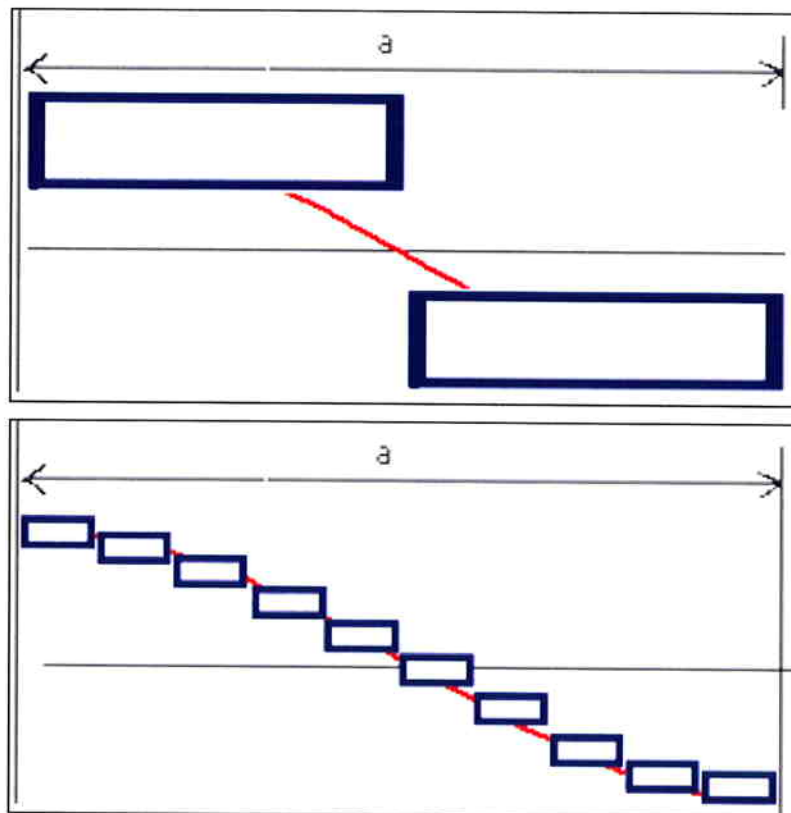


Fig. 4.1 Rappresentazione del $\cos(\pi y/a)$ ad “a” fissato

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.

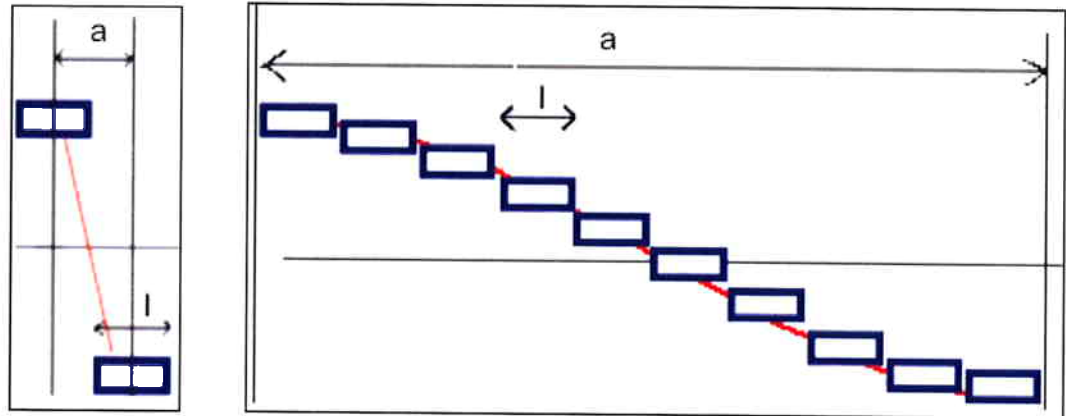


Fig. 4.2 Rappresentazione del $\cos(\pi y/a)$ a "larghezza fissata"

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.

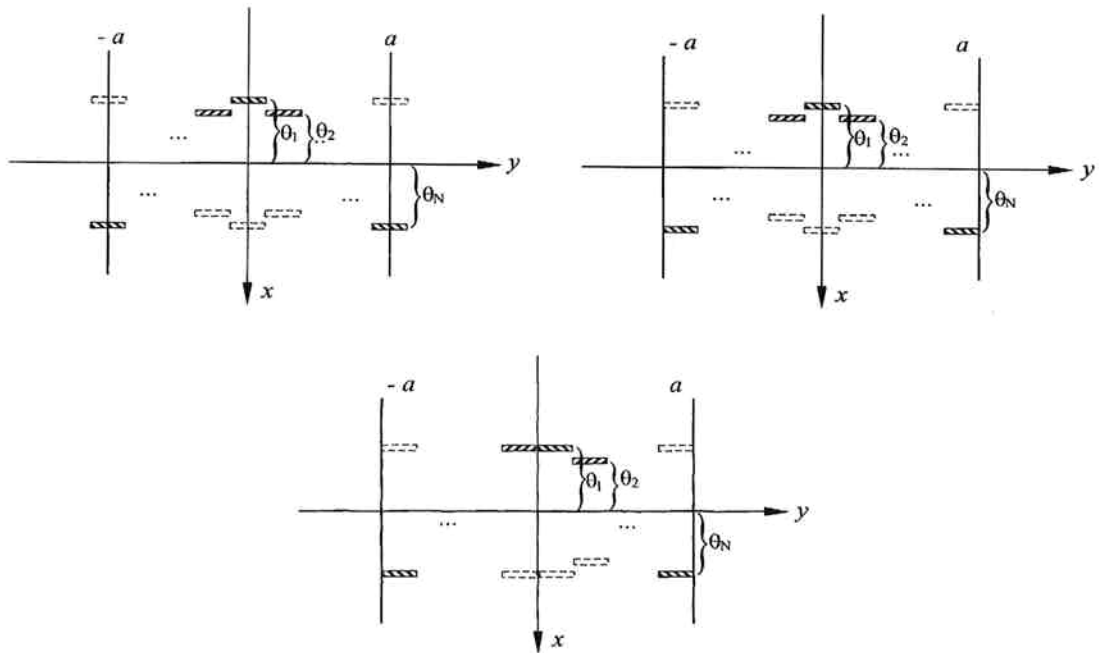


Fig. 4.3 Modalità di intersezione delle rette $y=0$ e $y=a$ con le paratoie

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, \dots riportati nelle figure del report di Li e Mei sono una rappresentazione via via migliore del $\cos(\pi y/a)$.