

L'impatto del moto ondoso sul pontile galleggiante per l'attracco di piccole imbarcazioni a Calasetta (CI)

Bruno Chilò

Introduzione

In questa relazione viene descritta la metodologia adottata per la determinazione dei moti indotti dal moto ondoso sul pontile galleggiante previsto nell'ambito del progetto "Infrastrutturazione Zona Portuale Realizzazione Pontili/Campo Boe per Attracco Piccole Imbarcazioni" nel Comune di Calasetta (CI) e vengono illustrati i risultati ottenuti con particolare riguardo alle forze sul sistema di ancoraggio e alla stima del moto ondoso a ridosso del pontile stesso.

Per il calcolo dei moti del pontile galleggiante costituito da diversi tronconi, interconnessi fra loro tramite giunti elastici, si è fatto uso di un programma di seakeeping (tenuta al mare) particolareggiato a sistemi di ormeggio tipo "side by side" costituiti da più navi le quali interagiscono meccanicamente fra loro tramite parabordi e cavi di ormeggio. Nel caso specifico si sono assunte come navi i tronconi costituenti il pontile oggetto dello studio e si è schematizzata la reazione dei giunti di connessione, che sono caratterizzati da una curva di richiamo elastico, modificando in maniera opportuna il modulo di calcolo dei cavi che calcolano la forza da essi esercitata sulle navi (tronconi) interconnesse. Questi programmi, generalmente in uso nell'ingegneria navale, hanno lo scopo di calcolare, la storia temporale dei moti delle navi (tronconi) costituenti il sistema (pontile), ipotizzando che le navi del sistema (tronconi del pontile), in una data configurazione di ormeggio, siano investite da un determinato stato di mare caratterizzato da una distribuzione spettrale e proveniente da una determinata direzione.

Il calcolo dei moti prende in considerazione le caratteristiche geometriche di carena di ciascuna nave (troncone) costituente un determinato sistema di ormeggio (pontile) tipo "side by side" e la sua distribuzione dei pesi nonché le caratteristiche fisiche e geometriche delle catene costituenti il sistema di ancoraggio e quelle dei giunti elastici. Infine il software messo a punto fornisce i risultati di una analisi nel dominio del tempo circa i valori statistici dei moti baricentrici e delle forze agenti sulle catene di ormeggio e sui giunti elastici.

Nel paragrafo che segue, ove viene descritta la metodologia che è alla base del programma di calcolo usato nella conduzione di questo studio, si deve tener presente che quanto riferito alla nave deve essere inteso riferito al troncone del pontile galleggiante.

Successivamente viene illustrata la metodologia adottata per la determinazione del coefficiente di attenuazione del moto ondoso da parte del pontile galleggiante.

La parte finale del presente documento riporta i risultati ottenuti con l'impiego delle metodologie illustrate.

La metodologia per la dinamica del pontile

Nella trattazione vengono considerati tutti i sei gradi di libertà delle navi considerate ciascuna come corpo rigido, compreso il moto oscillante longitudinale (surge o avanzo); sebbene quest'ultimo sia generalmente di un ordine di grandezza inferiore agli altri. Con queste assunzioni il problema si riduce alla risoluzione per ciascuna nave di un sistema di sei equazioni differenziali del secondo ordine ciascuna relativa ad un singolo grado di libertà.

La prima ipotesi fatta riguarda il moto di avanzo, che viene considerato idrodinamicamente disaccoppiato rispetto agli altri moti, e le forze eccitanti d'onda relative a questo grado di libertà. Si assume che queste forze siano solamente di carattere inerziale e pertanto lineari con l'accelerazione del fluido indotta dal moto ondoso e di carattere resistivo e di conseguenza proporzionali al quadrato della velocità lungo questo asse. Il coefficiente di proporzionalità relativo a quest'ultimo contributo viene calcolato facendo uso della metodologia statistica proposta da Gulddhammer e Harvald /1/.

La seconda ipotesi fatta è quella che consente di schematizzare il moto ondoso con una distribuzione spettrale, pensando cioè il profilo dell'onda come una somma di armoniche

sinusoidali, ciascuna propagantesi nel piano orizzontale con la sua celerità ed una sua fase lungo un'unica direzione.

Un'altra ipotesi fatta nell'affrontare il problema oggetto dello studio è stata quella di supporre che la quota parte degli altri cinque moti considerati, indotti dall'azione ondosa, sia lineare con l'altezza d'onda e che pertanto sia possibile applicare il principio di sovrapposizione degli effetti.

Come noto, questa ipotesi è alla base della maggior parte degli approcci teorici sull'argomento della tenuta al mare delle navi e risulta verificata per climi ondososi non eccessivi e, limitatamente al moto di rollio, che fra tutti i moti risulta essere il più critico sotto questo punto di vista, per ampiezze dello stesso tali da non superare il 60%-70% del valore al quale il momento di stabilità raggiunge il suo valore massimo. Sulla base di questa ipotesi di linearità si ipotizza che le azioni idrodinamiche della carena possano essere schematizzate dall'introduzione di due coefficienti idrodinamici. Il primo di massa aggiunta che dà origine ad una forza proporzionale e in fase con l'accelerazione, il secondo di smorzamento, causa di forze dissipative che sono proporzionali alla velocità.

I coefficienti idrodinamici globali, cioè dell'intera nave, vengono determinati integrando lungo l'asse longitudinale i coefficienti idrodinamici di massa aggiunta e smorzamento ottenuti applicando la così detta "strip theory", che consiste nel dividere il trave nave lungo il suo asse longitudinale in un numero di sezioni trasversali, ipotizzando che non esista alcuna interferenza fra una sezione e quelle adiacenti e riducendo così il problema idrodinamico a sole due dimensioni.

Le caratteristiche del flusso potenziale bidimensionale ed i relativi coefficienti idrodinamici sezionali di massa aggiunta e smorzamento vengono determinati, applicando per ogni sezione nave le trasformazioni conformi di Lewis /2/, con il metodo proposto da Grimm /3/ per il moto verticale e da Tasai /4/ per il moto trasversale e per quello di rollio.

Sulla base di queste ipotesi e applicando la teoria sviluppata da Korvin Krowkovsky /5/ è possibile determinare, una volta nota la sequenza temporale dell'altezza d'onda, anche le sequenze temporali delle forze eccitanti d'onda dei cinque moti presi in considerazione, che rappresentano i termini di destra delle equazioni differenziali, mentre i loro termini di sinistra, che ovviamente contengono le incognite del problema, sono rappresentati da combinazioni lineari fra i vari moti e le loro derivate prime (velocità) e seconde (accelerazioni) rispetto al tempo.

Il mare

Nella metodologia usata si è ipotizzato che lo stato di mare sia rappresentato da una distribuzione spettrale standard (tipo Pierson-Moskowitz /6/ o JONSWAP /7/) e pertanto il modello matematico prevede in input i parametri della distribuzione scelta, oltre ovviamente la direzione di provenienza. Lo spettro di mare viene schematizzato con un numero discreto n di contributi energetici ciascuno

di pari intensità $\left(\frac{m_0}{n}\right)$ e con una frequenza (ω_i) pari al rapporto fra il momento di ordine uno e quello di ordine zero.

Più dettagliatamente; avendo indicato con m_0 l'integrale sulle frequenze angolari della distribuzione spettrale $S(\omega)$:

$$m_0 = \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega$$

l'espressione della frequenza (ω_i) può essere esplicitata nel modo seguente:

$$\bar{\omega}_i = \frac{\int_{\omega_i}^{\omega_{i+1}} \omega S(\omega) d\omega}{\int_{\omega_i}^{\omega_{i+1}} S(\omega) d\omega} = \frac{\int_{\omega_i}^{\omega_{i+1}} \omega S(\omega) d\omega}{\frac{m_0}{n}}$$

Con la tecnica delle fasi casuali possiamo quindi scrivere l'elevazione dell'onda ζ ad ogni tempo (t):

$$\zeta(t) = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{2m_0}{n}} \sin(\bar{\omega}_i t + \beta_i)$$

avendo indicato con (β_i) la fase casuale dell'armonica oscillante alla frequenza angolare ($\bar{\omega}_i$).
Tale onda si propagherà lungo l'asse nave (X) con la seguente formula:

$$\zeta(t, x) = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{2m_0}{n}} \sin(\bar{\omega}_i t - K_i x \sin \mu + \beta_i)$$

avendo indicato con μ la direzione di provenienza del moto ondoso e K_i il numero d'onda dell'armonica oscillante alla frequenza angolare ($\bar{\omega}_i$) definito dalla relazione:

$$\frac{\bar{\omega}_i^2}{g} = K_i \tanh(K_i h)$$

ove h è il fondale. Va sottolineato l'importanza di questa relazione che in presenza di bassi fondali altera in maniera considerevole la dinamica delle onde più lunghe presenti nello spettro del moto ondoso.

Il metodo descritto, pur basato su un limitato numero di componenti in frequenza, presenta rispetto a quello classico delle antitrasformate di Fourier due notevoli vantaggi: il primo vantaggio si ha nella maggiore rapidità di calcolo, il secondo è quello di ottenere, nonostante il numero limitato di armoniche un segnale di elevazione ondosa non periodico in quanto le armoniche ottenute col metodo precedentemente esposto non sono multiple l'una dell'altra.

Le forze d'onda

Come precedentemente accennato una volta conosciuta la sequenza temporale dell'onda è anche possibile calcolare le sequenze temporali delle forze eccitanti d'onda che avranno la seguente struttura:

$$F_j(t) = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{2m_0}{n}} [G_{ij} \sin(\varpi_i t) + H_{ij} \cos(\varpi_i t)]$$

ove G_{ij} e H_{ij} sono rispettivamente la componente in fase e quella in quadratura della forza eccitante d'onda del i -esimo moto e dell'armonica oscillante alla frequenza angolare (ϖ_i) .

In questa sede si vuole dettagliare a titolo di esempio la sola forza del moto di rollio (moto 5):

$$G_{i5} = \int_L e^{-K_i T(x) \varphi(x)_i} [f_{i5}(x) \cos(-K_i x \cos \mu + \beta_i) + g_{i5}(x) \sin(-K_i x \cos \mu + \beta_i)] dx$$

$$H_{i5} = \int_L e^{-K_i T(x) \varphi(x)_i} [g_{i5}(x) \cos(-K_i x \cos \mu + \beta_i) - f_{i5}(x) \sin(-K_i x \cos \mu + \beta_i)] dx$$

avendo indicato con:

β_i la fase casuale dell'elevazione ondosa, di cui al paragrafo precedente,

$T(x)$ l'immersione locale,

$\varphi(x)$ il coefficiente di finezza locale,

$f_{i5}(x)$ e $g_{i5}(x)$ due espressioni funzione dei coefficienti idrodinamici locali di carena, che vengono qui di seguito esplicitate:

$$f_{i5}(x) = f_{Ai5}(x) + f_{Bi5}(x)$$

$$f_{Ai5}(x) = \rho g \frac{B^3(x)}{12} - \rho g B(x) T(x) \varphi(x) z_B(x) - g A_{35}(x, \varpi_i)$$

$$f_{Bi5}(x) = -Z_G \left[\rho g B(x) T(x) \varphi(x) + g A_{33}(x, \varpi_i) - \frac{g^2}{\varpi_i} A_{35}(x, \varpi_i) \right]$$

$$g_{i5}(x) = g_{Ai5}(x) + g_{Bi5}(x)$$

$$g_{Ai5}(x) = -\frac{g}{\varpi_i} B_{35}(x, \varpi_i)$$

$$g_{Bi5}(x) = -Z_G \frac{g}{\varpi_i} [B_{33}(x, \varpi_i)]$$

avendo indicato con:

ρ la densità dell'acqua,

g l'accelerazione di gravità,

$z_B(x)$ il centro verticale locale di spinta,

z_G il centro verticale del baricentro nave,

$A_{33}(x, \varpi_i)$ la massa aggiunta locale del moto di deriva (sway, moto3),

$B_{33}(x, \varpi_i)$ il coefficiente di smorzamento del moto di deriva,

$A_{35}(x, \varpi_i)$ la massa aggiunta locale del moto di rollio, dovuta al moto di deriva,

$B_{35}(x, \varpi_i)$ il coefficiente di smorzamento del moto di rollio, dovuta al moto di deriva.

Le forze del secondo ordine, che ovviamente sono presenti nel solo piano orizzontale (surge moto 6, deriva moto 3, imbardata moto 4), sono state schematizzate nel programma di calcolo seguendo la cosiddetta "teoria a raggi (ray theory)" e calcolando ad ogni passo di integrazione dell'equazioni differenziali l'integrale di linea, lungo il perimetro della figura di galleggiamento, della pressione espressa in termini del quadrato del battente d'onda /8/. In formule:

$$F_{6w_2} = -C_6 \frac{1}{2} \rho g \oint_{WL} \zeta_r^2 n_6 dl$$

$$F_{3w_2} = -C_3 \frac{1}{2} \rho g \oint_{WL} \zeta_r^2 n_3 dl$$

$$F_{4w_2} = -C_4 \frac{1}{2} \rho g \oint_{WL} \zeta_r^2 (xn_3 - yn_6) dl$$

avendo indicato con:

g accelerazione di gravità,

ρ densità del fluido,

ζ_r altezza relativa dell'onda,

C_6, C_3, C_4 i coefficienti di guadagno lungo i tre assi,

n_6, n_3 componenti lungo i due assi della normale alla linea.

Va notato che l'altezza relativa dell'onda ζ_r viene calcolata tenendo conto dell'onda effettiva nel punto di calcolo ζ e della componente verticale del moto del punto di calcolo che risentirà del sussulto, del beccheggio e del rollio.

Le forze dei giunti elastici

Per la determinazione di questo tipo di forze è stato necessario modificare il software inerente il calcolo della forza che agisce sui cavi interconnessi fra le due navi. Anche in questo caso è necessario calcolare ad ogni passo di integrazione le tre componenti dello spostamento dei due punti all'estremità del giunto elastico.

Sulla base della dinamica della nave lungo i suoi sei gradi di libertà (tre moti lineari (X, Y, Z) e tre moti angolari $(\varphi, \vartheta, \psi)$ (definiti nell'ordine come angoli euleriani), è possibile ricavare in un sistema di riferimento fisso le tre traslazioni $(\bar{X}_P, \bar{Y}_P, \bar{Z}_P)$ di un qualunque punto nave di coordinate (X_P, Y_P, Z_P) rispetto al baricentro.

Pertanto ad ogni passo di integrazione il modulo di calcolo effettua il calcolo delle tre componenti dello spostamento di ogni punto nave, ove è allocato il giunto, in accordo alle relazioni:

$$\bar{X}_P = X + (\cos \theta \cos \psi) X_P + (\cos \theta \sin \psi) Y_P - (\sin \theta) Z_P$$

$$\bar{Y}_P = Y + (-\cos \varphi \sin \psi + \sin \varphi \sin \vartheta \cos \psi) X_P + (\cos \varphi \cos \psi + \sin \varphi \sin \vartheta \sin \psi) Y_P + (\sin \varphi \cos \vartheta) Z_P$$

$$\bar{Z}_P = Z + (\sin \varphi \sin \psi + \cos \varphi \sin \vartheta \cos \psi) X_P + (-\sin \varphi \cos \psi + \cos \varphi \sin \vartheta \sin \psi) Y_P + (\cos \varphi \cos \vartheta) Z_P$$

e valuta la distanza fra i due punti dell'estremità del giunto elastico. In base a questa, il modulo di calcolo verifica la compressione o l'elongazione del giunto e di conseguenza la forza da esso esercitata. Va notato che la relazione fra la compressione o l'elongazione del giunto e il carico da esso fornito viene data per punti al fine di poter tenere in considerazione, senza ricorrere ad approssimazioni, richiami elastici non lineari, che nella realtà si presentano abbastanza frequentemente. Una volta nota la forza esercitata dal giunto elastico in base alla posizione relativa fra le sue estremità, con semplici relazioni trigonometriche, si può risalire alle tre componenti di forza agenti lungo i tre assi della nave e sulla base della sua posizione è immediato calcolare le tre componenti di momento agenti sulla nave.

Le forze del sistema di ancoraggio

In maniera del tutto analoga a quanto esposto al paragrafo precedente circa le forze esercitate dai giunti elastici, il metodo di calcolo, ad ogni passo di integrazione del sistema di equazioni differenziali, determina sulla base dei moti della nave la posizione della cubia e conseguentemente la distanza fra l'ancora, la cui posizione viene definita quale dato di input, e la cubia stessa. Nota la lunghezza della catena è possibile risalire alla geometria della catenaria e di conseguenza, conoscendo il peso per unità di lunghezza della catena stessa, è possibile calcolare la sua tensione e le componenti della forza verticale ed orizzontale sulla base di quanto proposto nella referenza /9/. Il passo successivo è il calcolo delle tre componenti di forza e dei tre momenti agenti sulla nave sulla base della posizione della cubia.

I moti della nave (troncone)

Le tre tipologie di forza (dovute al moto ondoso, ai giunti elastici, alle catene del sistema di ancoraggio) rappresentano, come detto, i termini di destra del nostro sistema di equazioni differenziali. Seguendo la teoria proposta da Korvin Krowkovsky /5/ è possibile scrivere il seguente sistema di equazioni differenziali, che per brevità viene riportato in forma matriciale:

$$\sum_{i=1}^6 \tilde{A}_{ij} \ddot{X}_i + \tilde{B}_{ij} \dot{X}_i + \tilde{C}_{ij} X_{ij} = F_j(t)$$

ove i punti indicano le derivate rispetto al tempo e gli indici rappresentano i cinque moti e più dettagliatamente:

- 1 = sussulto
- 2 = beccheggio
- 3 = deriva
- 4 = imbardata
- 5 = rollio
- 6= avanzo (surge)

mentre i coefficienti \tilde{A}_{ij} , \tilde{B}_{ij} , \tilde{C}_{ij} rappresentano rispettivamente le inerzie, gli smorzamenti ed i richiami globali del sistema nave. Unica eccezione è il moto di avanzo (surge, moto 6) ove, come precedentemente accennato, i coefficienti di smorzamento devono considerarsi di carattere viscoso e quindi dipendenti dal quadrato della velocità longitudinale.

Va notato che questi coefficienti sono selettivi in frequenza, per cui per avere una corretta soluzione nel dominio del tempo del sistema di equazioni differenziali, si dovrebbero introdurre, nell'algoritmo di calcolo, prodotti di convoluzione. Tali metodi di calcolo sono stati ritenuti inadeguati alla luce del metodo introdotto per la schematizzazione del moto ondoso e delle forze eccitanti d'onda, che usa, come detto, un numero limitato di armoniche. Per ovviare alla dipendenza in frequenza di questi coefficienti i loro valori sono stati sostituiti con quelli mediati sul numero delle componenti in frequenza considerato.

Per brevità di trattazione si vogliono riportare in questa sede solamente le espressioni analitiche dei coefficienti diagonali del rollio \tilde{A}_{55} , \tilde{B}_{55} , \tilde{C}_{55} :

$$\tilde{A}_{55} = I_{XX} + \int_L \bar{A}_{55}(x) dx + z_G \int_L \bar{A}_{53}(x) dx + z_G \int_L \bar{A}_{35}(x) dx + z_G^2 \int_L \bar{A}_{33}(x) dx$$

ove:

I_{XX} è il momento di inerzia attorno all'asse baricentrico longitudinale della nave,

$\bar{A}_{ij}(x)$ è la media sul numero delle componenti in frequenza considerato della massa aggiunta locale del moto iesimo dovuto al moto iesimo,

$$\tilde{B}_{55} = \tilde{B}_{A55} + \tilde{B}_{B55}$$

$$\tilde{B}_{A55} = \int_L \bar{B}_{55}(x) dx + z_G \int_L \bar{B}_{35}(x) dx + z_G^2 \int_L \bar{B}_{33}(x) dx$$

$$\tilde{B}_{B55} = z_G \int_L \bar{B}_{53}(x) dx$$

ove:

$\bar{B}_{ij}(x)$ è la media sul numero delle componenti in frequenza considerato dello smorzamento locale del moto iesimo dovuto al moto iesimo,

$$\tilde{C}_{55} = \Delta \cdot GM$$

ove:

Δ è il dislocamento della nave,

GM è l'altezza metacentrica della nave.

Va notato che molti coefficienti idrodinamici di accoppiamento sono nulli, infatti come detto precedentemente il moto longitudinale è disaccoppiato dagli altri cinque moti inoltre nella sopra citata teoria di Korvin Krowkovsky i moti di beccheggio e sussulto sono disaccoppiati dagli altri tre considerati e pertanto il sistema di equazioni sopra descritto potrebbe essere diviso dal punto di vista idrodinamico in una equazione (quella del surge) e in due sistemi il primo per i moti verticali di sussulto e beccheggio e il secondo per i moti di deriva, imbardata e rollio.

La metodologia per l'efficienza del pontile

Per il calcolo del coefficiente di attenuazione del moto ondoso a ridosso del pontile galleggiante è stato impiegato un software che si basa sulle curve proposte nella referenza bibliografica /10/. Queste curve riportano in funzione della frequenza d'onda incidente, espressa in termini del rapporto fra la larghezza del pontile e la lunghezza d'onda, il rapporto fra l'altezza dell'onda incidente e quello dell'onda attenuata a ridosso del pontile. Le curve sono proposte per un vasto campo di rapporti fra l'immersione del pontile e il fondale e di rapporti fra la lunghezza d'onda e il fondale stesso.

Il metodo di calcolo sviluppa l'indagine a livello spettrale in due fasi: nella prima fase trasforma la distribuzione spettrale in funzione del fondale sulla base della teoria proposta da Longuet-Higgins /11/ secondo la quale la densità di energia dell'onda, in funzione delle componenti del numero d'onda, rimane costante lungo la sua linea di propagazione, mentre nella fase successiva ad ogni componente spettrale esso applica il coefficiente di attenuazione che viene trovato interpolando opportunamente fra le curve proposte in base alle caratteristiche geometriche del pontile.

Il caso applicativo

Le due metodologie precedentemente descritte sono state applicate al pontile galleggiante previsto nell'ambito del progetto "Infrastrutturazione Zona Portuale Realizzazione Pontili/Campo Boe per Attracco Piccole Imbarcazioni" nel Comune di Calasetta (CI). Il pontile galleggiante, come si evince dal disegno "04 PLANIMETRIA GENERALE FRANGIONDA E SCHEMA ANCORAGGI.dwg" elaborato da Essepi Engineering nel mese di giugno 2013 ha una configurazione a L con il tratto lungo della L parallelo alla linea di costa e formato da otto elementi della lunghezza di 12.0 m e larghi al galleggiamento 4.69 m, mentre il tratto corto della L risulta formato da tre elementi della stessa lunghezza con una larghezza al galleggiamento pari a 2.26 m.

Esso è posizionato su un fondale di 4.0 m. Gli undici elementi sono interconnessi fra loro da giunti elastomerici che hanno una lunghezza pari a 0.22 m. come riportato nel disegno "05 PARTICOLARI STRUTTURA FRANGIONDA.dwg" della Essepi Engineering.

Il disegno "03 PLANIMETRIA E SEZIONE DE CAMPO BOE.dwg" ha permesso di determinare l'orientamento del molo galleggiante: il tratto lungo della L risulta orientato per 163°-343° e conseguentemente quello corto, perpendicolare al precedente, per 073°-253°.

Alla luce della configurazione del pontile esso è stato schematizzato come due navi (tronconi) corrispondenti ai due tratti della L che caratterizzano il pontile galleggiante, le caratteristiche

geometriche e di inerzia dei quali vengono illustrate nella tabella 1. Va notato che la “prora” della nave (troncone) è rivolta verso la testa del molo galleggiante.

TRONCONE		LUNGO	CORTO
Lunghezza al galleggiamento	L [m]	97.54	36.44
Larghezza al galleggiamento	B [m]	4.69	2.26
Immersione	T [m]	0.5	0.5
Coefficiente di finezza	C_B	0.9486	0.9879
Dislocamento	Δ [t]	222.4	41.7
Posizione verticale del baricentro dalla linea di costruzione	VCG [m]	0.63	0.63
Raggio di girazione al beccheggio	K_{YY} [m]	28.16	10.39
Raggio di girazione al rollio	K_{XX} [m]	1.288	1.089
Orientamento	[°]	343	073
Numero corto morto dritta	[]	9 (01÷09)	4 (19÷22)
Numero corpo morto sinistra	[]	9 (10÷18)	3 (23÷25)

tabella 1

Nel calcolo dei momenti di inerzia e dei conseguenti raggi di girazione al beccheggio e al rollio si è tenuto conto della presenza dei contrappesi, che hanno una catena lunga 3.0 m ed un peso in acqua di 0.3 t, come riportato nel disegno “**06 PARTICOLARE DEI CORPI MORTI.dwg**”. I contrappesi sono sistemati in maniera simmetrica rispetto all’asse del pontile e in corrispondenza di ogni giunto fra un elemento e l’altro del pontile stesso.

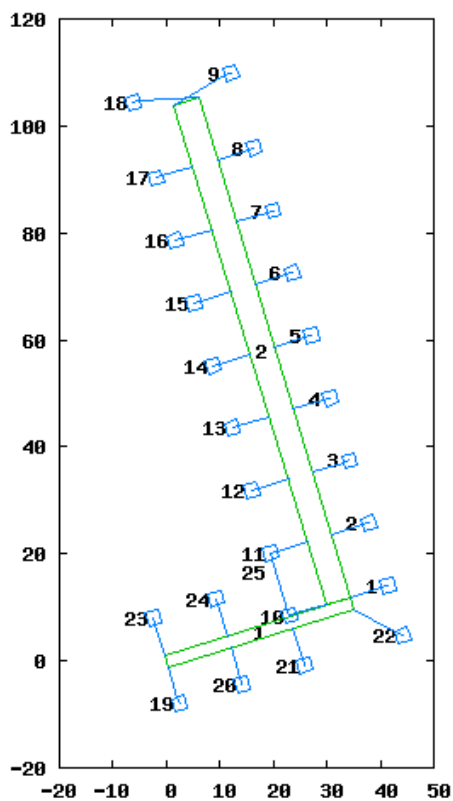
I due tronconi sono stati intramezzati dagli otto elementi reggispinta presenti in ogni giunto elastico ciascuno con la propria caratteristica di elasticità. Per il calcolo di questa caratteristica, oltre alle dimensioni geometriche degli elementi reggispinta desumibili dal disegno “**05 PARTICOLARI STRUTTURA FRANGIONDA.dwg**”, è stato assunto per il materiale EPDM un modulo di Young pari a 0.007 GPa come riportato nella referenza bibliografica /12/.

I numeri tra parentesi relativi alle due ultime righe della tabella sono i numeri identificativi delle catene dei corpi morti, tenendo presente che il numero più basso si riferisce alla catena più lontana dalla testa del pontile, così come viene riportato in figura 1.

Per tutte le venticinque catene del sistema di ormeggio è stato assunto un peso per unità di lunghezza pari a 11.5 Kg/m. La lunghezza di ciascuna catena è stata desunta dal disegno “**04 PLANIMETRIA GENERALE FRANGIONDA E SCHEMA ANCORAGGI.dwg**” e viene riportata nella tabella 2.

Catena del corpo morto N°	Lunghezza [m]
1÷8	15.0
9	17.0
10÷17	15.0
18	17.0
19÷25	18.0

tabella 2



SCHEMATIZZAZIONE
DEL MOLO FRANGIFLUTTI E
DEL SISTEMA DI ORMEGGIO

figura 1

Per la scelta degli stati di mare si è fatto riferimento allo studio del clima meteo marino condotto dalla Provincia di Carbonia Iglesias /13/ nell'ottobre del 2012 che propone per la zona di Calasetta i valori dei parametri spettrali caratterizzati da un periodo di ritorno di 50 anni, come viene riportato nella tabella 3.

Direzione del moto ondoso al largo [°]	Direzione del moto ondoso a terra [°]	Altezza significativa Hs [m]	Periodo di picco Tp [s]
000	348	1.8	12.5
045	045	0.6	3.4
090	087	0.9	3.7
135	124	0.7	2.8
180	238	1.1	10.0
225	248	2.5	10.0
270	271	2.7	12.5
315	325	1.8	12.5

tabella 3

Nello svolgimento dello studio sono stati presi in considerazione solamente i tre stati di mare evidenziati in verde.



figura 2

La scelta dei soli tre stati di mare evidenziati in verde nella tabella è stata dettata dalla seguente considerazione: il punto di calcolo delle caratteristiche del moto ondoso a Calasetta preso in considerazione nello svolgimento del sopramenzionato studio meteo marino ha approssimativamente le coordinate $39^{\circ} 7.5' N$ $008^{\circ} 21.5' E$ e viene evidenziato con un punto rosso nella figura 2, mentre il pontile galleggiante, che verrà posizionato nella zona indicata con un cerchio, risulta a ridosso rispetto a tutti i settori di traversia ad esclusione di quelli di Levante, come si può notare dalla figura 2.

Nello svolgimento dello studio si è assunto che i tre stati di mare siano caratterizzati da una distribuzione spettrale tipo JONSWAP, la quale si trasforma per effetto shoaling in presenza di basso fondale (4.0 m) come viene riportato nella figura 3. Nel prosieguo, per ragioni di brevità, i tre stati di mare verranno identificati con la loro direzione di provenienza al largo (045° , 090° , 135°).

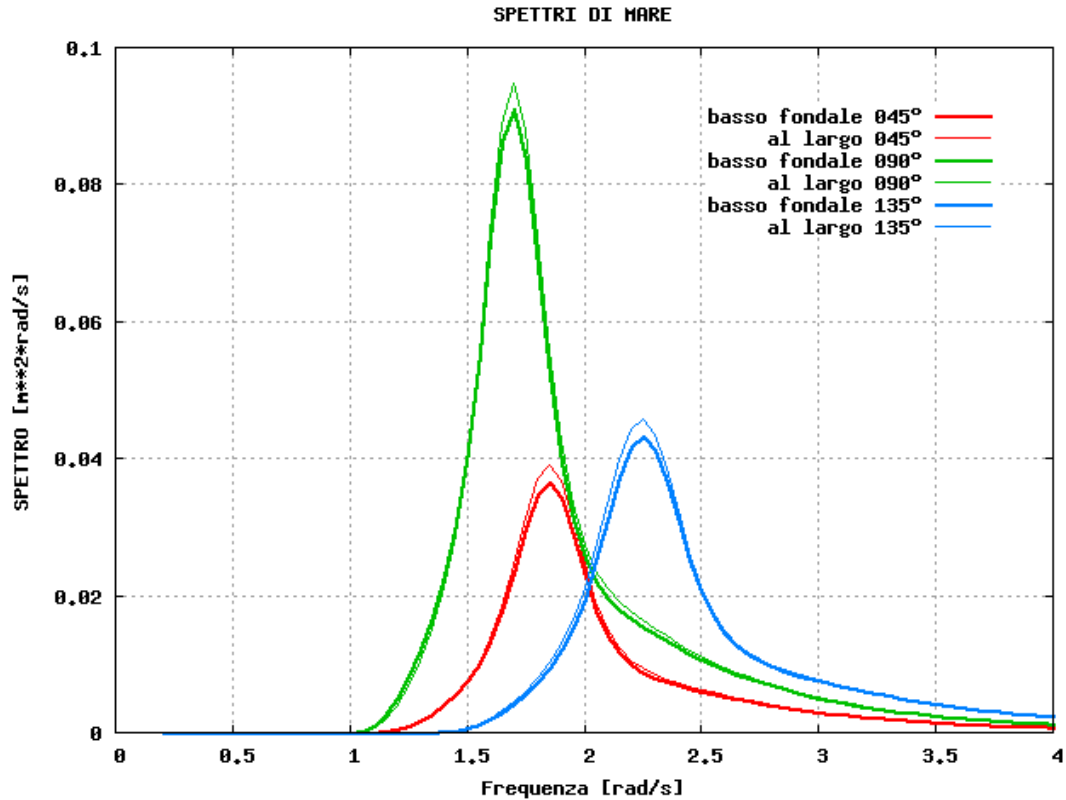


figura 3

In primo luogo si è verificato che il fondale, che si vuole ricordare essere pari a 4.0 m, fosse tale da non interessare il frangimento delle onde per ciascuno dei tre stati di mare presi in considerazione. In questo contesto sono stati usati i criteri di Michell e Munk che vengono riportati nel riferimento bibliografico /14/. La figura 4 riporta in funzione del periodo dell'onda l'altezza di frangimento dell'onda: come si può notare i tre punti, che rappresentano i tre mari presi in considerazione, rimangono al di sotto delle linee proposte dai due metodi.

Successivamente per ognuno degli stati di mare considerati è stata riprodotta una serie temporale di moto ondoso di 2500 s con una rampa lineare moltiplicativa sulle forze eccitanti dell'onda della durata di 100 s, per un periodo totale utile di 2400 s (40 minuti). La rampa, lineare nel tempo, assume un valore nullo al tempo uguale a zero ed un valore unitario per tempi uguali e superiori ai 100. s. E' stato necessario introdurre questo artificio in quanto il programma di calcolo considera nulle le condizioni iniziali (tronconi del pontile entrambi a riposo lungo i sei gradi di libertà) e l'introduzione di una improvvisa forza eccitante d'onda può inficiare il metodo numerico risolutivo dell'equazioni differenziali.

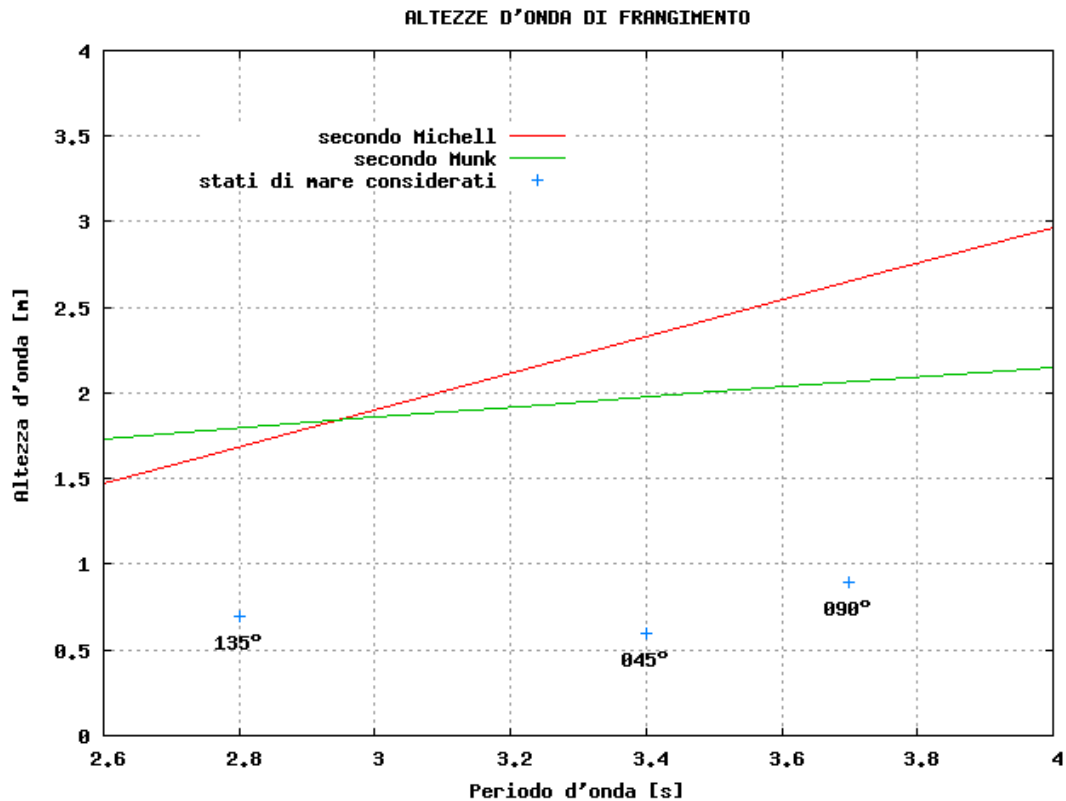


figura 4

Per ognuno dei tre stati di mare considerati e per i due tronconi con i quali è stato schematizzato il pontile galleggiante allo studio si sono ottenute trentasette storie temporali: dodici per ognuno dei sei gradi di libertà dei due tronconi del pontile e venticinque relative alle forze agenti su ogni catena che costituisce il sistema di ormeggio.

Per le prime dodici storie temporali è stata condotta un'analisi nel dominio del tempo che ha portato ai risultati, espressi in termini di altezze significative, che vengono illustrati nella tabella 4.

	TRONCONE LUNGO			TRONCONE CORTO		
Sato di mare	045°	090°	135°	045°	090°	135°
Avanzo [m]	0.30	0.15	0.05	0.27	0.60	0.21
Deriva [m]	0.28	0.97	0.07	0.28	0.33	0.64
Sussulto [m]	0.03	0.11	0.01	0.15	0.23	0.20
Rollio [°]	0.42	1.44	0.07	2.26	2.75	1.31
Beccheggio [°]	0.12	0.37	0.06	1.59	2.43	1.78
Imbardata [°]	0.20	0.81	0.05	1.19	1.29	1.15

tabella 4

In generale i valori riportati nella tabella precedente sono di entità limitata anche alla luce della considerazione che essi hanno una probabilità di evenienza pari al 13.5%, poiché, vista la natura oscillante del fenomeno, i valori di escursione massima seguono la distribuzione probabilistica di Rayleigh, rappresentata dalla formula:

$$p(x \leq \bar{x}) = e^{-\frac{\bar{x}^2}{2\sigma_x^2}}$$

ove σ_x^2 si ottiene dall'integrale dello spettro della risposta $S_x(\omega)$ nel dominio delle frequenze angolari:

$$\sigma_x^2 = \int_0^{\infty} S_x(\omega) d\omega$$

A titolo di esempio per il solo stato di mare più impegnativo (090°) con altezza significativa pari a 0.9 m e periodo di picco di 3.7 s le figure 5÷10 riportano le storie temporali dei sei moti (figura 5 per l'avanzo, figura 6 per la deriva, figura 7 per il sussulto, figura 8 per il rollio, figura 9 per il beccheggio e figura 10 per l'imbardata) di entrambi i tronconi con i quali è stato schematizzato il pontile galleggiante allo studio.

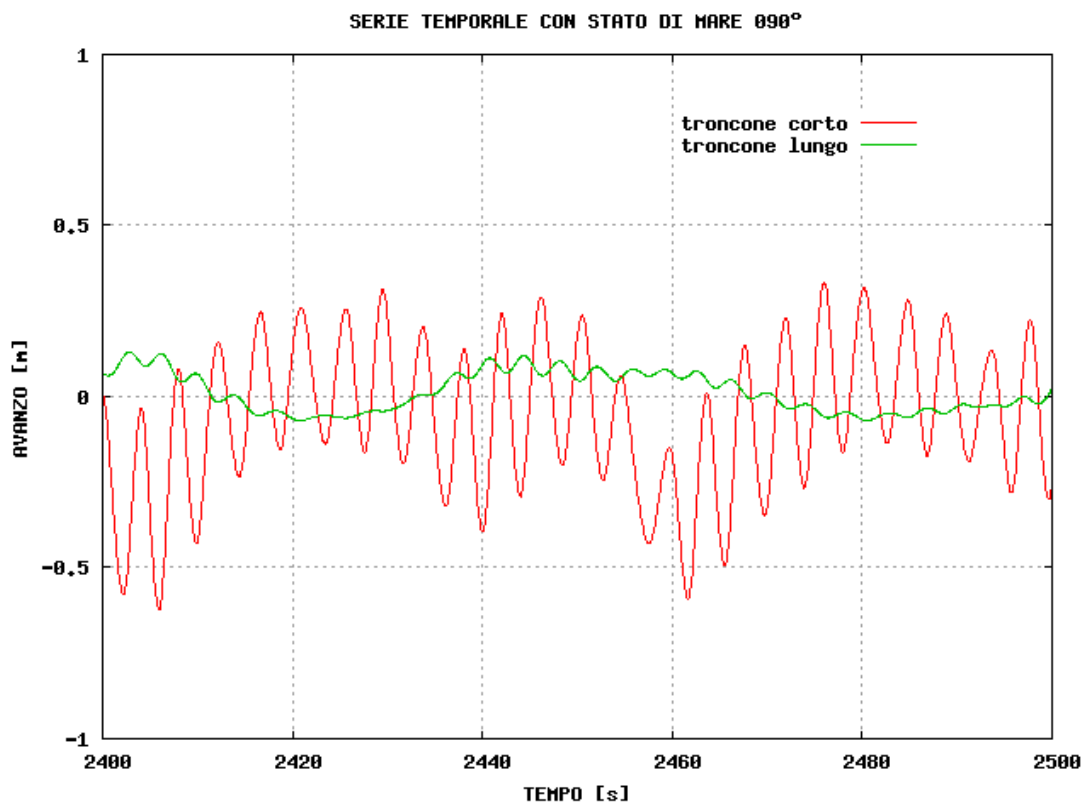


figura 5

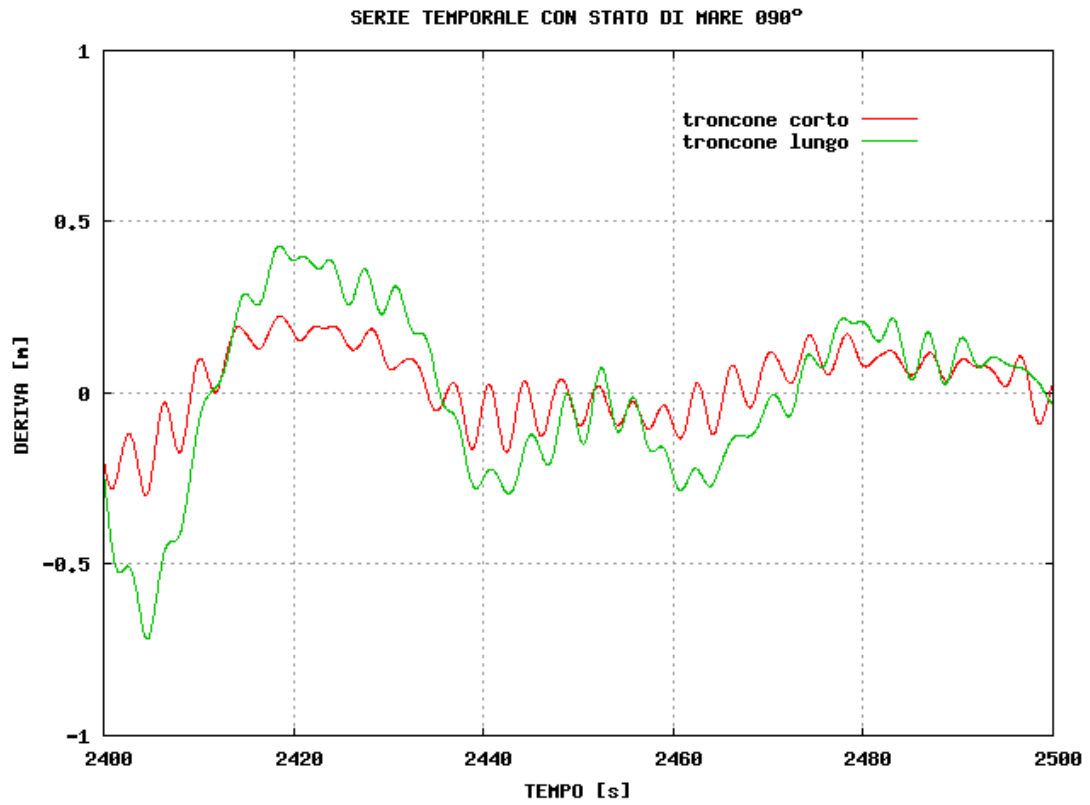


figura 6

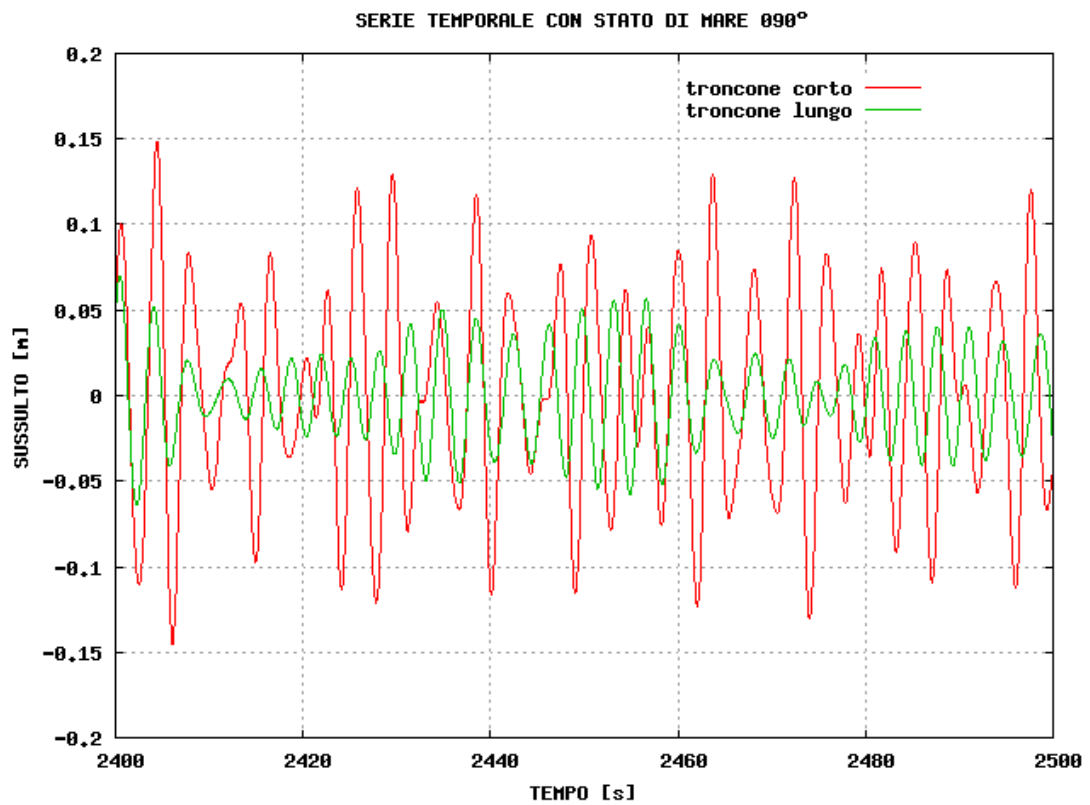


figura 7

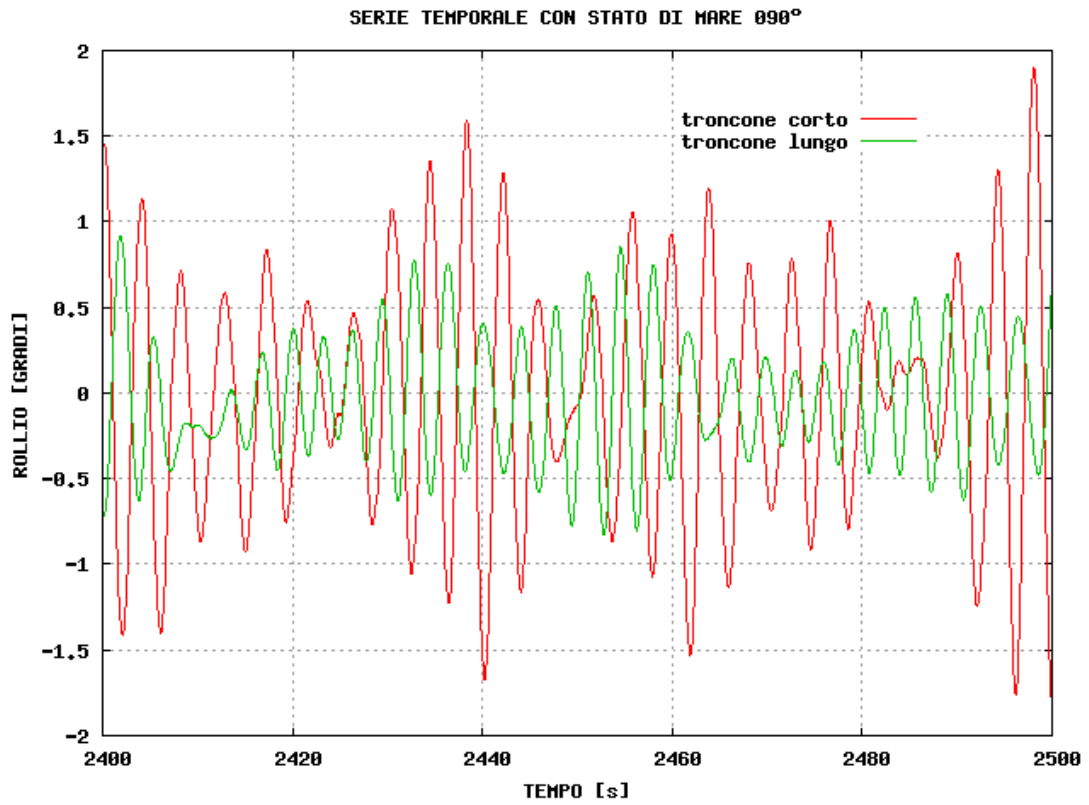


figura 8

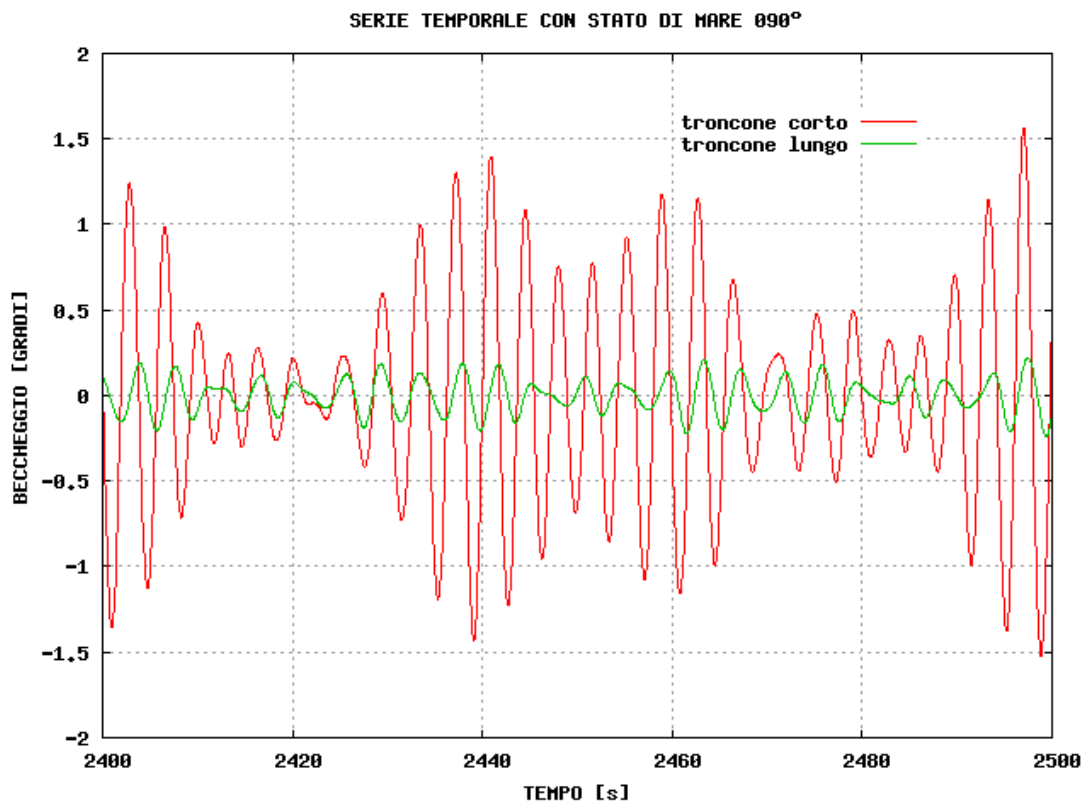


figura 9

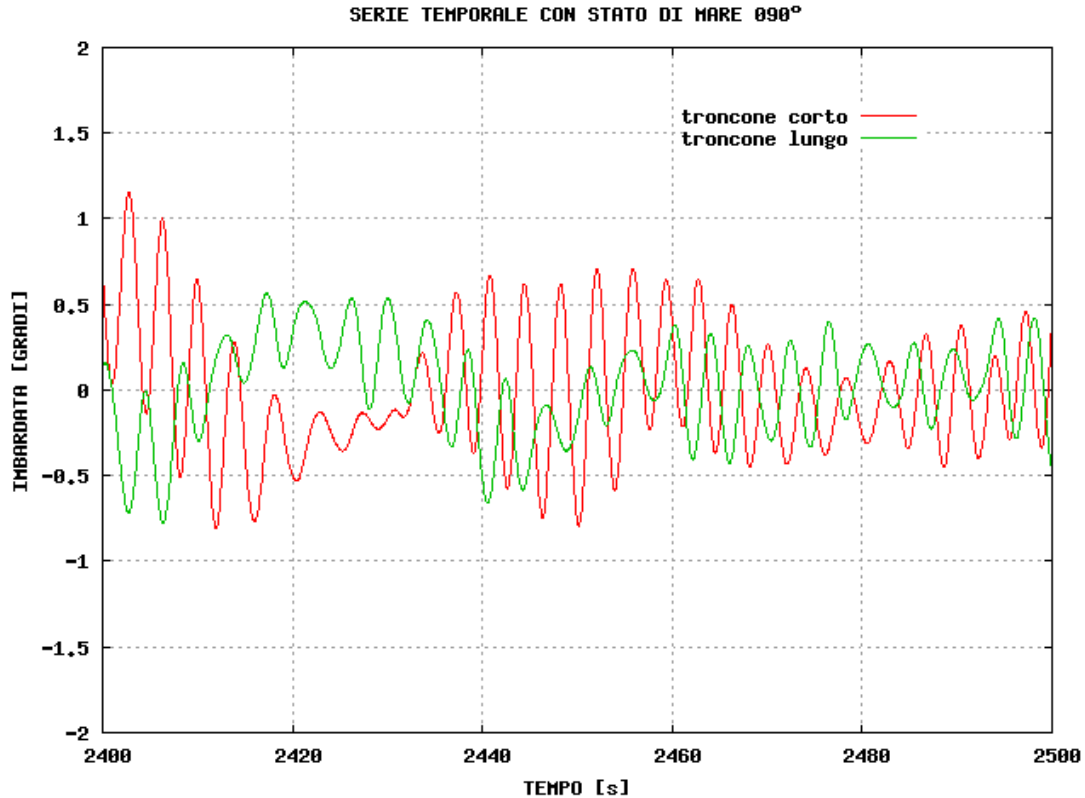


figura 10

Si vuole sottolineare come le figure dei moti verticali (sussulto-figura 7, rollio-figura 8, beccheggio-figura 9), presentino oscillazioni temporali con periodo commensurabile a quello dell'onda incidente e pari a 3.7 s, mentre nelle altre figure che sono relative ai moti orizzontali a queste frequenze di oscillazione se ne sovrappongono altre di più bassa frequenza. Questo fenomeno viene innescato dalle forze d'onda del secondo ordine e dalla conseguente reazione delle catene del sistema di ormeggio.

Oscillazioni dell'ordine del metro, si veda al proposito nella tabella 4 l'altezza significativa della deriva (0.97 m) del troncone lungo con stato di mare 090°, possono suscitare una qualche preoccupazione, si vuole tuttavia sottolineare come queste oscillazioni abbiano raggiunto uno stato di regime, intendendo con ciò che esse si verificano ad una nuova posizione di equilibrio dei due tronconi del pontile, come si può vedere nelle due figure 11 e 12.

La figura 11 mostra l'andamento temporale, per tutto il periodo della simulazione pari a 2500 s, della differenza di orientamento fra i due tronconi del pontile. Si vuole sottolineare che un valore positivo indica che l'angolo iniziale di 90° fra i due tronconi tende a diventare ottuso. Come si può notare questo andamento lo si riscontra con lo stato di mare 045° ove il valore che ovviamente al tempo iniziale è nullo raggiunge un valore asintotico di 1.7°, mentre gli altri due stati di mare hanno la tendenza a fare diventare acuto l'angolo fra i due tronconi.

Conseguenza di questo fatto è che la distanza fra i due baricentri dei tronconi del pontile aumenta per lo stato di mare 045°, mentre essi si avvicinano per gli altri due stati di mare 090° e 135°, come si può notare nella figura 12 che riporta con le stesse modalità della figura precedente la variazione rispetto alla distanza iniziale (a riposo) fra i baricentri dei pontili, che ricordiamo essere uguale a 52.57 m. In questo caso un valore positivo implica un incremento della distanza e quindi un allontanamento fra i due baricentri e nel caso contrario un avvicinamento.

Si vuole infine fare notare come gli spostamenti angolari non superino in valore assoluto il valore di 2.7°, che è il limite geometrico del giunto.

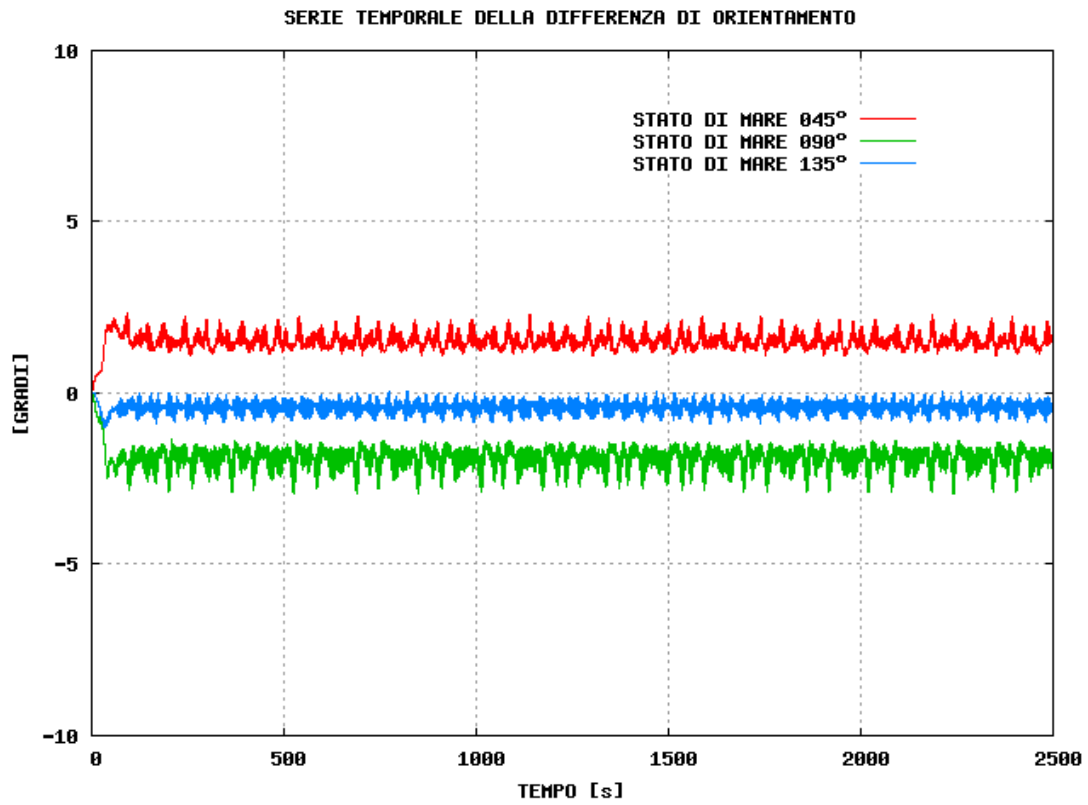


figura 11

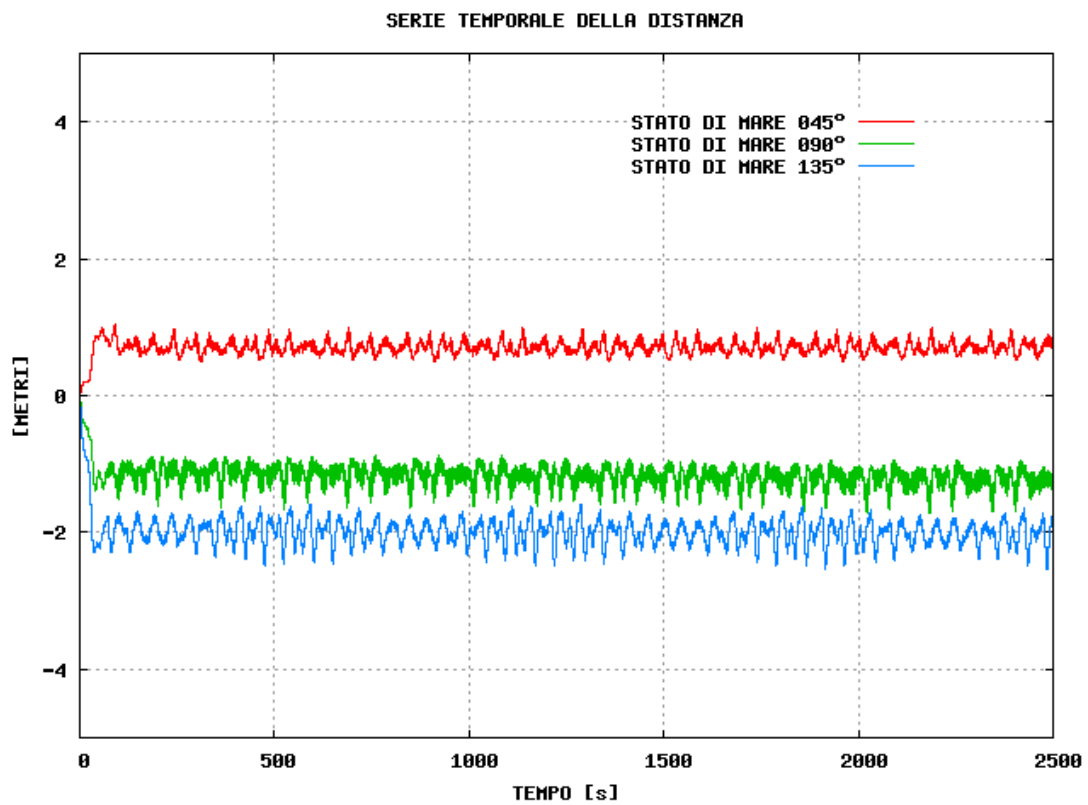


figura 12

La successiva parte dello studio ha avuto lo scopo di verificare il carico che si è riscontrato sulle catene del sistema di ormeggio. Le tabelle 5 e 6 riportano per le catene del sistema di ormeggio del pontile galleggiante il massimo della forza espressa in t verificatosi nel corso dei 40 minuti della serie temporale d'onda simulata rispettivamente per il troncone lungo e per quello corto. Si vuole sottolineare che, in questo ambito, è stato scelto il valore massimo in quanto il fenomeno del carico sulla catena del sistema di ancoraggio ha un andamento diverso da quello oscillatorio dei moti baricentrici precedentemente esaminati: esso infatti è sempre positivo e talvolta può avere picchi improvvisi che rappresentano il repentino passaggio della catena da una posizione di riposo ad una di tiro.

Massimo della forza [t] sulle catene del troncone lungo							
Catena del corpo morto N°	Stato di mare 045°	Stato di mare 090°	Stato di mare 135°	Catena del corpo morto N°	Stato di mare 045°	Stato di mare 090°	Stato di mare 135°
10	0.012	0.014	0.010	1	0.073	0.187	0.045
11	0.011	0.009	0.009	2	0.073	0.220	0.048
12	0.010	0.000	0.007	3	0.074	0.260	0.052
13	0.009	0.000	0.000	4	0.075	0.300	0.056
14	0.009	0.000	0.000	5	0.081	0.352	0.060
15	0.008	0.000	0.000	6	0.087	0.410	0.064
16	0.008	0.000	0.000	7	0.095	0.510	0.070
17	0.009	0.000	0.000	8	0.103	0.626	0.076
18	0.000	0.000	0.000	9	0.041	0.268	0.000

tabella 5

Massimo della forza [t] sulle catene del troncone corto							
Catena del corpo morto N°	Stato di mare 045°	Stato di mare 090°	Stato di mare 135°	Catena del corpo morto N°	Stato di mare 045°	Stato di mare 090°	Stato di mare 135°
23	0.161	0.000	0.000	19	0.000	0.157	0.354
24	0.287	0.000	0.000	20	0.000	0.027	0.223
25	0.000	0.000	0.000	21	0.000	0.000	0.198
				22	0.000	0.000	0.192

tabella 6

Come si può notare il lato del troncone del pontile dal quale proviene il moto ondoso è quello più vicino ai corpi morti delle catene più sollecitate: corpi morti dal lato destro del troncone lungo per tutti e tre gli stati di mare considerati, corpi morti dal lato sinistro del troncone corto per stato di mare 045° e corpi morti dal lato destro del troncone corto per stati di mare 090° e 135°. I carichi riscontrati, specialmente per lo stato di mare 090°, pur essendo al di sotto del carico di rottura della catena stimato in 1.6 t, sono importanti e tali da suggerire o un allontanamento dei corpi morti rispetto all'asse del pontile e un conseguente allungamento della catena o un maggiore peso del corpo morto al fine di evitare che esso possa arare in condizioni gravose di moto ondoso.

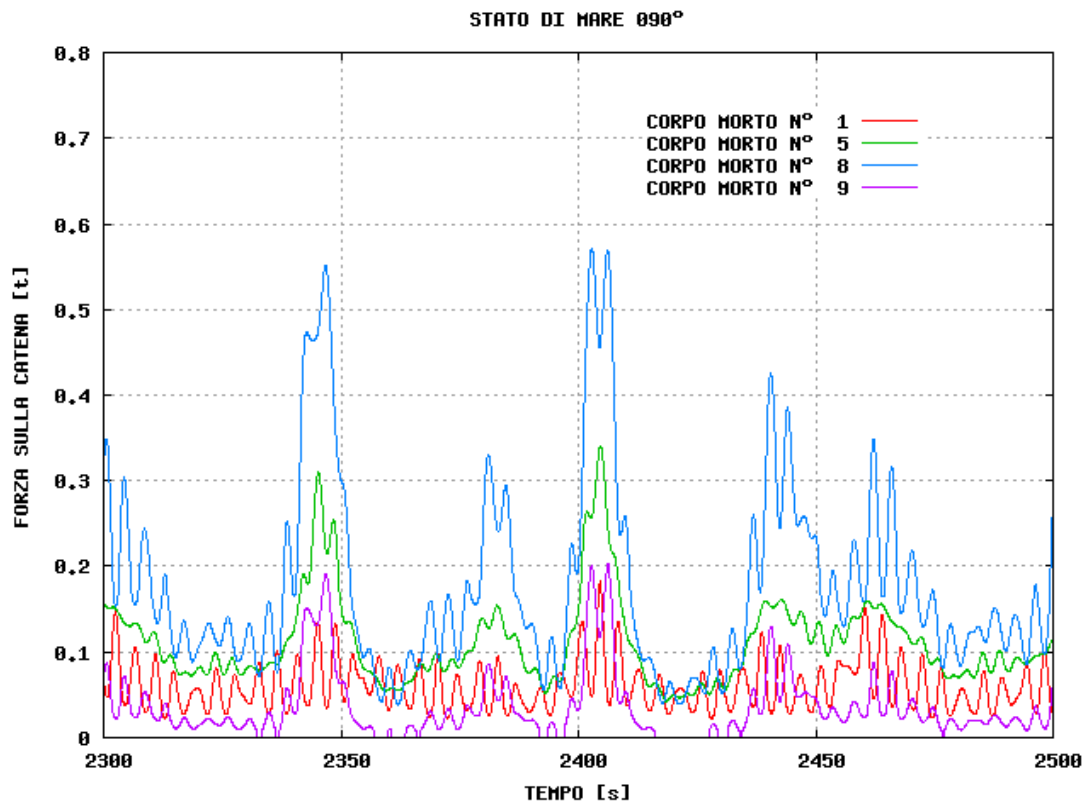


figura 13

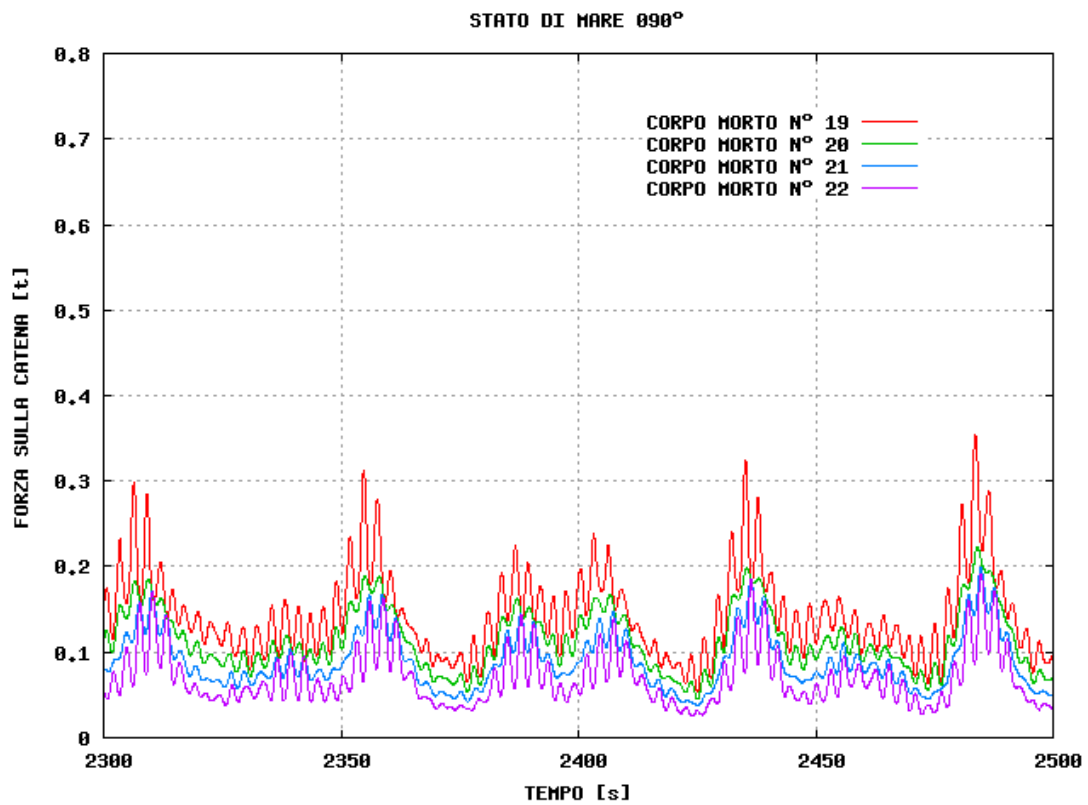


figura 14

Anche in questo caso si vuole proporre l'andamento temporale delle forze agenti sulle catene. A titolo di esempio si sono scelti i casi in cui le catene sono maggiormente sollecitate; la figura 13 riporta relativamente agli ultimi 200. s la storia temporale delle catene del troncone lungo e più precisamente quella dei corpi morti N° 1 estremo levante, N° 5 a metà troncone, N° 8 penultima all'estremo di ponente e N° 9 ultima all'estremo di ponente per lo stato di mare 090°. La scelta di queste catene è dettata da considerazioni geometriche del sistema di ormeggio infatti l'ultima catena N° 9 ha una lunghezza superiore rispetto a quella precedente N°8 (17 m contro 15 m) e la differenza fra i due andamenti temporali evidenzia l'importanza della posizione dei corpi morti.

La figura 14 invece riporta con le stesse modalità della figura 13 l'andamento temporale dei carichi dinamici che agiscono sulle catene dei corpi morti N° 19÷22 posti a SE del troncone corto per lo stato di mare 135°.

L'ultima parte dello studio è stata finalizzata alla determinazione del grado di assorbimento del moto ondoso incidente da parte del pontile galleggiante. La metodologia precedentemente illustrata è stata applicata per il pontile con gli stessi stati di mare presi in considerazione nella fase dello studio per la valutazione dei moti del pontile e la stima dei carichi dinamici sulle catene del sistema di ormeggio. La tabella 7 sintetizza i risultati dell'indagine mostrando i coefficienti di attenuazione K_t del pontile galleggiante allo studio.

Direzione del moto ondoso al largo [°]	Direzione del moto ondoso a terra [°]	Altezza significativa Hs [m]	Periodo di picco Tp [s]	Coefficiente di attenuazione K_t
045	045	0.6	3.4	0.409
090	087	0.9	3.7	0.100
135	124	0.7	2.8	0.131

tabella 7

Il coefficiente K_t viene ricavato dal rapporto fra i contributi energetici dello spettro del moto ondoso attenuato, a ridosso cioè del pontile, e quello del moto ondoso incidente. In formula:

$$K_t = \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} S_{rid}(\omega) d\omega}{\int_0^{\infty} S_{inc}(\omega) d\omega}}$$

Per completezza di informazione la figura 15 riporta le distribuzioni spettrali del moto ondoso attenuato ottenute applicando la metodologia sopra menzionata.

Dall'analisi dei risultati il più critico stato di mare risulta quello proveniente da NE (045°) che fa registrare a ridosso del pontile galleggiante una altezza d'onda significativa di 0.25 m che per imbarcazioni di piccole dimensioni (4.0÷7.5 m di lunghezza) potrebbe creare qualche problema.

A questo proposito si deve però notare che l'evento preso in considerazione ha una bassa probabilità di evenienza (periodo di ritorno 50 anni) ed inoltre da questo settore di traversia il pontile galleggiante allo studio si trova abbastanza a ridosso dell'esistente "Molo per Imbarcazioni da Pesca" (vedasi disegno "03 PLANIMETRIA E SEZIONE DE CAMPO BOE.dwg"), la presenza del quale non è stata considerata nello studio meteo marino /13/ degli stati di mare assunti a base della presente indagine; pertanto i risultati qui illustrati hanno carattere conservativo.

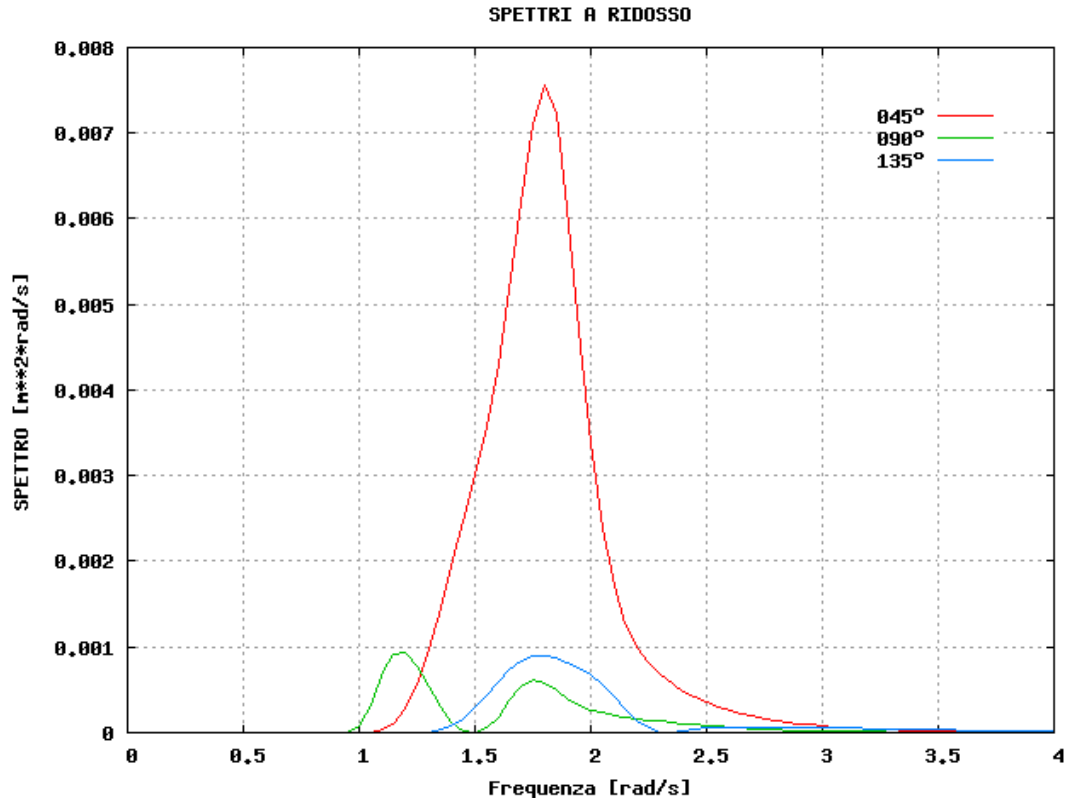


figura 15

Conclusioni

Lo studio per la determinazione della dinamica del pontile galleggiante di Calasetta e della valutazione del suo indice di efficienza è stato condotto per tre diverse direzioni di provenienza del moto caratterizzate da altezze significative particolarmente impegnative ed aventi un periodo di ritorno di 50 anni.

Lo studio presentato ha permesso di verificare che in queste condizioni di mare non esistono particolari criticità per il pontile galleggiante previsto nel progetto “Infrastrutturazione Zona Portuale Realizzazione Pontili/Campo Boe per Attracco Piccole Imbarcazioni” nel Comune di Calasetta (CI).

La notevole entità dei carichi sulle catene di ormeggio riscontrata nel corso dello studio consiglia comunque un appesantimento dei corpi morti del pontile galleggiante o un loro decentramento rispetto all’asse del pontile con conseguente allungamento delle catene del sistema di ormeggio.

Riferimenti bibliografici

- /1/ Harvald S. A., Gulddammer H. E.
 “Ship Resistance: Effect of Form and Principal Dimensions”
 Akademisk Forlag, Copenhagen 1974
- /2/ Lewis F. M.
 “Investigation of Ship Motions in Regular Waves”
 Transaction SNAME Vol. 63, 1955

- /3/ Grimm O.
“Die Schwingungen von Schwimmmeden, Zweidimensionalen Korpen”
Technical Report N. 1171 HSVA September 1959
- /4/ Tasai F.
“Hydrodynamic Force and Moment Produced by Swaying and Rolling Oscillations of
Cylinders on the Free Surface”
Report of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Vol. 9° N. 35, 1961
- /5/ Korvin Krowkovsky
“Theory of Seakeeping”
S.N.A.M.E., New York 1961
- /6/ Moskowitz L., Pierson W. J., Mehr E.
“A Proposed Spectral Form for Fully Developed Wind Seas Based on the Similarity Theory
of S. A. Kitaigorodskii”
Technical Report for U.S. Naval Oceanographic Office, New York University
- /7/ Carter D. J. C.
“Prediction of Wave Height and Period for a Costant Wind Velocity Using The JONSWAP
Results” Ocean Engineering, pp 17-33,1982
- /8/ Pinkster J. A.
“Low Frequency Second Order Wave Excitation Forces on Floating Structures” Veeman en
Zonen, Wageningen 1980
- /9/ Artyszuk J
“Anchor Forces in Ship Manoeuvring Mathematical Model”
Polish Navigation Forum, Annual of Navigation 6/2003
- /10/ MarCom Working Group 13
“Floating Breakwater – a Practical Guide for Design and Construction”
Supplement to Bulletin nr. 85 PTC” report of WG 13 IPCN 1994
- /11/ Lomguet-Higgins M..
“Dynamics of Water Waves”
Vol. 3 S. G.Sajjadi Edition, May 2013
- /12/ Sohn M. s., Kim K. S., Hong S. H., Kim
“Dynamic Mechanical Properties of Particle-reinforced EPDM Composites”
Journal of Applied Polymer Science Vol.87 Issue 10 , Marchr 2003
- /13/ Congiu A. M.
“Studio meteomarina del sistema portuale del Sulcis-Iglesiente”
Provincia di Carbonia Iglesias, Ottobre 2012
- /14/
“Shore Protection Manual”
Vol. 1, Coastal Engineering Research Center, Department of Army, Vicksburg, Missisipi
1984
- /15/
“Shore Protection Manual”
Vol. 1, Coastal Engineering Research Center, Department of Army, Vicksburg, Missisipi
1984



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

AMMINISTRAZIONE COMUNALE DI CALASETTA

Provincia di Carbonia - Iglesias

PROGETTO ESECUTIVO

INFRASTRUTTURAZIONE ZONA PORTUALE REALIZZAZIONE PONTILI/CAMPO BOE PER ATTRACCO PICCOLE IMBARCAZIONI

ELABORATO:

RELAZIONE DI CALCOLO

L'IMPATTO DEL MOTO ONDOSI SUL PONTILE

ALLEGATO:

A1

IL RESPONSABILE U.T.C

GEOM. FOIS GIAMPAOLO

IL SINDACO

ING. ANTONIO VIGO

SCALA:

DATA: OTTOBRE 2013

AGG.: DICEMBRE 2013

IL PROGETTISTA



Ing. Salvatore PINNA

IL DIRETTORE TECNICO

Ing. Gian Paolo PORCU

IL CONSULENTE SPECIALISTICO

Dott. Bruno Chilò

AGG.:

DATA APPROVAZIONE

REV 0:

REV 1:

REV 2:

Cod. Pratica

..

FILE: 001 COPERTINE.DWG

Cod. Pratica

..