

STUDIO INTEGRATIVO AGITAZIONE ONDOSA INTERNA

Istruttoria VIA, Lavori di prolungamento della testata del molo e di ampliamento e consolidamento della parte interna del molo per rendere riparato e sicuro l'ancoraggio all'interno della rada di Palinuro

Premessa

Il porto di Palinuro del comune di Centola rientra tra quelli di rilevanza regionale gestiti dal 1 gennaio 2002 dal Settore demanio marittimo, porti, aeroporti, opere marittime della regione Campania.

È una struttura artificiale ricavata nell'insenatura Nord di Capo Palinuro, delimitata da una riva banchinata lunga circa 190 metri, munita di anelli di ormeggio, e da un molo di sopraflutto lungo circa 160 metri ed è

Il porto è caratterizzato da un discreto traffico diportistico e da una significativa funzione peschereccia.

I confini portuali sono stati individuati con decreto dirigenziale regionale AGC Trasporti e viabilità – Settore Demanio marittimo n. 40 del 03/04/2009 (BURC n. 26 del 04/05/2009) e le sue funzioni dettagliate con decreto dirigenziale regionale AGC Trasporti e viabilità – Settore Demanio marittimo n. 55 del 06/05/2009 (BURC n. 29 del 18/05/2009) (fig. 1).

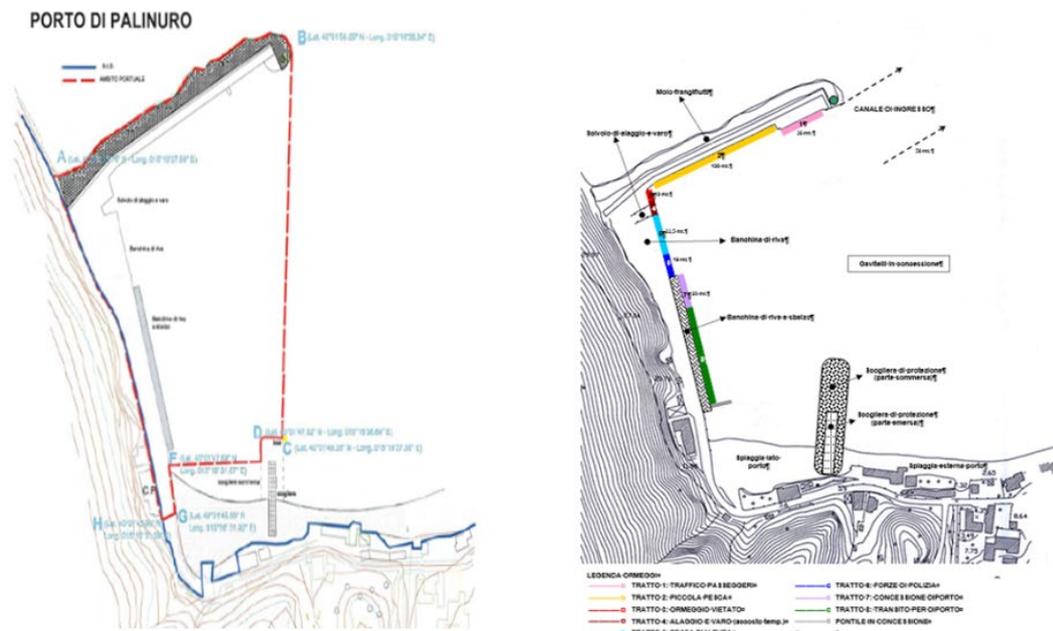


Figura 1 – Ambito portuale e aree di ormeggio

La navigazione, l'ancoraggio e ormeggio, l'accesso, la circolazione e la sosta e le altre attività portuali sono disciplinate dall'ordinanza n°18/2009 dell'Ufficio circondariale marittimo della Guardia costiera di Palinuro con annesso Regolamento.

In particolare l'articolo 7 elenca gli obblighi che le unità navali devono assolvere durante la sosta nel porto:

- in caso di avverse condizioni meteo marine, devono provvedere a rinforzare gli ormeggi anche tramite il servizio eventualmente predisposto dal concessionario di tratti di banchina, ovvero attraverso il servizio di guardiania qualora l'unità navale sia in disarmo o priva di equipaggio;
- nel caso le condizioni meteo marine dovessero peggiorare, devono essere pronte a muovere;
- devono rimanere armate; ed in caso di disarmo, deve essere opportunamente nominato un custode dell'unità, il quale risponderà alle condizioni prescritte dall'Ufficio circondariale marittimo di Palinuro.

Nel 2005, in seguito ad alcune segnalazioni del comune di Centola, che avevano evidenziato che “nel periodo invernale, in seguito a mareggiate di una certa entità, le imbarcazioni ancorate alla banchina di riva avevano subito gravi danni ed alcune erano finanche state sbalzate direttamente sulla banchina” e all’esito di sopralluoghi che avevano confermato che “in concomitanza di condizioni meteomarine sfavorevoli, i natanti ormeggiati nella Rada erano soggetti a sollecitazioni particolarmente gravose tali da rendere necessario l’aumento del grado di sicurezza delle condizioni di ormeggio”, l’Ufficio del Genio Civile per le OO.MM. di Napoli, per conto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, ha avviato “lo studio ed il progetto per rendere sicuro l’ormeggio nel porto di Palinuro”, all’epoca classificato “Rada di 1ª categoria ai fini del rifugio” dal R.D. 30.07.1888, n. 5629 e, pertanto, di interesse nazionale. Questo il motivo per cui gli interventi manutentori alle strutture erano di competenza della Amministrazione statale.

Al fine di progettare le opere necessarie, l’Ufficio Opere Marittime predispose l’esecuzione di indagini e studi propedeutici consistenti in: rilievi topografici e batimetrici per la individuazione dell’effettivo stato dei luoghi, indagini geotecniche corredate da una relazione geotecnica redatta dal prof. ing. Tancredi e da uno studio idraulico marittimo affidato prof. ing. Alberto Noli.

Successivamente, nell’anno 2018 si è provveduto alla rielaborazione del progetto e l’Amministrazione Comunale di Centola, che in seguito ad un protocollo di intesa con l’Ufficio del Genio Civile per le OO.MM. di Napoli si è resa parte diligente per poter proseguire nell’iter di redazione ed acquisizione dei pareri per il progetto, ha dato incarico allo scrivente, prof. ing. Mario Calabrese per l’aggiornamento della relazione meteomarina e lo studio della agitazione residua all’interno del bacino portuale.

Il progetto elaborato è stato, quindi, inviato al Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare – Divisione II – Sistemi di Valutazione Ambientale – per l’avvio del procedimento di Valutazione di Impatto Ambientale ai sensi dell’art. 23 del D.Lgs. 152/2006.

A seguito delle attività di analisi e di valutazione della documentazione presentata, ed in seguito alla riunione tenutasi presso il MATTM in data 14/11/2019, il Coordinatore della Sottocommissione VIA con nota del dicembre 2019 ha avanzato al comune di Centola, proponente del progetto, la richiesta di alcuni approfondimenti progettuali.

Con riferimento agli aspetti relativi all’agitazione ondosa residua all’interno del bacino protetto del porto sono state avanzate le seguenti richieste:

1. Di meglio evidenziare gli eventuali aspetti di sicurezza pubblica, ad esempio la messa in sicurezza del bacino portuale in tutte le condizioni meteo marine, ed altro, che rendono indispensabile la realizzazione delle opere a fronte di perdita degli habitat prioritari.
2. Data la conformazione aperta dell’ancoraggio all’interno della rada di Palinuro, malgrado sia prevedibile, una volta realizzato il progetto, un miglioramento delle condizioni ondose residue interne, non viene accertata la possibilità di ormeggi in sicurezza nelle peggiori condizioni meteomarine. Su tale aspetto si richiede un chiarimento e/o un approfondimento

Studio della agitazione residua all’interno del bacino portuale

La valutazione della agitazione ondosa residua interna all’area portuale nella situazione attuale e di progetto è stata effettuata dal prof. Calabrese mediante l’impiego di un modello numerico capace di riprodurre gli effetti combinati dei fenomeni di shoaling, rifrazione, diffrazione, frangimento, dissipazione al fondo e riflessioni parziali sulle strutture esistenti (allegato 1).

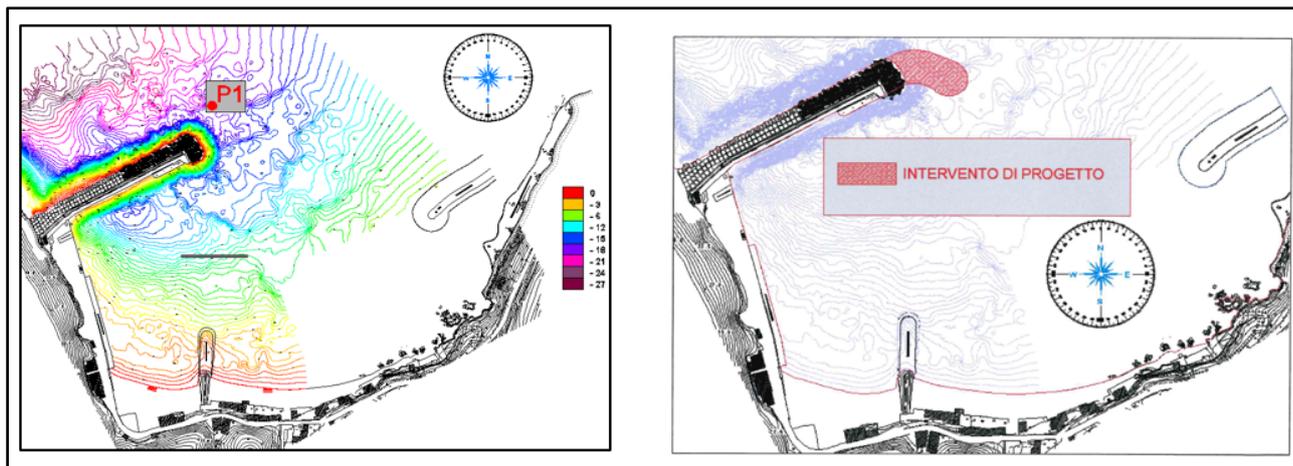


Figura 2 – Porto di Palinuro nella configurazione attuale e in quella di progetto

Il modello utilizzato è basato sulla soluzione numerica dell'equazione di tipo ellittico proposta da Berkhoff (1972) nell'ipotesi di debole pendenza del fondo e onda monocromatica.

I coefficienti di riflessione delle opere perimetrali dello specchio d'acqua adottati nella simulazione sono stati fissati in base all'esperienza ed alle indicazioni comunemente riportate nella letteratura tecnica (fig.3).

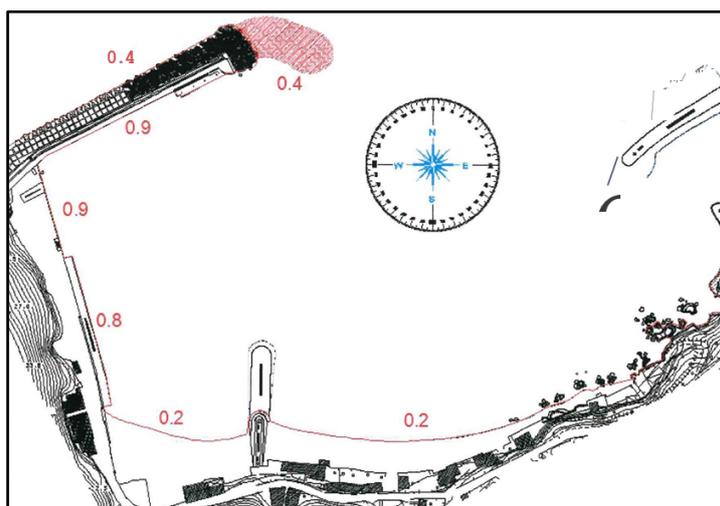


Figura 3– Caratterizzazione delle sponde – coefficienti di riflessione

Per la verifica della funzionalità del bacino portuale si è fatto riferimento alle Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici, edite nel 2002 dalla sezione italiana della Associazione internazionale di navigazione (AIPCN-PIANC), alle indicazioni del *Canadian Manuscript Report of Fisheries and Aquatic Sciences No. 1629* del 1981 e alle raccomandazioni del *PIANC PTC Il Report WG24* del 1995.

Ciò perché non esistono limiti di agitazione ammissibili universalmente riconosciuti.

L'agitazione ammissibile all'accosto dipende da numerosi fattori, i più importanti dei quali sono: la dimensione della imbarcazione, il tipo di ormeggio, il periodo di picco della ondatazione in ingresso, la sua direzione di incidenza rispetto al natante e la sua probabilità di occorrenza.

Occorre poi distinguere tra condizioni limite di funzionalità (operative) e condizioni limite di resistenza (estreme). Le prime comportano, se superate, la perdita di funzionalità dell'ormeggio (difficoltà alle operazioni di ormeggio, usura accelerata, possibile necessità di manutenzione, etc.); le seconde, viceversa, comportano probabili danni alle imbarcazioni e alle strutture ed attrezzature per l'ormeggio.

Le Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici della Associazione internazionale di navigazione (AIPCN-PIANC) suggeriscono *tout-court* valori limite di altezza d'onda significativa ammissibile all'interno del porto (con periodi di picco spettrali compresi tra 2s e 8s) sia per le condizioni operative e sia per quelle estreme, indicate, rispettivamente condizioni di sicurezza e condizioni limite. Vengono anche suggerite condizioni di comfort (fig. 4). Nel caso di direzione di propagazione del moto ondoso parallelo all'asse longitudinale dell'imbarcazione e/o per ormeggio con finger laterali si dà però al progettista la facoltà di aumentare i valori limite raccomandati, non oltre il 50%.

A5. Agitazione interna	
Valori raccomandati della altezza d'onda significativa ammissibile all'interno del porto (con periodi di picco spettrali compresi tra 2 e 8 s):	
-	condizione di "comfort" (particolarmente importante nel caso di porti in cui si prevede la presenza prolungata di persone a bordo delle imbarcazioni): $H_s = 0.15$ m per eventi con frequenza massima complessiva indicativamente non superiore a 5 giorni/anno;
-	condizione di "sicurezza": $H_s = 0.30$ m per eventi con periodo di ritorno indicativamente non inferiore a 5 anni;
-	condizione "limite": $H_s = 0.50$ m per eventi con periodo di ritorno indicativamente non inferiore a 50 anni.

Figura 4. Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici PIANC-AIPCN

Il *Canadian Manuscript Report of Fisheries and Aquatic Sciences No. 1629* tiene conto del periodo di picco e del periodo di ritorno dell'ondazione oltre che della sua direzione rispetto all'imbarcazione. Anche in questo caso si dà al progettista la facoltà di variare i valori limite raccomandati, riducendoli o aumentandoli del 25%. Nel primo caso la capacità di protezione del porto viene definita eccellente nel secondo caso mediocre (fig. 5).

Direzione dell'ondazione rispetto al natante	Periodo di picco dell'ondazione, T, s	Hs, m		
		Periodo di ritorno dell'evento considerato		
		50 anni	1 anno	1 settimana
Frontale	T < 2		0.31	0.30
	2 < T < 6	0.61	0.30	0.15
	6 < T	0.61	0.30	0.15
Laterale	T < 2		0.30	0.30
	2 < T < 6	0.23	0.15	0.08
	6 < T	0.23	0.15	0.08

Figura 5 - Canadian Manuscript Report of Fisheries and Aquatic Sciences No. 1629

Le raccomandazioni del *PIANC PTC II Report WG24* tengono conto anche della lunghezza dell'imbarcazione all'ormeggio e si differenziano se riferite ad onde che hanno bassa frequenza di occorrenza, una volta all'anno, o alle onde estreme (fig. 6).

Wave criteria from small craft				
Length of small craft, pleasure boat m	Maximum wave height criterion, beam/quartering seas		Maximum wave height criterion, head seas	
	T_z s	H_z m	T_z s	H_z m
4 to 10	<2	0.20	<2.5	0.20
	2 to 4	0.10	2.5 to 4	0.15
	>4	0.15	>4	0.20
10 to 16	<3	0.25	<3.5	0.30
	3 to 5	0.15	3.5 to 5.5	0.20
	>5	0.20	>5.5	0.30
20	<4	0.30	<4.5	0.30
	4 to 6	0.15	4.5 to 7	0.25
	>6	0.25	>7	0.30

Wave climate criteria for small craft considering extreme events				
Length of small craft, pleasure boat m	Maximum wave height criterion, beam/quartering seas $T_z > 4$ s		Maximum wave height criterion, head seas $T_z > 4$ s	
	$T_r = 50$ years m	$T_r = 1$ year m	$T_r = 50$ years m	$T_r = 1$ year m
10 to 20	0.30	0.15 to 0.25	0.60	0.20 to 0.30

Figura 6- Indicazioni del PIANC PTC Il Report WG24 (BS 6349-1-1:2013)

Le ondazioni utilizzate nelle simulazioni sono quelle riportate nello studio idraulico-marittimo, calcolate sulla profondità di -18 m s.l.m.m, nel punto P1 prossimo all'imboccatura portuale (fig. 2).

Si è fatto riferimento a stati di mare estremi e a stati di mare caratterizzati da altezze significative con probabilità di occorrenza di 5 giorni/anno per rappresentare gli effetti delle ondazioni intense ma frequenti dell'anno climatico medio. Per quanto riguarda le condizioni estreme, il set di dati a disposizione costituito dai massimi annuali di altezza d'onda significativa - ricavato dalla serie storica dei dati ondametrici trasposti da Ponza al largo di Palinuro, nel punto di coordinate geografiche 15°13.00'E , 40°02.00'N, su una profondità di circa 100 m - adattato alla distribuzione dei valori estremi di Gumbel, ha consentito di ricavare le altezze d'onda significativa con periodo di ritorno di 5, 10, 30 e 50 anni.

Nella seguenti tabelle 1 e 2 sono riportano i valori delle caratteristiche ondose utilizzate.

Periodo di Ritorno T_r [anni]	H_s [m]	T_s [s]	Dir. [°N]
5	6.08	11.22	268
10	6.48	11.58	267
30	6.99	12.03	267
50	7.34	12.32	267

Tabella 1 – Ondazioni estreme all'imboccatura (punto P1)

Frequenza[%]	H_s [m]	T_s [s]	Dir. [°N]
1.37	2.61	5,61	268

Tabella 2 – Ondazione all’imboccatura (punto P1) con probabilità di occorrenza di 5 giorni l’anno

Nelle figure da 3 a 12 della relazione allegata sono graficizzati i risultati delle elaborazioni effettuate sotto forma di isolinee di altezza d’onda residua.

Per procedere poi al confronto con i valori ammissibili suggeriti dalle diverse raccomandazioni tecniche, si è proceduto al calcolo del valor medio della agitazione in ciascuna delle tre diverse aree portuali di ormeggio e, cioè, al molo, alla banchina di riva e al gavitello, indicate, sinteticamente in relazione, zona 1, zona 2 e boe.

Il confronto è riportato nelle tabelle 6,7,8,9 10,12,13 della relazione allegata.

Risposta alle richieste della Commissione

In tabella 3 sono sintetizzati i risultati delle simulazioni effettuate relativi alle condizioni estreme di sollecitazione, assunte, in accordo con le raccomandazioni tecniche di settore, causate da onde estreme con periodo di ritorno cinquantennale. Per ciascuna delle tre diverse aree portuali di ormeggio è riportato il valore medio della agitazione calcolato. E’ riportato inoltre il range di variazione della altezza d’onda che può considerarsi ammissibile alla luce delle diverse raccomandazioni tecniche (insieme intersezione).

H _s (m) all’imboccatura (punto P1)	T _p (s) all’imboccatura (punto P1)	Zona di ormeggio	H _s media (m) (config. attuale)	H _s medio (m) (config. progetto)	H _s amm. (m) (attacco frontale)	H _s amm. (m) (attacco laterale)
7.34	12.32	gavitello	1.30	0.43	0.45-0.76	0.17-0.50
		molo	1.42	0.29		
		banchina	0.40	0.35		

Tabella 3 – Ondazioni relative al periodo di ritorno Tr=50 anni

Si nota che, nella **configurazione attuale**, il livello di agitazione al molo e nella zona dei gavitelli indotto dalle onde cinquantennali è molto maggiore di quello raccomandato.

Nella **configurazione di progetto**, viceversa, il prolungamento del sopraflutti fa sì che in tutte le zone di ormeggio il valore dell’agitazione si riduca a valori in linea con quelli ammissibili.

Poiché, tuttavia, l’agitazione tollerabile non può prescindere dalla modalità di ormeggio e dalla dimensione delle imbarcazioni. si suggerisce, comunque, in linea con la regola dell’arte, di orientare gli ormeggi in modo che le barche siano quanto più possibile allineate parallelamente alla direzione di provenienza delle onde maggiori e di disporre le imbarcazioni minori nelle aree più ridossate.

A tal riguardo, infatti, come mostrato in precedenza, il *Canadian Manuscript Report of Fisheries and Aquatic Sciences No. 1629*, indica, per il caso di eventi meteomarinari estremi con periodo di ritorno cinquantennale, in $0.17m \leq H_s \leq 0.29m$ l’altezza d’onda significativa ammissibile all’ormeggio, in un marina destinato ad accogliere piccole imbarcazioni, nel caso di direzione dell’ondazione laterale rispetto al natante, mentre il *PIANC PTC II Report WG24* del 1995 indica il valore $H_s=0.3m$ ma considera imbarcazioni di lunghezza superiore a 10 m. Non così le raccomandazioni tecniche italiane per la progettazione dei porti turistici della Associazione internazionale di navigazione (AIPCN-PIANC) che suggeriscono un valori limite $H_s=0.5m$ di altezza d’onda significativa ammissibile all’interno del porto prescindendo sia dalla direzione di incidenza dell’onda sul natante sia dalla lunghezza della imbarcazione.

Infine, tenuto conto che il Porto di Palinuro è prevalentemente utilizzato durante la stagione estiva, essendo la flotta stanziale limitata a poche unità che possono facilmente ormeggiare nelle zone più ridossate, si è provveduto anche a verificare gli effetti sulla agibilità degli ormeggi delle onde estreme con periodo di ritorno cinquantennale del periodo maggio – settembre.

I risultati sono riportati in tab.4 e fig.7.

H _s (m) (all'imboccatura punto P1)	T _p (s) (all'imboccatura punto P1)	Zona di ormeggio	H _s medio (m) (config. di progetto)
5.65	10.12	gavitello	0.33
		molo	0.25
		banchina	0.27

Tabella 3 – Ondazioni relative al periodo di ritorno Tr=50 anni – periodo maggio-settembre

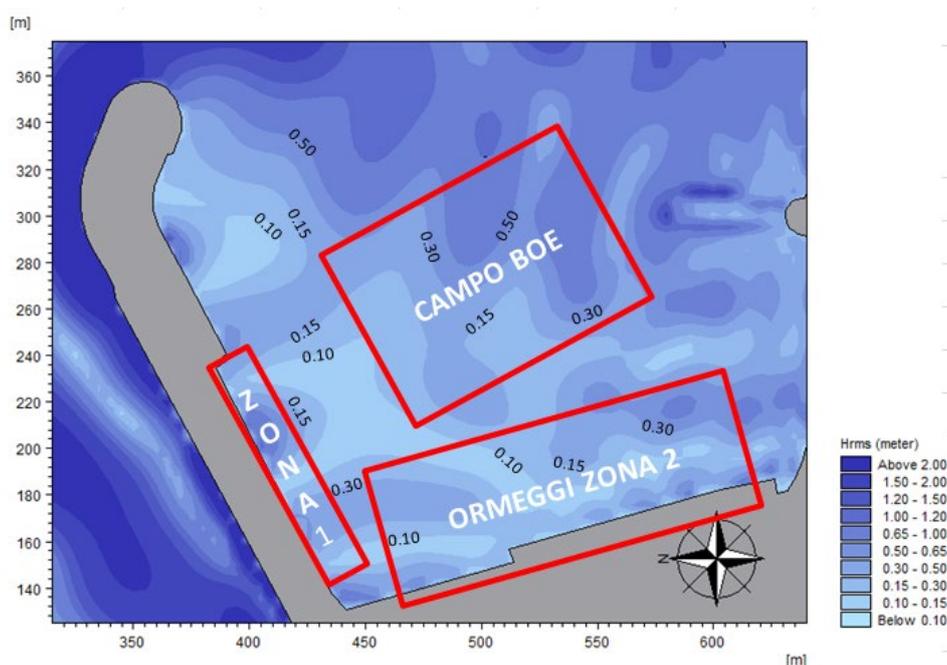


Figura 7 - Onda stagionale con Tr 50 anni - situazione di progetto

Conclusioni

Le simulazioni effettuate hanno evidenziato, nei riguardi “degli eventuali aspetti di sicurezza pubblica” che nella configurazione attuale il livello di agitazione al molo e nella zona dei gavitelli indotto dalle onde cinquantennali è molto maggiore di quello raccomandato dalla letteratura di settore. Pertanto è da escludersi la possibilità dell’ormeggio in sicurezza nelle peggiori condizioni meteomarine.

Nella configurazione di progetto, viceversa, le simulazioni hanno messo in evidenza un deciso miglioramento delle condizioni di sicurezza del bacino portuale nei confronti della penetrazione del moto ondoso incidente in tutte le condizioni meteomarine. Il prolungamento del sopraflutti, infatti, fa sì che il livello di agitazione indotto dalle onde cinquantennali in tutte le zone di ormeggio si riduca a valori in linea con quelli ammissibili suggeriti dalla letteratura di settore.

Le realizzazione dell’opera risulta pertanto indispensabile per garantire l’ormeggio in sicurezza.

Mario Calabrese

(prof. ing. Mario Calabrese)

Allegato: Relazione Specialistica di Ingegneria Marittima del luglio 2018



COMUNE DI CENTOLA

PROVINCIA DI SALERNO

PROTOCOLLO GENERALE

Prot. n. 10992 Data 09/08/2018

Comune di Centola

Provincia di Salerno

LAVORI DI PROLUNGAMENTO DELLA TESTATA DEL MOLO
E DI AMPLIAMENTO E CONSOLIDAMENTO DELLA PARTE INTERA DEL MOLO
PER RENDERE RIPARATO E SICURO L'ANCORAGGIO
ALL'INTERNO DELLA RADA DI PALINURO

SERVIZIO DI CONSULENZA SPECIALISTICA
PER LA REDAZIONE DELLA RELAZIONE METEOMARINA
E DELLA RELAZIONE DI INGEGNERIA MARITTIMA

CUP: B94B16000040002 – CIG: Z2D1F59A65



Relazione Specialistica di Ingegneria Marittima

Il Consulente

Prof. Mario Calabrese

LUGLIO 2018

INDICE

1. PREMESSA	3
2. STUDIO DELL'AGITAZIONE RESIDUA ALL'INTERNO DEL BACINO PORTUALE	4
2.1. Condizioni ondose utilizzate per la valutazione della agitazione interna	4
2.2. Il modello utilizzato	4
2.3. Coefficienti di riflessione	7
3. RISULTATI DEL MODELLO DI SIMULAZIONE	8
3.1. Valori di agitazione ammissibili per approdi turistici	8
3.2. Risultati della simulazione	10
3.3. Analisi dei risultati	15

1. PREMESSA

L'Amministrazione Comunale del Comune di Centola, con determina n.205 del 14/09/2017/ a firma del Responsabile del servizio Area tecnica lavori pubblici, ha affidato allo scrivente “un servizio di consulenza specialistica per la redazione della relazione meteomarina e della relazione di ingegneria marittima necessaria per l'aggiornamento del progetto definitivo redatto all'Ufficio OO.MM. di Napoli” riguardante *i lavori di prolungamento della testata del molo e di ampliamento e consolidamento della parte interna del molo per rendere riparato e sicuro l'ancoraggio all'interno della rada di Palinuro del comune di Centola (SA).*

Nella presente relazione sono riassunte le analisi effettuate finalizzate alla valutazione dell'agitazione ondosa residua all'interno del bacino protetto di Palinuro e alla determinazione delle condizioni operative limite degli ormeggi.

Gli stati di mare convenzionali utilizzati nelle verifiche sono stati desunti da risultati dello studio idraulico-marittimo.

La Fig. 1 riporta il layout portuale analizzato.

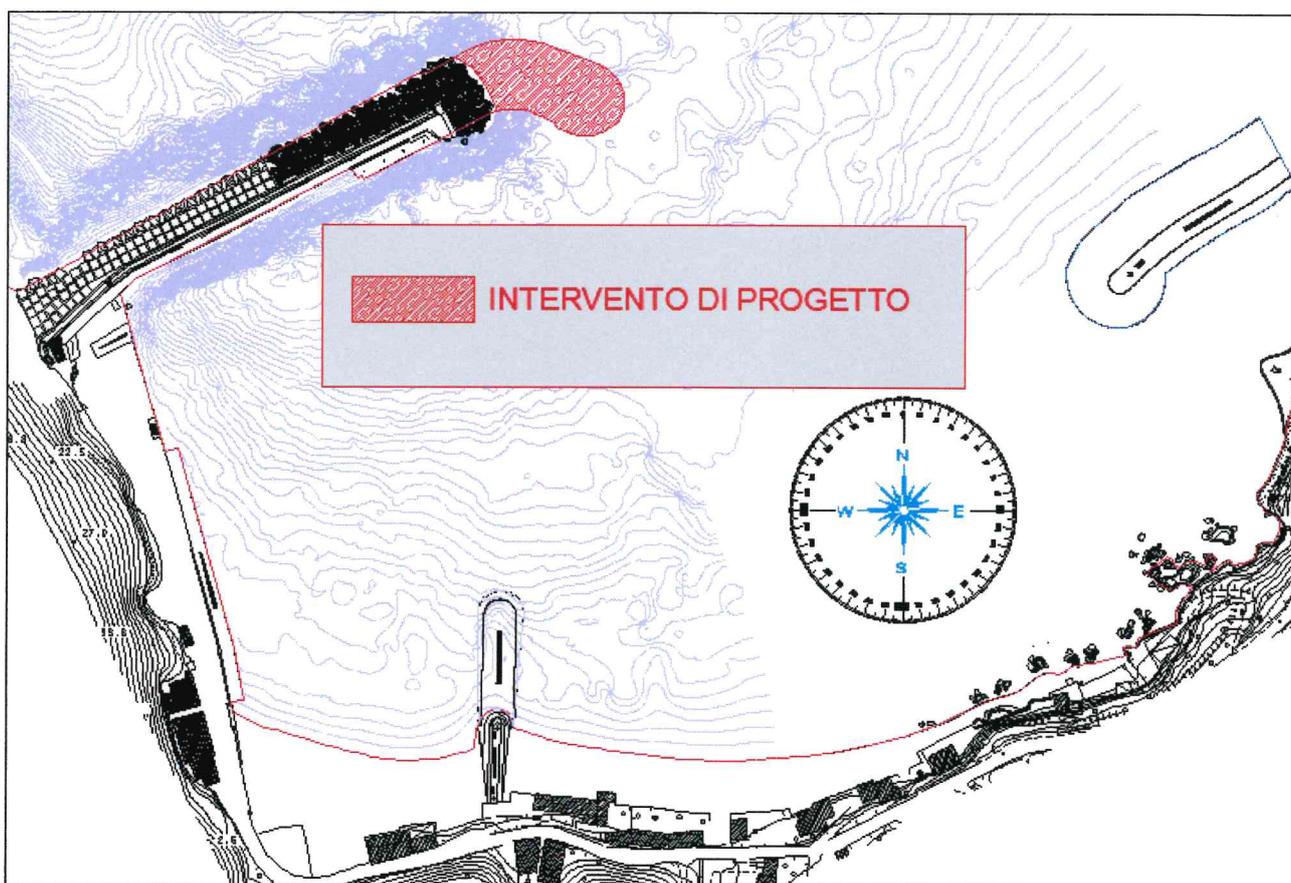


Figura 1 – Layout portuale

2. STUDIO DELL'AGITAZIONE RESIDUA ALL'INTERNO DEL BACINO PORTUALE

2.1. Condizioni ondose utilizzate per la valutazione della agitazione interna

Le ondazioni utilizzate nelle simulazioni sono quelle estreme sulla profondità di -18 m s.l.m.m prossima all'imboccatura portuale, riportate nello studio idraulico-marittimo.

Nella seguente Tabella 1 sono riportati i valori delle caratteristiche ondose calcolate con periodo di ritorno di 5, 10, 30 e 50 anni.

Periodo di Ritorno Tr [anni]	Hs [m]	Tp [s]	Dir. [°N]
5	6.08	11.22	268
10	6.48	11.58	267
30	6.99	12.03	267
50	7.34	12.32	267

Tabella 1 – Ondazioni estreme sottocosta

Nella Tabella 2, invece, sono viceversa riportate le caratteristiche dello stato di mare convenzionale di progetto sulla profondità di -18 m s.l.m.m. con probabilità di superamento di 5 giorni/anno.

F(H)	H [m]	Giorni di Superamento in 1 anno
0.981	2.61	5.00

Tabella 2 – Onda con probabilità di superamento di 5 giorni l'anno

2.2. Il modello utilizzato

La valutazione della agitazione ondosa residua nell'area portuale è stata effettuata mediante l'impiego di un modello numerico capace di riprodurre gli effetti combinati di tutti i più importanti fenomeni che concorrono a determinare l'agitazione portuale e cioè shoaling, rifrazione, diffrazione, frangimento, dissipazione al fondo e riflessioni parziali sulle strutture esistenti

Il modello è basato sulla soluzione numerica dell'equazione di tipo ellittico proposta da Berkhoff (1972) nell'ipotesi di debole pendenza del fondo e onda monocromatica. L'equazione proposta da Berkhoff, trascurando tutte le perdite di energia, può essere scritta come:

$$\nabla(cc_g \nabla \xi) - \frac{c_g}{c} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = 0$$

dove $\xi(x, y, t)$ è l'elevazione dell'onda, c è la celerità dell'onda singola, c_g è la celerità di gruppo e ∇ è l'operatore gradiente nel piano orizzontale.

La celerità dell'onda e la celerità di gruppo sono funzioni della profondità $d(x, y)$ attraverso le relazioni:

$$c^2 = \frac{g}{k} \tanh(kd)$$

$$c_g = \frac{1}{2} c \left[1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right]$$

in cui k è il numero d'onda.

Nel modello l'equazione di Berkhoff viene trasformata in un sistema differenziale iperbolico del primo ordine, che è molto simile come struttura al sistema di equazioni che governano le shallow water. La soluzione stazionaria dell'equazione di Berkhoff viene raggiunta, per t tendente all'infinito, da un moto non stazionario in cui l'onda entrante, armonica, è assegnata come condizione al contorno. Come mostrato da Copeland (1985), l'equazione di Berkhoff può essere riscritta come sistema differenziale del primo ordine introducendo gli pseudo-flussi, in direzione x e y , P^* e Q^* :

$$\frac{\partial P^*}{\partial t} + cc_g \frac{\partial \xi}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial Q^*}{\partial t} + cc_g \frac{\partial \xi}{\partial y} = 0$$

$$\frac{c_g}{c} \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial P^*}{\partial x} + \frac{\partial Q^*}{\partial y} = 0$$

dove $P^*(x, y, z)$ è lo pseudo-flusso nella direzione x e $Q^*(x, y, z)$ è lo pseudo-flusso nella direzione y , [$m^3/s/m$].

Questo sistema è simile alle equazioni della quantità di moto e di continuità che governano il moto delle onde lunghe in acque basse comunemente chiamate shallow water. L'integrazione nel tempo delle equazioni conduce alla condizione stazionaria, soluzione dell'equazione ellittica di partenza. La variazione armonica nel tempo può essere evidenziata ponendo:

$$\xi = S(x, y, t)e^{i\omega t}$$

$$Q^* = Q(x, y, t)e^{i\omega t}$$

$$P^* = P(x, y, t)e^{i\omega t}$$

dove $\omega = 2\pi/T$, i è l'unità immaginaria e S , P e Q sono funzioni complesse di x, y e t .

Si può ritenere che la dipendenza dal tempo delle funzioni S, P e Q sia debole a causa della procedura di soluzione (iterazioni verso la soluzione stazionaria, che è indipendente dal tempo).

Generalizzando l'equazione di continuità per includere la generazione interna dell'onda (termine sorgente), si ottengono le seguenti equazioni:

$$\begin{aligned}\frac{c_g}{c} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{c_g}{c} i\omega P + c_g^2 \frac{\partial S}{\partial x} &= 0 \\ \frac{c_g}{c} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{c_g}{c} i\omega Q + c_g^2 \frac{\partial S}{\partial y} &= 0 \\ \frac{c_g}{c} \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{c_g}{c} i\omega S + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} &= SS\end{aligned}$$

dove SS è il termine sorgente che genera l'onda progressiva.

L'onda armonica è generata internamente alla frontiera del dominio usando il termine sorgente SS nell'equazione di bilancio di massa. Le condizioni al contorno consistono nello specificare la posizione dell'onda entrante nell'area di interesse e le sue caratteristiche. La posizione dell'onda entrante è assegnata specificando i due punti d'estremità della linea del fronte. Lo pseudo-flusso entrante vale:

$$q_{\text{wave}} = c_g \xi(t)$$

Si osserva che nel periodo T il flusso netto è nullo, coerentemente con la teoria lineare assunta, che non prevede trasporto di massa associato all'onda progressiva, e che a passare del tempo t la forma si propaga nel dominio.

La riflessione parziale è stata trattata da Mansen e Larsen (1987) generalizzando l'equazione di Berkhoff nell'ipotesi di onda che incontra un'opera verticale, trattabile come mezzo poroso. Le equazioni proposte includono un termine di attrito al fondo f_n lineare, che descrive le perdite di energia, laminari e turbolente, entro la struttura porosa e che risulta dipendere dalle seguenti grandezze: la porosità n, la larghezza dell'opera, il diametro dei massi, il periodo e l'ampiezza dell'onda. Si consiglia di porre davanti la struttura riflettente, una serie di punti con assegnato coefficiente di attrito f_n , ricavabile nota la geometria dell'opera (coefficiente di riflessione $c_r = \alpha_r/\alpha_i$) e il fondale davanti l'opera. Le equazioni finali si possono scrivere come:

$$\begin{aligned}\frac{1}{n} \frac{c_g}{c} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{c_g \omega}{c n} (i + f_n) P + c_g^2 \frac{\partial S}{\partial x} &= 0 \\ \frac{1}{n} \frac{c_g}{c} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{c_g \omega}{c n} (i + f_n) Q + c_g^2 \frac{\partial S}{\partial y} &= 0 \\ n \frac{c_g}{c} \frac{\partial S}{\partial t} + n \frac{c_g}{c} i\omega S + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} &= SS\end{aligned}$$

dove n è la porosità.

Un quasi perfetto assorbimento dell'onda può essere ottenuto usando la procedura descritta da Larsen e Dancy (1983). Questa tecnica è basata sul concetto di smorzamento artificiale che viene introdotto nelle equazioni mediante un coefficiente d'attrito, f_s , assegnato ad una serie di punti posti davanti alla frontiera chiusa (impermeabile) senza capacità riflettente.

Le equazioni finali che si ottengono sono:

$$\begin{aligned}\frac{c_g}{c} \frac{\partial P}{\partial t} + \left(\frac{c_g}{c} i\omega + f_s \right) P + c_g^2 \frac{\partial S}{\partial x} &= 0 \\ \frac{c_g}{c} \frac{\partial Q}{\partial t} + \left(\frac{c_g}{c} i\omega + f_s \right) Q + c_g^2 \frac{\partial S}{\partial y} &= 0 \\ \frac{c_g}{c} \frac{\partial S}{\partial t} + \left(\frac{c_g}{c} i\omega + f_s \right) S + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} &= SS\end{aligned}$$

e vengono risolte con uno schema alle differenze finite di tipo implicito su una griglia rettangolare regolare nelle variabili complesse S, P e Q.

L'algoritmo risolutivo segue uno schema di tipo Double-Sweep con possibilità di scelta automatica del Δt di calcolo in modo da garantire un numero di Courant prossimo all'unità e quindi minimizzare il numero di iterazioni necessarie a raggiungere la condizione stazionaria.

2.3. Coefficienti di riflessione

I coefficienti di riflessione delle opere perimetrali dello specchio d'acqua, adottati nel modello di simulazione della penetrazione ondosa nel porto, sono stati fissati in base all'esperienza ed alle indicazioni comunemente riportate nella letteratura tecnica.

In particolare sono stati prescelti i seguenti valori per i vari segmenti perimetrali di contorno del porto:

- Paramenti di opere a gettata $K_r = 0.4$
- Paramenti di banchine interne $K_r = 0.90$ (valore cautelativo)
- Paramenti di banchine interne su pali $K_r = 0.80$ (valore cautelativo)

In corrispondenza del tratto di costa basso e laddove sono presenti delle spiagge si è previsto un coefficiente di riflessione pari al 20% per considerare l'effetto assorbente delle stesse (Fig. 3).

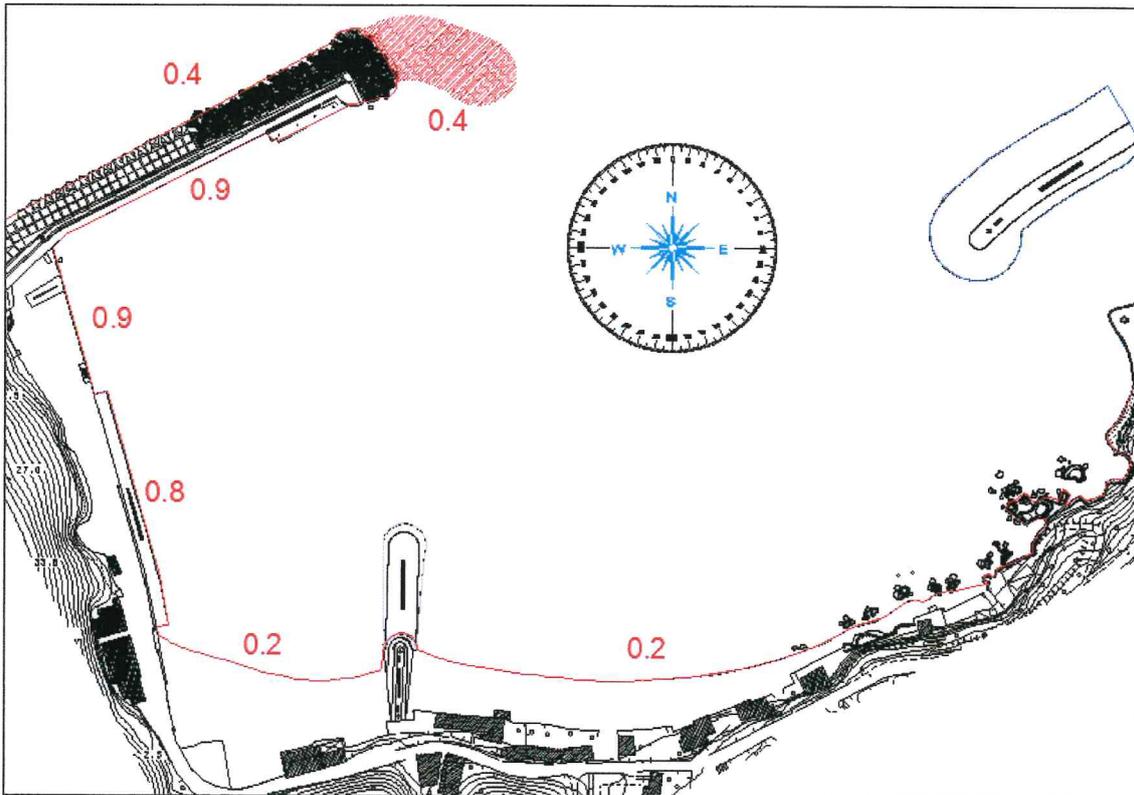


Figura 2 – Coefficienti di riflessione

3. RISULTATI DEL MODELLO DI SIMULAZIONE

Nel presente capitolo si riportano in forma tabellare e grafica i risultati ottenuti dalla simulazione numerica.

Si è provveduto al confronto tra i valori ottenuti riferiti all'attuale layout portuale e a quello di progetto.

Inoltre, l'agitazione prodotta dalle onde entranti dall'imboccatura è stata confrontata, in alcuni punti caratteristici, con quella ammissibile suggerita dalla letteratura di settore.

3.1. Valori di agitazione ammissibili per approdi turistici

La verifica della funzionalità idraulica delle aree più interne del bacino portuale, nei riguardi della penetrazione del moto ondoso, è stata condotta facendo riferimento preliminarmente alle indicazioni riportate nelle "Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici", edite nel 2002 dalla sezione italiana della Associazione internazionale di navigazione (AIPCN-PIANC).

A tal riguardo l'AIPCN raccomanda i seguenti valori dell'altezza d'onda significativa ammissibile all'interno del porto:

- *condizione di comfort*: $H_s = 0.15$ m per eventi con frequenza massima complessiva indicativamente non superiore a 5 giorni / anno;
- *condizione di sicurezza*: $H_s = 0.30$ m per eventi con periodo di ritorno non inferiore a 5 anni;
- *condizione limite*: $H_s = 0.50$ m per eventi con periodo di ritorno non inferiore a 50 anni.

Nello studio sono state inoltre considerate le indicazioni del *Canadian Manuscript Report of Fisheries and Aquatic Sciences No. 1629* del 1981 riepilogate nella seguente Tabella 3.

Direzione dell'ondazione rispetto al natante	Periodo di picco dell'ondazione, T, s	Hs, m		
		Periodo di ritorno dell'evento considerato		
		50 anni	1 anno	1 settimana
Frontale	T<2		0.31	0.30
	2<T<6	0.61	0.30	0.15
	6<T	0.61	0.30	0.15
Laterale	T<2		0.30	0.30
	2<T<6	0.23	0.15	0.08
	6<T	0.23	0.15	0.08

Tab.3 – Indicazioni del *Canadian Manuscript Report of Fisheries and Aquatic Sciences No. 1629*

Infine, si sono anche considerate le raccomandazioni del *PIANC PTC II Report WG24* riportate in Tabella 4.

Wave criteria from small craft				
Length of small craft, pleasure boat m	Maximum wave height criterion, beam/quartering seas		Maximum wave height criterion, head seas	
	T_z s	H_c m	T_z s	H_s m
4 to 10	<2	0.20	<2.5	0.20
	2 to 4	0.10	2.5 to 4	0.15
	>4	0.15	>4	0.20
10 to 16	<3	0.25	<3.5	0.30
	3 to 5	0.15	3.5 to 5.5	0.20
	>5	0.20	>5.5	0.30
20	<4	0.30	<4.5	0.30
	4 to 6	0.15	4.5 to 7	0.25
	>6	0.25	>7	0.30

Tab. 4 – Indicazioni del *PIANC PTC II Report WG24*

Wave climate criteria for small craft considering extreme events				
Length of small craft, pleasure boat m	Maximum wave height criterion, beam/quartering seas $T_z > 4$ s		Maximum wave height criterion, head seas $T_z > 4$ s	
	$T_r = 50$ years m	$T_r = 1$ year m	$T_r = 50$ years m	$T_r = 1$ year m
10 to 20	0.30	0.15 to 0.25	0.60	0.20 to 0.30

Tab. 5 – Indicazioni del *PIANC PTC II Report WG24*

Le raccomandazioni del *Canadian Manuscript Report of Fisheries and Aquatic Sciences* e del *PIANC PTC II Report WG24* tengono conto della lunghezza del natante e della direzione dell'ondazione rispetto al natante.

3.2. Risultati della simulazione

Per ciascuna zona di ormeggio, in cui è stata suddivisa l'area portuale, con riferimento sia al layout portuale attuale sia a quello di progetto, nelle Figure da 3 a 12 sono riportati i valori di altezza d'onda ricavati dalle simulazioni numeriche effettuate.

Come si evince dalle figure, lo studio sembra indicare come l'estensione e la deviazione planimetrica proposta per l'opera a gettata del layout di progetto offra una buona protezione dal moto ondoso incidente in tutte le zone dove sono previsti degli ormeggi.

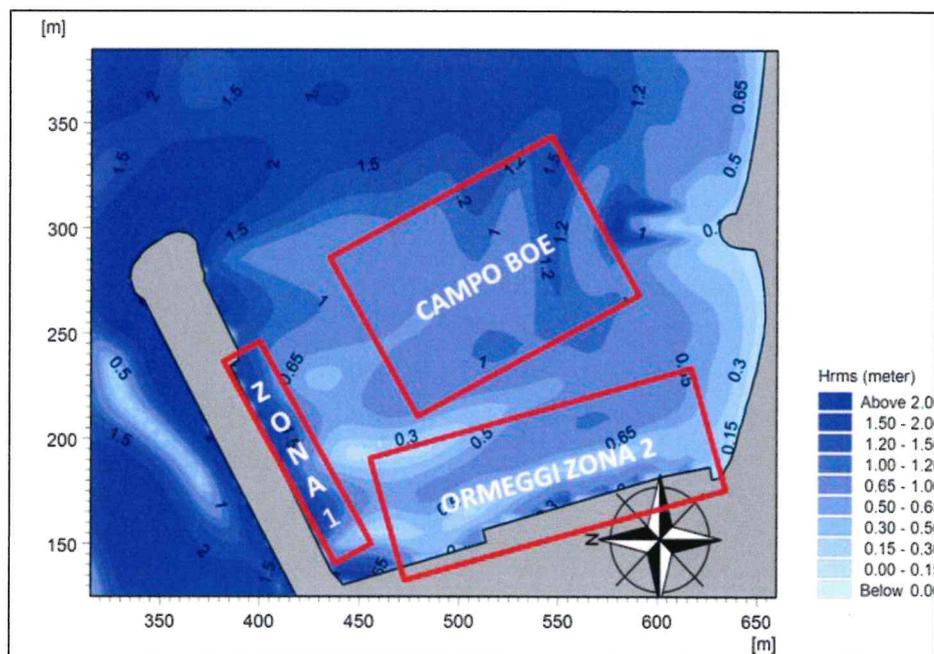


Figura 3– Onda con frequenza massima non superiore a 5 giorni/anno situazione attuale

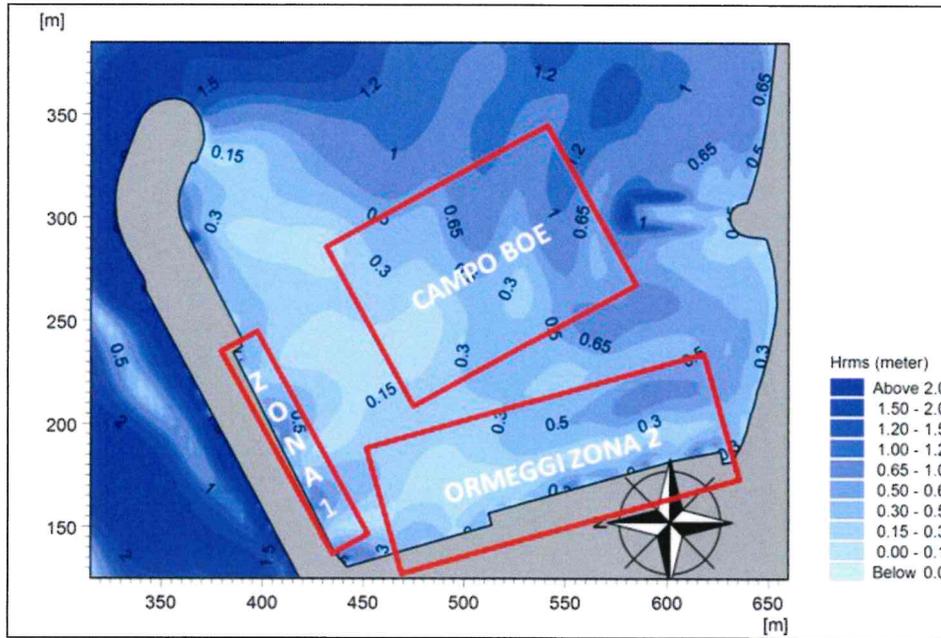


Figura 4 – Onda con frequenza massima non superiore a 5 giorni/anno situazione di progetto

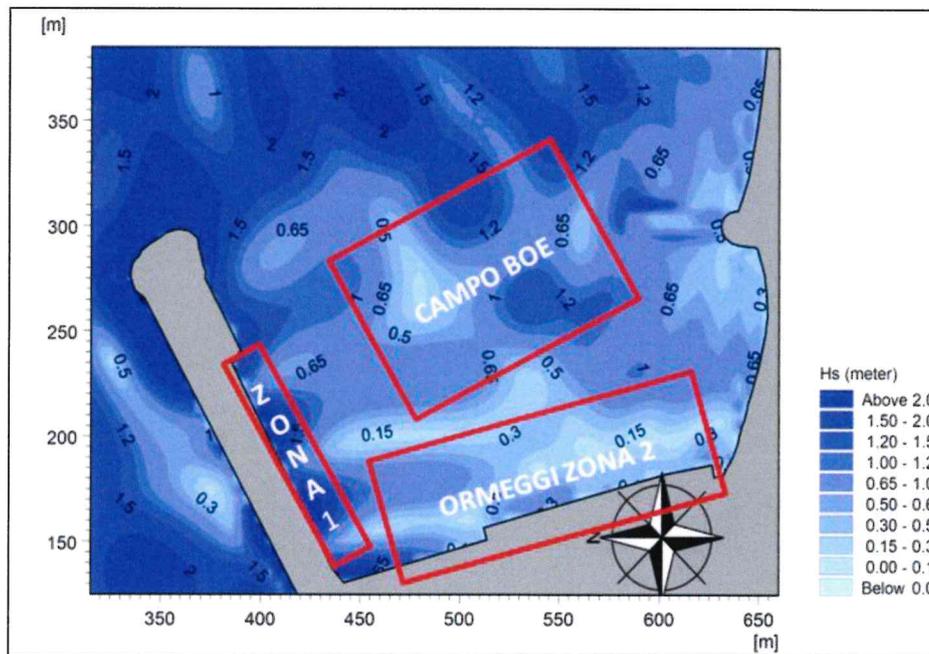


Figura 5 – Onda con Tr 5 anni situazione attuale

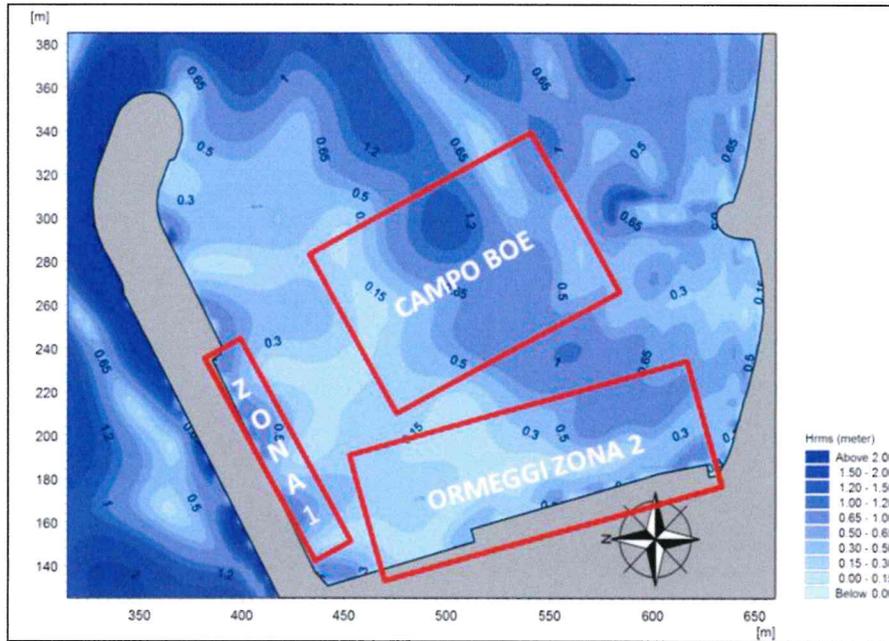


Figura 6 – Onda con Tr 5 anni situazione di progetto

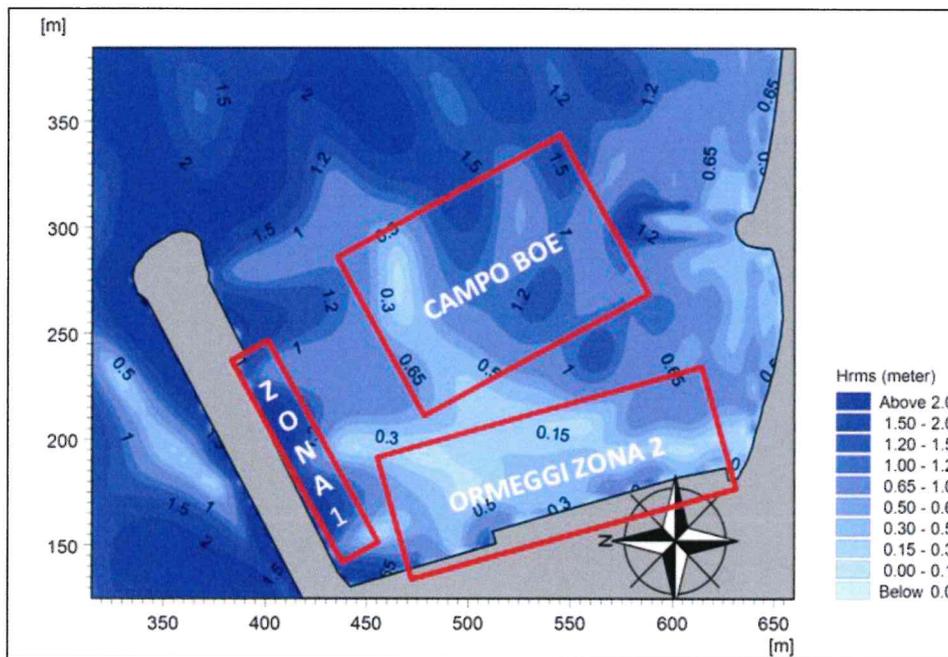


Figura 7 – Onda con Tr 10 anni situazione attuale

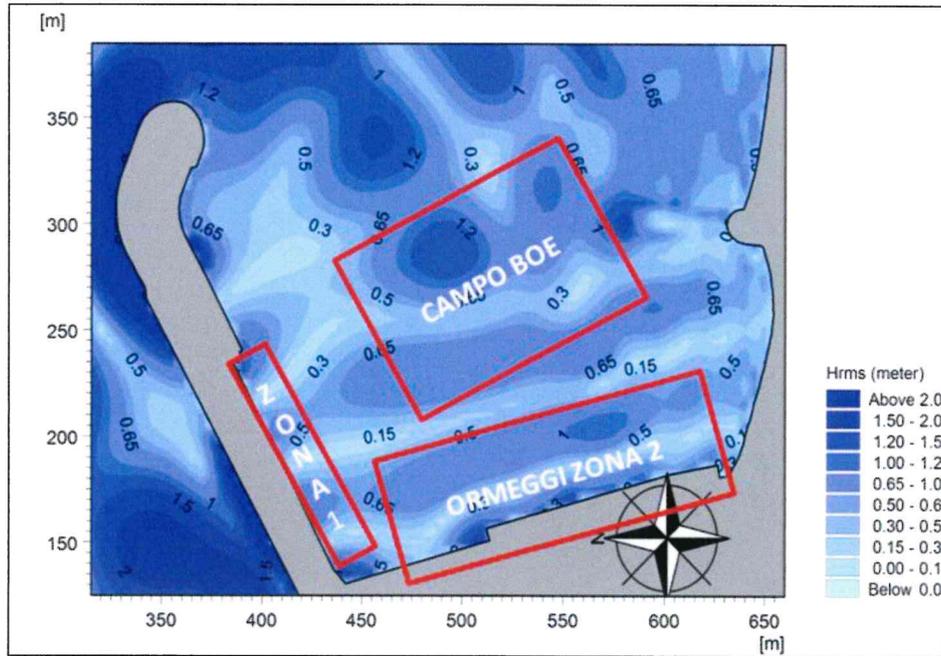


Figura 8 – Onda con Tr 10 anni situazione di progetto

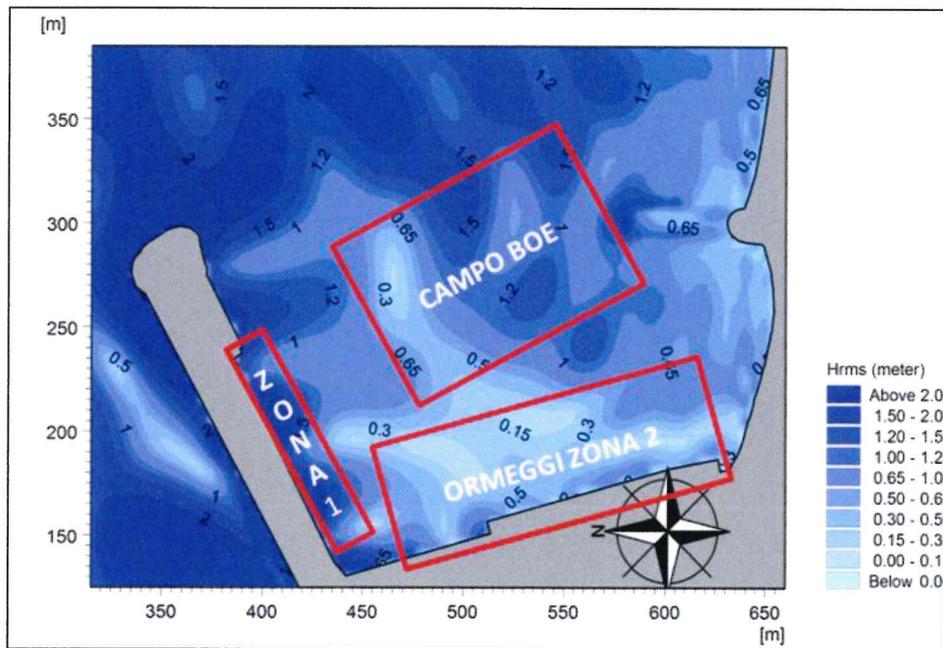


Figura 9 – Onda con Tr 30 anni situazione attuale

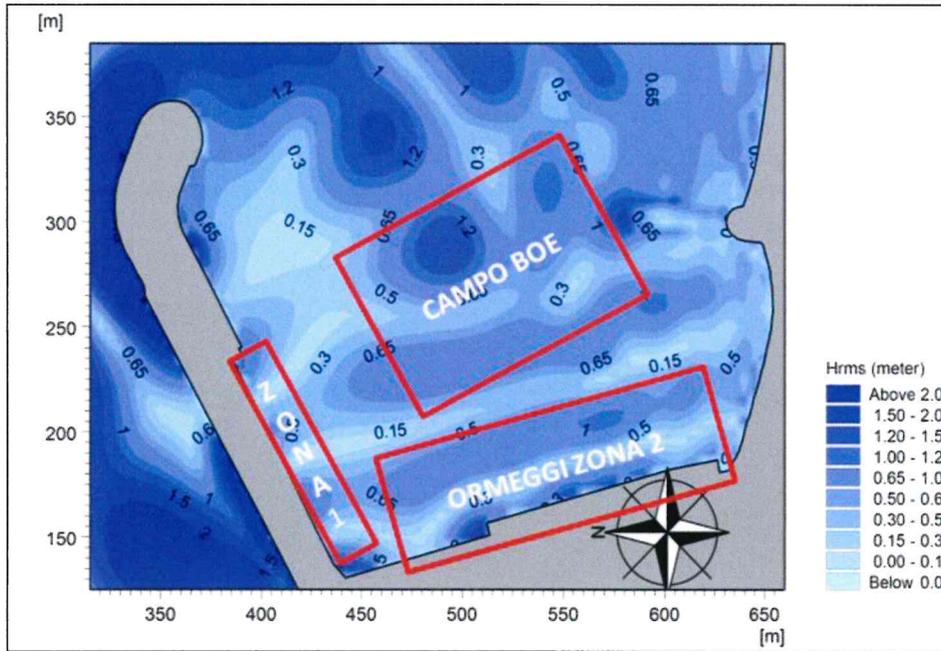


Figura 10 – Onda con Tr 30 anni situazione di progetto

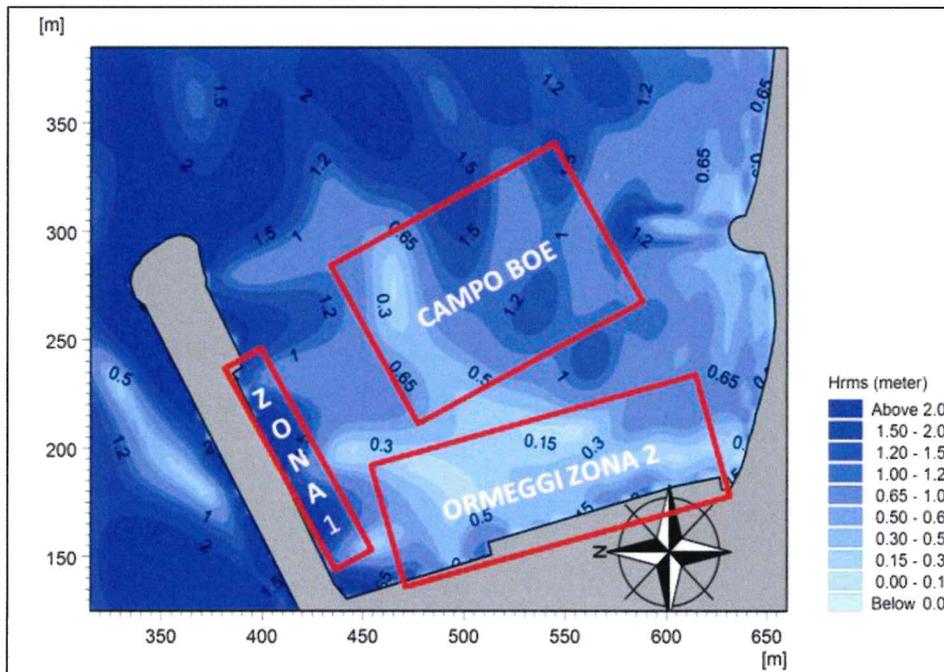


Figura 11 – Onda con Tr 50 anni situazione attuale

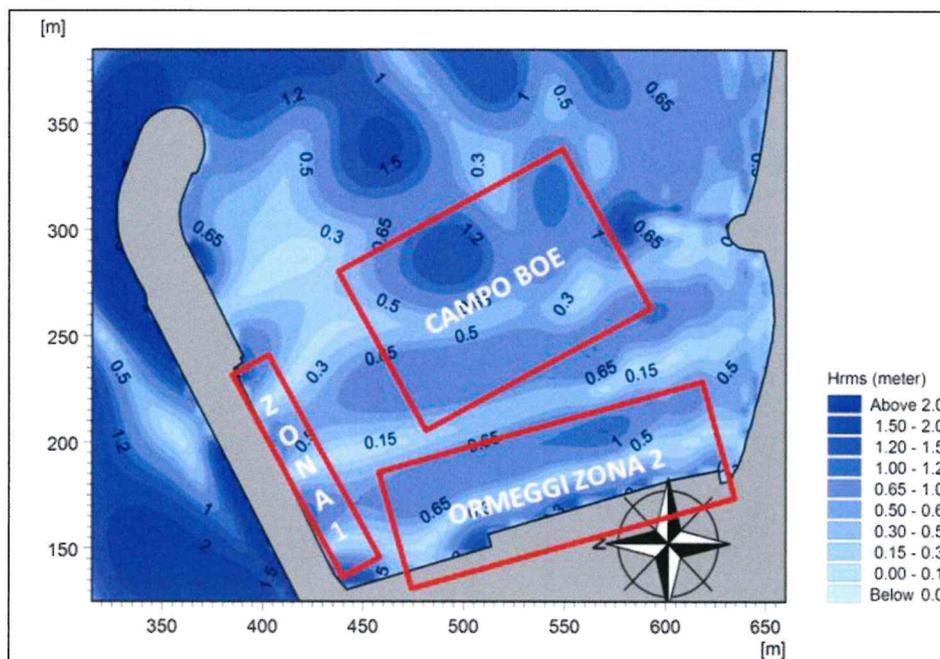


Figura 12 – Onda con Tr 50 anni situazione di progetto

3.3. Analisi dei risultati

Nelle seguenti Tabelle da 6 a 10, con riferimento ai valori medi di altezza d'onda calcolati in ciascuna zona di ormeggio selezionata, sono confrontati i risultati ottenuti con quelli ritenuti ammissibili dalle "Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici" dell'AIPCN.

Zona	Hs incidente	Tp incidente	Hmean (attuale)	Hmean (progetto)	Condizione confort ammissibile AIPCN
campo boe	2.61	7.54	1.15	0.19	0.15
zona ormeggio 1	2.61	7.54	1.3	0.17	0.15
zona ormeggio 2	2.61	7.54	0.3	0.13	0.15

Tabella 6 - Onda con frequenza massima non superiore a 5 giorni/anno con riferimento ai limiti AIPCN

Zona	Hs incidente	Tp incidente	Hmean (attuale)	Hmean (progetto)	Condizione sicurezza ammissibile AIPCN
campo boe	6.08	11.22	1.15	0.36	0.3
zona ormeggio 1	6.08	11.22	1.37	0.25	0.3
zona ormeggio 2	6.08	11.22	0.31	0.28	0.3

Tabella 7 - Onda con Tr 5 anni con riferimento ai limiti AIPCN

Zona	Hs incidente	Tp incidente	Hmean (attuale)	Hmean (progetto)	Condizione sicurezza ammissibile AIPCN
campo boe	6.48	11.58	1.18	0.38	0.3
zona ormeggio 1	6.48	11.58	1.41	0.25	0.3
zona ormeggio 2	6.48	11.58	0.33	0.29	0.3

Tabella 8 - Onda con Tr 10 anni con riferimento ai limiti AIPCN

Zona	Hs incidente	Tp incidente	Hmean (attuale)	Hmean (progetto)	Condizione sicurezza ammissibile AIPCN
campo boe	6.99	12.03	1.26	0.39	0.3
zona ormeggio 1	6.99	12.03	1.41	0.25	0.3
zona ormeggio 2	6.99	12.03	0.42	0.32	0.3

Tabella 9 - Onda con Tr 30 anni l con riferimento ai limiti AIPCN

Zona	Hs incidente	Tp incidente	Hmean (attuale)	Hmean (progetto)	Condizione sicurezza ammissibile AIPCN	Hmean (progetto)	Limite operativo ammissibile AIPCN
campo boe	7.34	12.32	1.3	0.43	0.3	0.43	0.5
ormeggio 1	7.34	12.32	1.42	0.25	0.3	0.25	0.5
ormeggio 2	7.34	12.32	0.4	0.35	0.3	0.35	0.5

Tabella 10 - Onda con Tr 50 anni con riferimento ai limiti AIPCN

In tabella 12 è riportato il confronto con le Secondo le indicazioni del *Canadian Manuscript Report of Fisheries and Aquatic Sciences No. 1629* del 1981, utilizzando onde con con periodo di ritorno pari a 50 anni e periodo di picco superiore a 6 secondi.

Direzione dell'ondazione rispetto al natante	Periodo di picco dell'ondazione, T, s	Hs, m		
		Periodo di ritorno dell'evento considerato		
		50 anni	1 anno	1 settimana
Frontale	T<2		0.31	0.30
	2<T<6	0.61	0.30	0.15
	6<T	0.61	0.30	0.15
Laterale	T<2		0.30	0.30
	2<T<6	0.23	0.15	0.08
	6<T	0.23	0.15	0.08

Tabella 11 – Indicazioni del *Canadian Manuscript Report of Fisheries and Aquatic Sciences*

Zona	Hs incidente	Tp incidente	Hmean (progetto)	Condizione ammissibile Beam	Condizione ammissibile Head
campo boe	7.34	12.32	0.43	0.23	0.61
ormeggio 1	7.34	12.32	0.25	0.23	0.61
ormeggio 2	7.34	12.32	0.35	0.23	0.61

Tabella 12 – Verifica delle condizioni ondose residue con riferimento al Canadian Manuscript Report

Infine in Tabella 13 è riportato il confronto con le raccomandazioni del *PIANC PTC II Report WG24*.

Caratteristiche all'imbocco					barche 4-10m		barche 10-16m		barche 20m	
Tr [anni]	zona	Hs [m]	Tp [s]	Hs mean	Beam	Head	Beam	Head	Beam	Head
5	C. boe	6.08	11.22	0.36	0.15	0.2	0.2	0.3	0.25	0.3
5	Zona 1	6.08	11.22	0.25	0.15	0.2	0.2	0.3	0.25	0.3
5	Zona 2	6.08	11.22	0.28	0.15	0.2	0.2	0.3	0.25	0.3
10	C. boe	6.48	11.58	0.38	0.15	0.2	0.2	0.3	0.25	0.3
10	Zona 1	6.48	11.58	0.25	0.15	0.2	0.2	0.3	0.25	0.3
10	Zona 2	6.48	11.58	0.29	0.15	0.2	0.2	0.3	0.25	0.3
30	C. boe	6.99	12.03	0.39	0.15	0.2	0.2	0.3	0.25	0.3
30	Zona 1	6.99	12.03	0.25	0.15	0.2	0.2	0.3	0.25	0.3
30	Zona 2	6.99	12.03	0.32	0.15	0.2	0.2	0.3	0.25	0.3
50	C. boe	7.34	12.32	0.43	0.15	0.2	0.2	0.3	0.25	0.3
50	Zona 1	7.34	12.32	0.25	0.15	0.2	0.2	0.3	0.25	0.3
50	Zona 2	7.34	12.32	0.35	0.15	0.2	0.2	0.3	0.25	0.3
F< 5gg/anno	C. boe	2.61	7.54	0.19	0.15	0.2	0.2	0.3	0.25	0.3
F< 5gg/anno	Zona 1	2.61	7.54	0.17	0.15	0.2	0.2	0.3	0.25	0.3
F< 5gg/anno	Zona 2	2.61	7.54	0.13	0.15	0.2	0.2	0.3	0.25	0.3

 valori ammissibili

Tabella 13 – Verifica delle condizioni ondose con riferimento al *PIANC PTC II Report WG24*

Con riferimento ai valori medi di altezza d'onda calcolati in ciascuna zona di ormeggio selezionata, si nota che i valori ammissibili suggeriti dalle “*Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici*” dell'AIPCN sono nella maggior parte dei casi rispettati. Incrociando però i dati i valori suggeriti dal *Canadian Manuscript Report* e dal *PIANC PTC II Report WG24* si evince che tale risultato deve intendersi per lo più riferito al caso di imbarcazioni medio grandi.

Sarà in ogni caso quindi prudente nelle zone a maggiore agitazione disporre le imbarcazioni di dimensioni maggiori e comunque disporre gli ormeggi in modo che l'onda investa frontalmente le barche, disposizione ottimale sia per ridurre le oscillazioni indotte sul natante sia le forze trasmesse agli ormeggi.