



Autorità di Sistema Portuale  
dei Mari Tirreno Meridionale  
e Ionio

**REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO  
DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL  
RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE  
CIG: 945919784C - CUP: F11J18000050005**

**PROGETTO DEFINITIVO**

**GRUPPO DI PROGETTAZIONE INDICATO**

Mandataria:



Mandanti:



Ing. Arturo VELTRI

**Progettazione:**

HYSOMAR - Ing. Alberto BORSANI (Coordinatore e responsabile delle Integrazioni Specialistiche)  
HYSOMAR - (Progettazione generale e marittima)  
HYPRO - (Progettazione strutturale, impiantistica, paesaggistica ed ambientale)  
Ing. Arturo VELTRI - (Modelli specialistici)

**Geologia:**

HYPRO - Dott. Giuseppe CERCHIARO

**Coordinatore della Sicurezza in fase di Progettazione:**

HYSOMAR - Ing. Antonella PASTORE (Coordinamento sicurezza in fase di progettazione)

**Gruppo di lavoro:**

Ing. Gianluigi FILIPPO (HYSOMAR)  
Geom. Alfredo VOMMARO (HYSOMAR)  
Ing. Maurizio CARUSO (HYPRO)  
Ing. Raffaele CIARDULLO (HYPRO)  
Ing. Vincenzo SECRETI (HYPRO)



Appaltatore:

**FRANCO GIUSEPPE s.r.l**



Elaborato:

**STUDIO DI AGITAZIONE INTERNA AL PORTO**

CODIFICA

Al 12 - 2022

CODICE DOCUMENTO

1 0,2 S,P R,H 0,3

REV.

0

SCALA

ELABORATO

02.SP.R03

Rev.	Data	Descrizione	Redatto	Controllato	Approvato
0	Giugno 2023	1° EMISSIONE	A. VELTRI	A. PASTORE	A. BORSANI

Visto:

Il Responsabile Unico del Procedimento

**Ing. Maria Carmela DE MARIA**

## SOMMARIO

1. PREMESSA .....	1
2. DATI DI INPUT UTILIZZATI NELLO STUDIO .....	1
2.1 Eventi estremi a largo del porto.....	2
2.2 Analisi dei sovralti.....	4
2.2.1 Marea Astronomica .....	5
2.2.2 Marea Meteorologica .....	5
2.2.3 Wave set-up.....	6
2.2.4 Sovralzi complessivi.....	8
3. STUDIO DI AGITAZIONE ONDOSA .....	8
3.1 Selezione scenari.....	11
3.2 Modello numerico di calcolo .....	12
3.3 Set-up modello numerico .....	15
3.3.1 Caratterizzazione perimetro portuale .....	15
3.3.2 Griglia computazionale di calcolo.....	17
3.3.3 Settaggio simulazioni .....	20
3.4 Risultati .....	21
3.5 Sensibilità al periodo di picco $T_p$ .....	30
4. CONCLUSIONI .....	35

## 1. PREMESSA

Il presente studio di agitazione ondosa riporta l'analisi condotta per la verifica delle condizioni all'interno della darsena e in corrispondenza dell'imboccatura del Porto vecchio di Crotona.

L'opera si rende necessaria per la protezione del bacino “vecchio” del porto di Crotona; essa non prevede nuove banchine a tergo del molo ed ha il solo scopo di garantire una maggiore sicurezza alle attività che già ora si svolgono nello specchio acqueo.

L'intervento proposto non varia sostanzialmente le modalità di esercizio attuali e/o future già assentite per il porto vecchio di Crotona e non comporta significativi aumenti e/o modifiche del traffico dei natanti e dei mezzi a terra rispetto a quello attuale.

Gli scenari analizzati si riferiscono al confronto tra lo stato attuale dei luoghi e lo stato di progetto, in cui si realizzerà il prolungamento del molo sopraflutto. La prima fase dello studio è stata rivolta alla definizione degli input allo studio, ovvero gli eventi estremi che caratterizzano il paraggio, il calcolo dei sovralti e i dati geometrici e batimetrici utilizzati (Capitolo 2). Nel successivo Capitolo 3 è riportato lo studio di agitazione, ovvero le analisi che hanno permesso, attraverso l'utilizzo di modelli numerici, di valutare le condizioni di agitazione interne alla darsena e in corrispondenza dell'imboccatura al porto per la configurazione attuale del porto (Stato di fatto – SdF) e per quella di progetto (Stato di Progetto – SdP). Infine, sono riportate le conclusioni che emergono dallo studio.

## 2. DATI DI INPUT UTILIZZATI NELLO STUDIO

I dati adoperati per lo studio di agitazione ondosa sono riassunti di seguito:

- Statistica degli eventi estremi estrapolata dai risultati dello studio “02.SP.R02 – Studio meteomarinico a largo e sottocosta”;
- Dati batimetrici dell'area oggetto di studio;

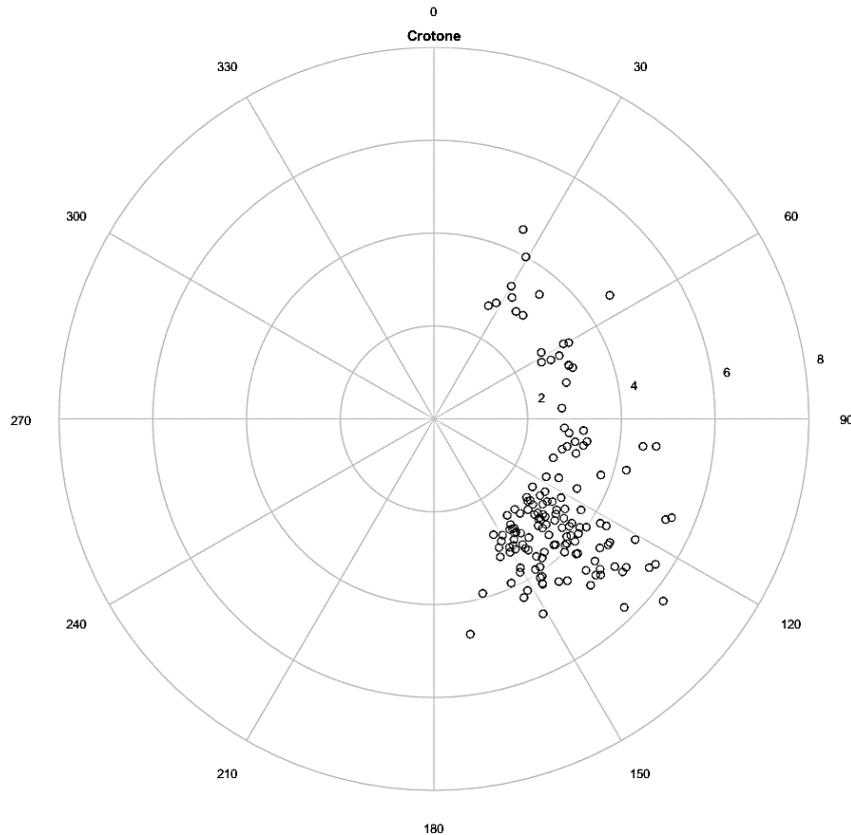
- Caratteristiche geometriche del bacino portuale e dell'estensione del molo sopraflutto.

## 2.1 Eventi estremi a largo del porto

Con riferimento allo studio “02.SP.R02 – Studio meteomarinario a largo e sottocosta” gli eventi estremi sono stati calcolati a partire dall'analisi della serie dei valori di altezza d'onda significativa,  $H_s$ , al largo del paraggio di Crotona, per cui sono stati individuati 151 eventi di mareggiata afferenti al settore di traversia in esame ( $350^\circ$ - $210^\circ$ N). Il maggior numero di mareggiate e quelle aventi frequenza maggiore è risultato provenire principalmente dai settori angolari  $110^\circ$ - $140^\circ$ N con 74 eventi e dal settore  $140^\circ$ - $170^\circ$ N con 41 eventi. Di seguito si riporta il diagramma polare delle altezze d'onda significative massime al culmine della mareggiata in funzione della direzione media di provenienza.

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R03 – STUDIO DI AGITAZIONE INTERNA AL PORTO



**Figura 1 Diagramma polare delle altezze d'onda significative massime al culmine della mareggiata in funzione della direzione media di provenienza**

Gli eventi estremi di moto ondoso da determinare sono stati fatti afferire a 2 settori direzionali ( $110^{\circ}$ - $140^{\circ}$ N e  $140^{\circ}$ - $170^{\circ}$ N), facenti parte del settore di traversia del paraggio di Crotona che possono produrre effetti nei confronti dell'agitazione nella marina. Al fine di determinare le altezze d'onda significative per il prefissato tempo di ritorno, si è fatto riferimento al metodo di Goda (1988), basato sulle seguenti ipotesi:

- tutte le altezze d'onda significative del campione provengono da una singola popolazione statistica di eventi di mareggiate;
- le altezze d'onda di una mareggiata sono ragionevolmente rappresentate dall'altezza significativa;

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R03 – STUDIO DI AGITAZIONE INTERNA AL PORTO

- le altezze d’onda estreme facenti parte del campione non sono limitate da qualche fattore fisico, come a esempio la profondità in acque intermedie o basse.

Per i periodi di ritorno più significativi, ovvero  $T_R = 1, 5, 10, 20, 50$  e  $100$  anni e per i settori direzionali afferenti al settore di traversia di Crotona, in Tabella 1 sono mostrati, rispettivamente, i valori di  $H_s$  a prefissato tempo di ritorno e i rispettivi valori di periodo medio,  $T_m$  e di periodo di picco,  $T_p$ , ottenuti sulla base delle correlazioni altezze - periodi precedentemente determinati. I valori maggiori delle onde estreme sono relativi al settore angolare omnidirezionale.

$T_R$ (anni)	Settore 110°-140°			Settore 140°-170°			Omnidirezionale		
	$H_s$ (m)	$T_m$ (s)	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	$T_m$ (s)	$T_p$ (s)	$H_s$ (m)	$T_m$ (s)	$T_p$ (s)
1	2.0	6.0	7.7	2.5	6.4	8.2	4.6	8.0	10.4
5	3.9	7.6	9.9	3.6	7.4	9.6	5.6	8.6	11.3
10	4.6	8.0	10.4	4.0	7.6	9.9	6.0	8.8	11.6
25	5.2	8.4	11.0	4.4	7.9	10.3	6.5	9.1	11.9
50	5.6	8.6	11.3	4.6	8.0	10.5	6.9	9.2	12.2
100	6.0	8.8	11.6	4.9	8.2	10.7	7.2	9.4	12.4

**Tabella 1** Eventi estremi direzionali a prefissato tempo di ritorno al largo del paraggio di Crotona

## 2.2 Analisi dei sovralti

La verifica delle condizioni meteomarine a cui è esposto un tratto di costa deve tenere in conto le variazioni del livello medio mare dovute all’azione concomitante che marea, vento, pressione atmosferica e azione delle onde determinano sulle masse in movimento. Tali variazioni quasi statiche determinano il cosiddetto sovraltzo di tempesta del livello medio mare e possono essere definiti dalla somma dalle seguenti componenti:

- Marea astronomica, ovvero l’azione di attrazione gravitazionale esercitata dal sole (30%) e dalla luna (70%) sulle masse oceaniche. L’effetto è ben noto e definito attraverso le diverse componenti armoniche dell’oscillazione mareale;
- Marea meteorologica, la cui azione è data dalla combinazione del sovraltzo generato dal vento che spira sulla superficie marina con l’effetto barico della pressione atmosferica;

- Wave set-up, ovvero l’innalzamento del livello medio mare in prossimità della costa dovuto al frangimento delle onde in prossimità della spiaggia.

### 2.2.1 Marea Astronomica

Nel mar Mediterraneo le oscillazioni di marea determinano effetti di diversa entità nei diversi sub-bacini. Nel mar Adriatico, per esempio, si assiste ad escursioni di marea molto diverse tra estremo nord e zona di confine con il mar Ionio. Ben note sono le cosiddette “maree alte” nella laguna di Venezia, dove in circostanze particolari l’effetto può determinare escursioni anche superiori al metro di ampiezza. Più a sud, invece, le escursioni massime possono attestarsi su valori inferiori o prossimi al mezzo metro.

Per la zona oggetto di studio si è fatto riferimento alle misure dei dati di marea della boa ondometrica RON di Crotona. L’andamento temporale risultante è di tipo semidiurno con due alte maree e due basse maree al giorno di ampiezza diversa (marea di tipo sinodico - declinazionale). Le escursioni di marea astronomica sono contraddistinte da una periodicità bisettimanale distinta nelle fasi di sizigie (luna piena e nuova) e di quadratura. Nei periodi sizigiali si verificano i massimi dislivelli positivi e negativi che raggiungono valori di circa  $\pm 0.20$  m rispetto al livello medio marino.

### 2.2.2 Marea Meteorologica

La definizione della marea meteorologica è data dalla sovrapposizione del sovrizzo dovuto all’azione del vento e all’effetto barico.

L’effetto di innalzamento dei livelli sottocosta, dovuti all’azione dei venti dominanti, è definito in funzione dell’estensione della piattaforma continentale, ovvero della lunghezza dell’area di mare sulla quale il vento spira, generando il sovrizzo sottocosta. Per l’area di studio, l’isobata -200 m di profondità si colloca ad una distanza di circa 7.0 km dal sito oggetto di studio. Si riporta di seguito la formulazione implicita per il calcolo del sovrizzo  $S$ :

$$S = \frac{K_p L_p U^2}{g(D - d - S)} \ln \left( \frac{D}{d + S} \right)$$

In cui

- $K_p = 3 \times 10^{-6}$  è una costante;
- $L_p = 7.0 \text{ km}$  è l'estensione della piattaforma continentale;
- $U^2 = 20 \text{ m/s}$  è la velocità del vento persistente assunto per condizioni estreme;
- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  è l'accelerazione di gravità;
- $D = 200 \text{ m}$  è il limite assunto per la piattaforma continentale;
- $d = 10 \text{ m}$  è la profondità sottocosta di calcolo;

Il valore del sovrizzo calcolato per la profondità di 10 m è risultato pari a 13 cm.

L'effetto barico è riferito all'azione della pressione atmosferica, valutabile in maniera semplificata considerando un sovrizzo pari ad 1 cm ogni millibar di differenza tra il valore minimo/massimo della pressione atmosferica e il valore medio di riferimento. La condizione di bassa pressione è tipica del verificarsi di una perturbazione e per Crotone, dai dati relativi al periodo 2018-2023 può essere assunta pari a 987.7 mb. Al contrario, il passaggio di masse d'aria caratterizzate da alta pressione, tipica del passaggio di anticicloni, hanno fatto registrare valori prossimi ai 1039.5 mb. Considerando una condizione di pressione atmosferica media pari a 1015.5 mb, ne consegue un massimo sovrizzo di +24 cm e un abbassamento massimo di -27.8 cm del livello medio mare.

### 2.2.3 Wave set-up

Durante una mareggiata, il sovrizzo generato sottocosta dall'azione del moto ondoso persistente, è determinato dalla spinta esercitata dalla massa d'acqua durante la propagazione, che risulta proporzionale al quadrato dell'altezza d'onda e prende il nome di radiation stress. Allorché l'onda varia per effetto dello shoaling e del frangimento indotti dalle variazioni del fondale, l'azione del radiation stress varia procedendo verso riva. La presenza della spiaggia inclinata determina un'oscillazione del livello medio mare. Una volta che l'azione dell'onda si esaurisce sulla spiaggia, un flusso d'acqua si attiva in direzione opposta e velocità nettamente minore a quella dell'onda frangente,

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R03 – STUDIO DI AGITAZIONE INTERNA AL PORTO

determinando il sovrizzo complessivo della colonna d'acqua che prende il nome di wave set-up.

La valutazione di tale effetto dipende dalle condizioni morfodinamiche del sito e dalla caratterizzazione dell'azione frangente sulla spiaggia. Una buona approssimazione dell'effetto può essere valutata attraverso la seguente formula sperimentale, validata attraverso dati di campo:

$$\zeta_{\theta_0=0} = H_0(A_0 + A_1 \ln\left(\frac{H_0}{L_0}\right) + A_2 \left[\ln\left(\frac{H_0}{L_0}\right)\right]^2$$

In cui:

$\zeta_{\theta_0=0}$  è il wave set-up per onde che si propagano ortogonalmente alla spiaggia;

$H_0$  è l'altezza d'onda a largo;

$L_0$  è la rispettiva lunghezza d'onda a largo

$$A_0 = 0.0063 + 0.768 s$$

$$A_1 = -0.0083 - 0.011 s$$

$$A_2 = 0.00372 + 0.0148 s$$

} coefficienti che dipendono dalla pendenza della spiaggia  $s$

In Tabella 2 si riportano i risultati del wave set-up ( $\zeta_{\theta_0=0}$ ) ottenuti per le onde che caratterizzano gli eventi estremi (settore omnidirezionale) a largo del tratto di costa considerato, associate ai tempi di ritorno 1, 5, 10, 50 e 100 anni.

settore	$T_R$	$H_0$	$T_p$	$L_0$	$s$	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$\zeta_{\theta=0}$
	(anni)	(m)	(s)	(m)	-	-	-	-	(m)
110-140°N	1	2.0	7.7	92	0.029	0.0282	-0.0086	0.0041	0.24
	5	3.9	9.9	153	0.029	0.0282	-0.0086	0.0041	0.45
	50	5.6	11.3	199	0.029	0.0282	-0.0086	0.0041	0.63
140-170°N	1	2.5	8.2	105	0.029	0.0282	-0.0086	0.0041	0.30
	5	3.6	9.6	144	0.029	0.0282	-0.0086	0.0041	0.42

	50	4.6	10.5	172	0.029	0.0282	-0.0086	0.0041	0.52
--	----	-----	------	-----	-------	--------	---------	--------	------

Tabella 2 Calcolo wave set-up per gli eventi estremi di mareggiata (settore omnidirezionale)

### 2.2.4 Sovralzi complessivi

Di seguito si riporta il massimo sovrалzo atteso per l'area oggetto di studio, dovuto alla sovrapposizione degli effetti di marea astronomica e marea meteorologica. Considerando la scarsa probabilità di avere la concomitanza dei massimi effetti di ognuna delle componenti, si provvede a ridurre del 20% la quotaparte del sovrалzo dovuto alla marea meteorologica.

Massimo sovrалzo in condizioni di mareggiata:

$$S_{max} = 0.21 + 0.8 * (0.13 + 0.24) + 0.63 = 1.1 m$$

## 3. STUDIO DI AGITAZIONE ONDOSA

Lo studio dell'agitazione ondosa in un bacino consente di ottenere informazioni circa la configurazione planimetrica interna e le caratteristiche dimensionali delle opere di difesa

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R03 – STUDIO DI AGITAZIONE INTERNA AL PORTO

considerate. A partire dalle caratteristiche meteomarine dell'area è possibile determinare le azioni ondose che possono interessare la parte esterna come la zona interna del porto, ovvero i parametri dimensionanti per le strutture di protezione e il grado di sicurezza rispetto allo stazionamento dei natanti e alle attività da svolgere all'interno delle aree dislocate lungo le banchine interne.

Per la modellazione dei processi di propagazione e dissipazione del moto ondoso nel porto sono necessari i dati relativi alle caratteristiche delle opere presenti, ovvero:

- le dimensioni, l'orientamento e la conformazione delle strutture portuali a protezione della darsena interna;
- la geometria delle opere da realizzare nello stato di progetto;
- le caratteristiche di riflessione delle banchine, scogliere, spiagge, mantellate esterne, etc;
- la destinazione d'uso all'interno del perimetro portuale.

L'obiettivo è definire le condizioni a cui saranno esposti i natanti ormeggiati o in transito nelle aree oggetto d'intervento, verificando le condizioni di sicurezza rispetto a soglie normalmente ammesse e indicate da raccomandazioni tecniche o standard in uso nella progettazione di porti turistici.

Il layout del porto vecchio di Crotona è mostrato in Layout di progetto. Rispetto alla configurazione esistente nello stato di progetto si realizzerà un prolungamento del muro paraonde esistente, l'estensione del molo sopraflutto e lavori di rimodulazione del fondale.

In particolare, l'estensione del molo sopraflutto sarà coerente con l'attuale direzione del molo esistente, ovvero ne costituirà un naturale prolungamento. Il prolungamento della diga di sopraflutto a protezione del porto, di lunghezza complessiva di circa 130 m a partire dal tronco radicato al molo esistente, è sviluppato in direzione SW. Il molo è costituito da una scogliera esterna di protezione con mantellata in massi artificiali Antifer (elementi da 5.0 m<sup>3</sup>), postati in doppio strato in modalità "random" con pendenza 2:1. Lo stesso sarà posato su uno strato filtro costituito da scogli naturali in 1<sup>a</sup> categoria (500-1000 kg) con pendenza 2:1 e su una berma al piede costituita da massi naturali di 3<sup>a</sup>

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R03 – STUDIO DI AGITAZIONE INTERNA AL PORTO

categoria (3-7 t) con pendenza 2:1. Il molo è dotato di muro paraonde che sovrasta la struttura fino ad una quota massima di + 5,60 m slmm. La parte interna è costituita da una scogliera con mantellata in scogli naturali di 3<sup>a</sup> categoria (3-7 t) e con pendenza 3:2. Lo stesso poggia su uno strato filtro costituito da scogli naturali in 1<sup>a</sup> categoria (500-1000 kg) con pendenza 3:2 e su una berma al piede costituita da massi naturali di 2<sup>a</sup> categoria (1-3 t) con pendenza 3:2. Le scogliere di protezione e lo strato filtro sono poggiati su un nucleo in Tout Venant. Il piano di posa dei piedi interni ed esterni sarà costituito da uno scanno di imbasamento in pietrame (100-500 kg) di spessore 70 cm, protetto al fondo da uno strato di geotessuto 400g/mq.

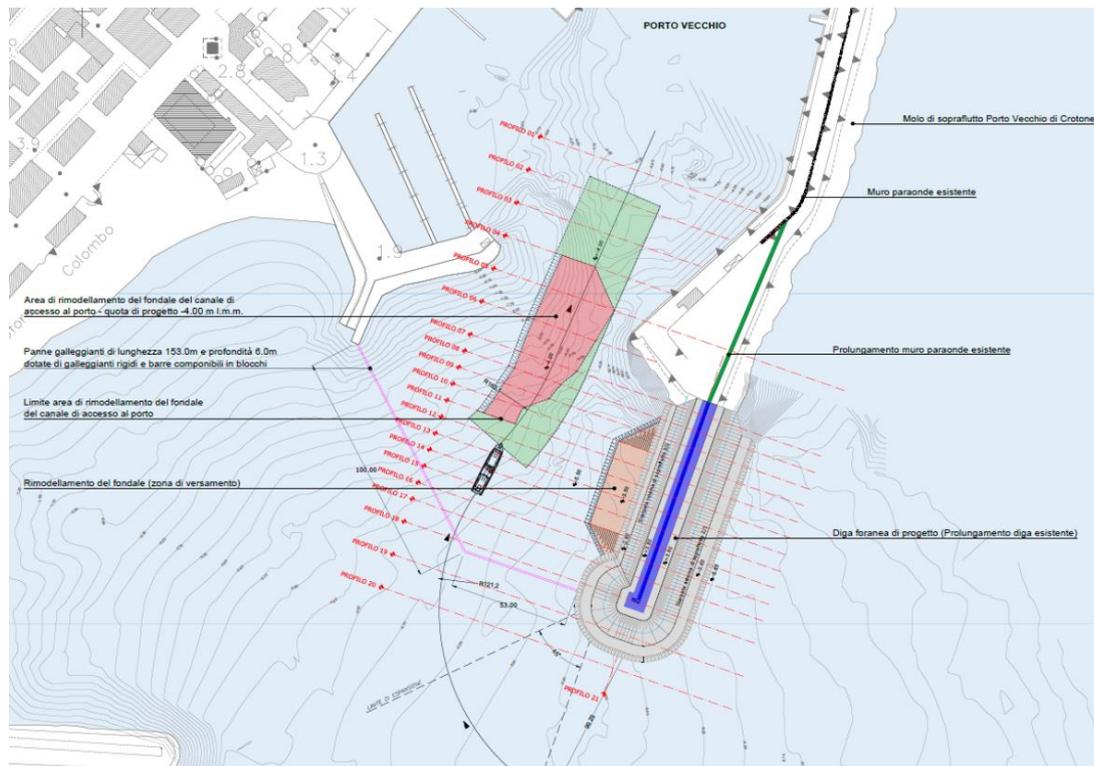


Figura 2 Layout di progetto

### 3.1 Selezione scenari

La definizione delle onde di riferimento per le simulazioni è stata condotta nell’ottica di verificare, ricorrendo alla modellazione numerica, la rispondenza della soluzione progettuale alle indicazioni fornite dal PIANC-AIPCN, Associazione Internazionale di Navigazione, che si riferiscono alla verifica dell’agitazione ondosa negli specchi acque protetti a servizio della nautica da diporto. In particolare, si raccomanda di verificare le seguenti condizioni:

- condizione di “comfort” (particolarmente importante nel caso di porti in cui si prevede la presenza prolungata di persone a bordo delle imbarcazioni); tali verifiche si riferiscono ad eventi con frequenza di accadimento di 5 giorni l’anno e un’altezza d’onda significativa in grado di determinare, all’interno del porto, valori di  $H_s = 0.15$  m;
- condizione di “sicurezza” per eventi con periodo di ritorno indicativamente non inferiore a 5 anni e un’altezza d’onda significativa in grado di determinare, all’interno del porto, valori di  $H_s = 0.30$  m;
- condizione “limite”, per eventi con periodo di ritorno indicativamente non inferiore a 50 anni e un’altezza d’onda significativa in grado di determinare, all’interno del porto, valori di  $H_s = 0.50$  m.

Tutte le verifiche sono state condotte simulando le onde provenienti dai 2 settori principali che caratterizzano il moto ondoso per il paraggio, i settori 110-140°N e 140-170°N, ovvero gli eventi estremi calcolati e riportati al cap. 2.1. Le simulazioni si riferiscono alla verifica delle suddette condizioni per lo stato di fatto (SdF) e per lo stato di progetto (SdP).

Le onde selezionate per lo studio sono riferite alle condizioni estratte a largo del paraggio. In Tabella 3 si riportano le condizioni simulate e la verifica da soddisfare, in cui la direzione indicata rappresenta la direzione di provenienza media del moto ondoso. I risultati della modellazione sono analizzati considerando le condizioni di utilizzo delle diverse aree all’interno del bacino e le diverse opere presenti (banchine, ormeggi, zone di manovra e transito, imboccatura). La condizione simulata è ritenuta verificata se

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R03 – STUDIO DI AGITAZIONE INTERNA AL PORTO

mediamente soddisfatta nella porzione di porto specificata, oltre che produrre un effetto di mitigazione rispetto alla configurazione attuale del porto.

DIR (°N)	T <sub>R</sub> (anni)	H <sub>s</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	condizione	verifica
110	5 gg/anno	0.9	4.6	comfort	H <sub>s</sub> ≤ 0.15 m
	5	3.9	9.9	sicurezza	H <sub>s</sub> ≤ 0.30 m
	50	5.6	11.3	limite	H <sub>s</sub> ≤ 0.50 m
125	5 gg/anno	0.9	4.6	comfort	H <sub>s</sub> ≤ 0.15 m
	5	3.9	9.9	sicurezza	H <sub>s</sub> ≤ 0.30 m
	50	5.6	11.3	limite	H <sub>s</sub> ≤ 0.50 m
140	5 gg/anno	1.4	6.3	comfort	H <sub>s</sub> ≤ 0.15 m
	5	3.9	9.9	sicurezza	H <sub>s</sub> ≤ 0.30 m
	50	5.6	11.3	limite	H <sub>s</sub> ≤ 0.50 m
155	5 gg/anno	1.4	6.3	comfort	H <sub>s</sub> ≤ 0.15 m
	5	3.6	9.6	sicurezza	H <sub>s</sub> ≤ 0.30 m
	50	4.6	10.5	limite	H <sub>s</sub> ≤ 0.50 m
170	5 gg/anno	1.4	6.3	comfort	H <sub>s</sub> ≤ 0.15 m
	5	3.6	9.6	sicurezza	H <sub>s</sub> ≤ 0.30 m
	50	4.6	10.5	limite	H <sub>s</sub> ≤ 0.50 m

**Tabella 3 Condizioni ondose selezionate per la verifica dell’agitazione interna al porto**

### 3.2 Modello numerico di calcolo

Lo studio dell’agitazione interna ad un bacino portuale richiede un’analisi complessa e dettagliata dei processi fisici che caratterizzano la propagazione e la trasformazione del moto ondoso nell’area di studio. Le informazioni fondamentali per valutare le condizioni di agitazione interna sono l’altezza, il periodo e la direzione dell’onda propagata. Dal momento che quasi sempre non sono disponibili registrazioni dirette di queste grandezze all’interno del porto o di una specifica area di studio, è necessario far riferimento ad un modello numerico di trasformazione in grado di valutare in maniera concomitante tutti le variabili e determinare in output la risposta del sistema in ogni punto del dominio.

Nel presente studio la modellazione numerica dell’agitazione nel porto è stata eseguita utilizzando il codice numerico ARTEMIS (Agitation and Refraction with TElemac on a MidSlope) (e.g., Aelbrecht, 1997; EDF R&D, 2010), che costituisce parte della suite di calcolo idrodinamico agli elementi finiti TELEMAC (EDF R&D). Il modello risolve i

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R03 – STUDIO DI AGITAZIONE INTERNA AL PORTO

processi di riflessione, dissipazione per frangimento, attrito al fondo, rifrazione e diffrazione dell'onda sia su fondali dolcemente acclivi che in presenza di ostacoli o bruschi cambiamenti di pendenza. Tra le ipotesi fondamentali vi sono quelle di:

- fluido non viscoso e incomprimibile;
- moto irrotazionale;
- fondale che non varia nel tempo;
- fondale poco acclive e altezza d'onda piccola rispetto alla profondità, che permettono di considerare la teoria lineare delle onde.

Al fondale fisso (non varia nel tempo) sono assegnate caratteristiche di attrito e l'altezza d'onda  $H_s$  è assunta trascurabile rispetto alla lunghezza d'onda  $L$ , ovvero si assume ( $H_s/L \ll 1$ ) e per la profondità  $h$  ( $H_s/h \ll 1$ ). Infine, l'assunzione del fondale a debole pendenza consente di trascurare i processi di dissipazione infinitesimi ( $(\Delta h/h)/(h/L) \ll 1$ ), più complessi da risolvere dal punto di vista computazionale.

Artemis risolve le equazioni estese per fondali a debole pendenza proposte da Booij (1981) e De Girolamo, Kostense e Dingemans (1988). La formulazione originale che combina gli effetti di rifrazione e diffrazione fu invece derivata da Berkhoff (1972, 1976) e successivamente modificata da Smith e Sprinks (1975) per integrare gli effetti dissipativi associati al frangimento del moto ondoso e all'attrito al fondo.

L'equazione estesa per fondale a debole pendenza è fornita nel sistema di coordinate Cartesiane (x,y) come:

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \phi) + CC_g (k^2 + ik\mu) \phi = 0 \quad \text{mild slope equation}$$

in cui

- $\omega$  è la frequenza d'onda;
- $C = \omega/k$  è la celerità con cui viaggia l'onda;
- $C_g = \partial \omega / \partial k$  è la celerità di gruppo con cui viaggia l'energia;
- $\phi$  è il potenziale tale che  $\nabla \phi = u$  con
- $u$  la velocità della particella d'acqua;
- $k$  il numero d'onda ottenuto dalla legge di dispersione;
- $\mu$  è un coefficiente di dissipazione.

In base ai processi fisici da includere nel dominio di riferimento, il termine  $\mu$  varia aggiungendo i termini da considerare nella formulazione matematica del problema.

L'altezza d'onda  $H_s$  è ottenuta dalla espressione matematica:

$$H_s = \frac{2\omega}{g} |\phi|$$

In cui  $g$  è l'accelerazione di gravità. Il coefficiente di dissipazione  $\mu$  (espresso in  $m^{-1}$ ) è utilizzato per la parametrizzazione del frangimento e dell'attrito al fondo. La dissipazione attraverso il frangimento dovuto alla variazione di fondale è computata in accordo con la formulazione di Battjes e Janssen (1978), basata sull'analogia tra il frangimento d'onda e il salto idraulico espresso in termini di perdita di energia. L'espressione matematica di  $\mu$  è la seguente:

$$\mu = \frac{4\alpha f_p Q_b}{C_g} \left( \frac{H_m}{H_s} \right)^2$$

Con  $H_m$  che vale

$$H_m = \frac{0.88}{k} \tanh \left( \frac{\gamma_s}{0.88} kh \right)$$

È l'altezza d'onda critica al frangimento, in accordo con Miche (1944),  $\gamma_s$  è pari a 0.88,  $Q_b$  è la componente frangente dell'onda, calcolata considerando la funzione di distribuzione di probabilità di Rayleigh al valore critico  $H_m$ , mentre  $f_p$  è la frequenza di picco e  $\alpha$  un coefficiente di calibrazione assunto pari ad 1. La dissipazione dovuta all'attrito al fondo è invece parametrizzata in accordo con le equazioni di Putman e Johnson (1949). È formulata assumendo che la velocità è derivata dalle soluzioni di primo ordine del potenziale di Stokes. Ciò conduce alla seguente formulazione matematica:

$$\mu = \frac{2}{3\pi} \frac{f_\omega H_s \omega^3}{g C_g \sinh^3(kh)}$$

In cui  $f_{\omega}$  è il coefficiente di attrito assunto pari a 0.001. Il calcolo computazionale è ottenuto considerando una generazione di tipo random monodirezionale. Lo spettro di energia è discretizzato in  $n$  bande di uguale energia e frequenza nel range adeguato a rappresentare la variabilità della frequenza nello spettro d’onda. Le equazioni estese per fondali a debole pendenza sono risolte per ognuna delle  $n$  discretizzazioni in frequenza dello spettro di energia, per ognuno dei potenziali d’onda ridotti e per ogni altezza d’onda significativa. I risultati numerici sono combinati per fornire poi la soluzione globale dell’altezza d’onda significativa  $H_s$ . Il coefficiente di dissipazione, invece, è calcolato attraverso una procedura iterativa che risolve la dipendenza rispetto a  $\mu$ . Artemis calcola in prima approssimazione un coefficiente di dissipazione  $\mu$  trascurando i contributi del frangimento e dell’attrito al fondo. Successivamente, il modello effettua una seconda calcolazione integrando i contributi di frangimento e attrito al fondo, fornendo una successiva stima del coefficiente  $\mu$ . La procedura diventa poi iterativa fino al raggiungimento della convergenza imposta come soglia limite. Infine, la soluzione numerica viene forzata per soddisfare il criterio per il minore degli elementi che compongono la mesh di calcolo, confrontato con la lunghezza d’onda.

### 3.3 Set-up modello numerico

Le ipotesi semplificative introdotte nella formulazione del modello, possono essere così sintetizzate:

- non avviene trasmissione dell’onda attraverso le barriere frangiflutti;
- non si tiene in conto l’eventuale fenomeno dell’overtopping delle strutture;
- sono trascurati gli effetti della propagazione d’onda legati alla presenza di correnti;
- i pontili presenti nel bacino sono considerati “trasparenti” ai fini dello studio. Tale assunzione è vincolata alla risoluzione spaziale del dominio di calcolo.

#### 3.3.1 Caratterizzazione perimetro portuale

Il layout di progetto del porto vecchio di Crotona prevede strutture che asservono ad una destinazione d’uso differente e nei confronti del moto ondoso incidente offrono una

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R03 – STUDIO DI AGITAZIONE INTERNA AL PORTO

diversa risposta in termini di riflessione o dissipazione dell'onda. Lo stesso dicasi per le opere presenti lungo la costa al di fuori del porto, dove si sviluppano spiagge caratterizzate dalla presenza di scogliere frangiflutti emerse e a nord le infrastrutture del porto nuovo di Crotona.

Per tenere conto della riflessione dell'onda, il modello numerico di calcolo viene impostato assegnando lungo il perimetro portuale gli opportuni coefficienti di riflessione  $C_r$  in funzione della tipologia strutturale, in particolare:

- spiaggia:  $C_r=15\%$
- scogliere:  $C_r=50\%$
- banchine a parete verticale:  $C_r=90\%$
- strutture di mantellata dei moli  $C_r=50\%$

In Figura 3 si riporta la suddivisione del perimetro portuale in funzione del coefficiente di riflessione assegnato alle diverse strutture previste. Lungo la costa nell'area adiacente al porto, infine, sono stati assegnati gli opportuni coefficienti di riflessione alle spiagge e alle scogliere emerse presenti. I pontili previsti sono stati considerati “trasparenti” al moto ondoso.

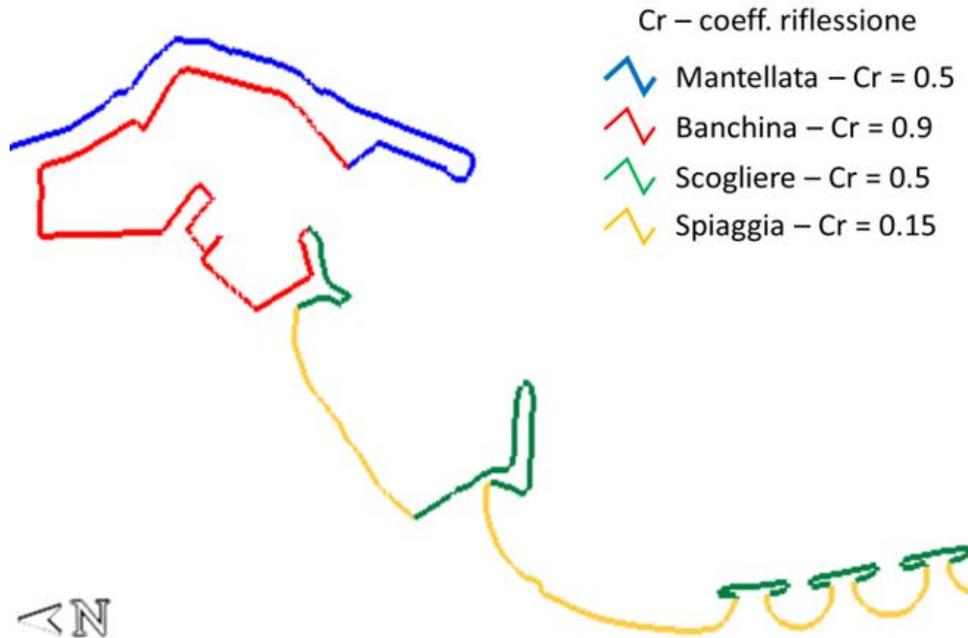


Figura 3: Tipologia di strutture individuate lungo il perimetro portuale

### 3.3.2 Griglia computazionale di calcolo

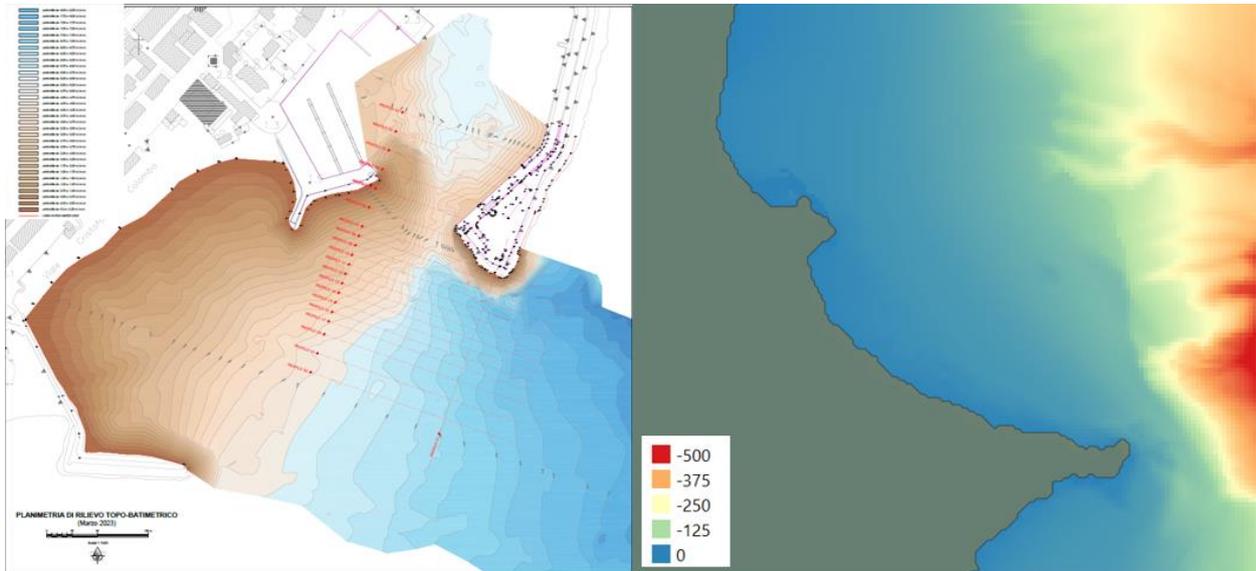
La griglia di calcolo utilizzata comprende l'intero bacino portuale e la parte esterna al porto in direzione sud, e si estende fino al promontorio di Capocolonna per comprendere l'area di sviluppo dei fronti d'onda dall'intero II settore (in particolare dai quadranti meridionali). Per lo studio è stata utilizzata una griglia computazionale non strutturata (mesh), costituita da elementi triangolari. Si è scelto di attribuire una risoluzione (distanza tra i nodi) via via più fitta (maggiore) procedendo da largo verso il porto e le strutture interne. Ciò consente di ottimizzare l'onere computazionale ma allo stesso tempo garantisce un'adeguata definizione del dominio in aree in cui è richiesta una modellazione più spinta.

Nel caso in esame la griglia di calcolo copre un'area di  $7.2 \times 6.3 \text{ km}$  ed è ottimizzata garantendo una risoluzione minima degli elementi pari a  $12 \text{ m}$  nella parte più a largo e una risoluzione massima di  $3 \text{ m}$  nelle aree interne al porto, più "onerose" dal punto di vista computazionale. L'influenza dei fondali marini è stata inclusa nella modellazione attraverso la successiva interpolazione della griglia di calcolo rispetto alle profondità

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R03 – STUDIO DI AGITAZIONE INTERNA AL PORTO

desumibili dalle fonti di dati adoperate, ovvero il rilievo batimetrico del porto e i dati del servizio Emodnet, che per l'area in oggetto fornisce le profondità del mare con una risoluzione di circa 90 m. In Figura 4 la base di dati batimetrici utilizzata.



**Figura 4 Informazioni batimetriche utilizzate per la mesh**

Il risultato della procedura è mostrato in Figura 6, dove l'intera mesh comprende il tratto di mare a sud del porto fino al promontorio di Capocolonna e un ingrandimento del porto vecchio di Crotona. Le simulazioni sono state condotte per lo stato di fatto (SdF) e lo stato di progetto (SdP). In Figura 6.a e Figura 6.b si mostrano, rispettivamente, le parti di mesh computazionale calcolate per la configurazione attuale (SdF) e per lo stato di progetto (SdP). La mesh così ottenuta mostra profondità dei fondali (in metri) attraverso le diverse tonalità della scala cromatica del blu.

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R03 – STUDIO DI AGITAZIONE INTERNA AL PORTO

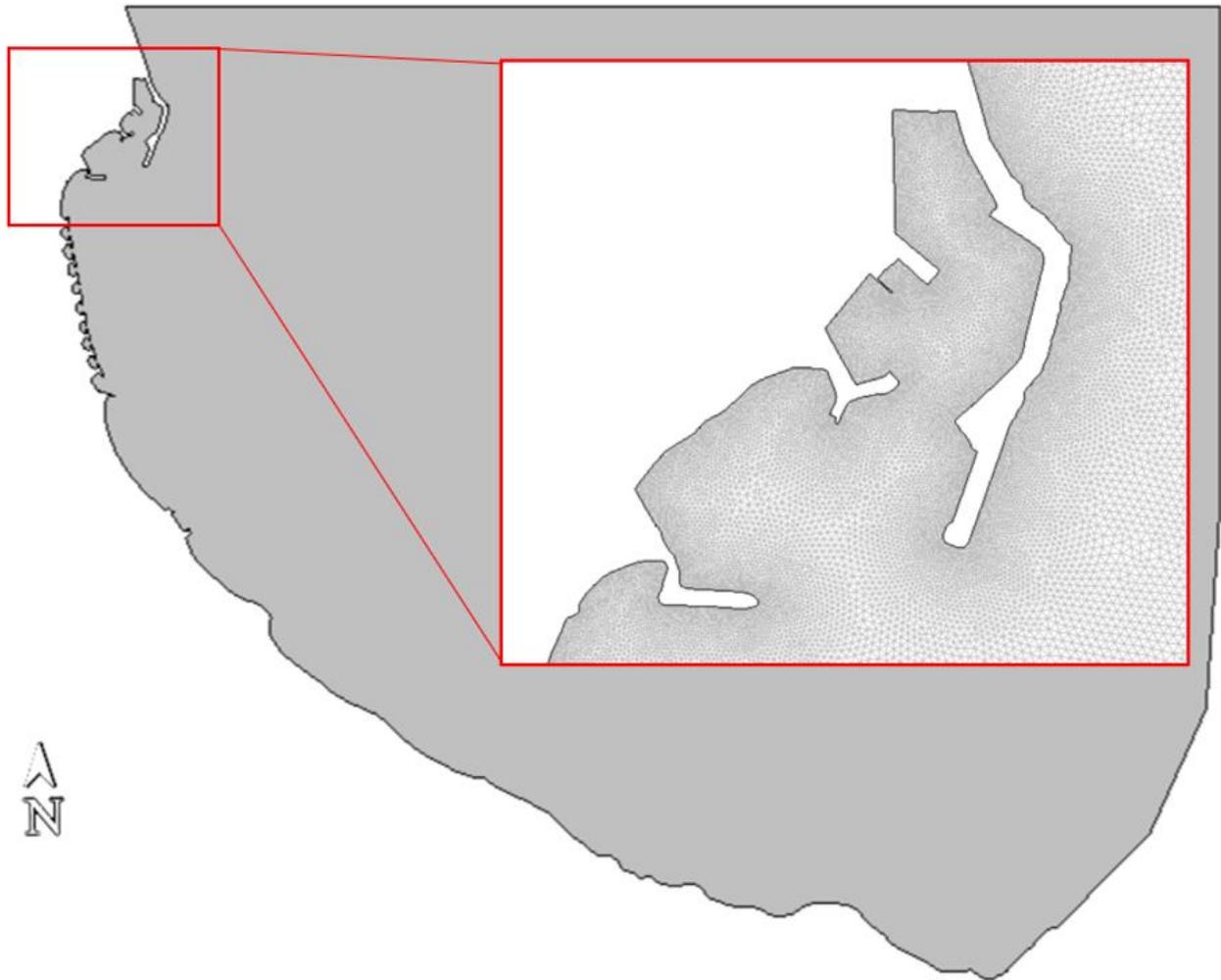
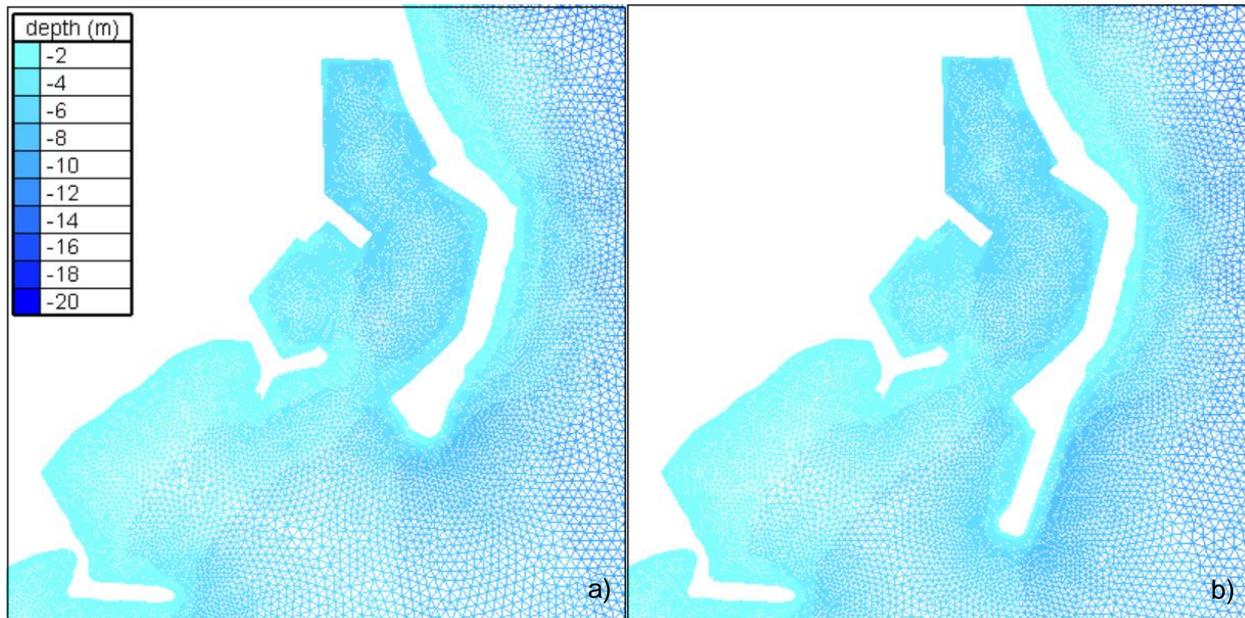


Figura 5 Mesh di calcolo per lo stato di progetto



**Figura 6** Griglia computazionale utilizzata per le simulazioni dell’agitazione interna dello stato di fatto (a) e dello stato di progetto (b)

### 3.3.3 Settaggio simulazioni

La propagazione del moto ondoso nel bacino è stata simulata per ognuna delle condizioni riportate in Tabella 3. Al modello sono stati assegnati gli input di altezza d’onda  $H_s$ , periodo di picco  $T_p$ , direzione di propagazione nell’area di generazione e livello idrico da considerare per tenere in conto il sovrizzo dovuto allo storm surge e al wave set-up (Cap. 2.2). Le simulazioni sono state effettuate considerando uno spettro d’energia dell’onda di tipo Jonswap (coefficiente di picco dello spettro  $\gamma = 3.3$ ) variabile in frequenza. La stabilità computazionale e il raggiungimento della condizione di stazionarietà dell’onda sono stati raggiunti assegnando un opportuna durata e passo temporale di simulazione (time step).

Per ottimizzare l’onere computazionale (notevole) di ognuna delle simulazioni effettuate, è stata adoperata una funzionalità del software che consente di calcolare un time step variabile, da assegnare alla n-esima iterazione di calcolo in maniera da verificare la cosiddetta condizione di Courant-Friedrichs-Lewy, spesso abbreviata con CFL, ovvero la

condizione necessaria per la convergenza numerica della soluzione, espressa attraverso la relazione

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{C}$$

in cui  $C$  è il numero di Courant, che per la stabilità di tali applicazioni è minore di 1,  $\Delta x$  e  $\Delta t$  sono rispettivamente la dimensione spaziale e temporale del dominio di calcolo all'interno del dominio assegnato. Ogni simulazione è stata conclusa dal raggiungimento della convergenza della soluzione ottenendo la condizione stazionaria dell'onda all'interno del dominio.

### 3.4 Risultati

I risultati delle simulazioni sono riportati di seguito attraverso le mappe cromatiche che esprimono il campo dei valori di altezza d'onda significativa ( $H_s$ ) nella zona interna e nell'intorno del porto. Ad ogni range di  $H_s$  è stata assegnata una tonalità cromatica per definire visivamente il range di  $H_s$  residua ottenuta per le diverse zone interne al porto. Ogni mappa cromatica si riferisce alla condizione di stazionarietà dell'agitazione residua in porto, per assegnati input di altezza d'onda,  $H_s$ , periodo di picco,  $T_p$  e direzione media di provenienza del moto ondoso.

I risultati sono stati analizzati per determinare il soddisfacimento della verifica per le condizioni di “comfort”, “sicurezza” e “limite” per lo stato di fatto e poi per lo stato di progetto. Maggiore attenzione è stata posta nei confronti dell'imboccatura del porto. In generale, si evidenzia che:

- le ondate provenienti dal settore 110-140°N producono un effetto maggiore rispetto alle onde dal settore 140-170°N. In particolare, queste ultime risentono della protezione offerta dal promontorio di Capocolonna, oltre che agli effetti combinati di rifrazione e diffrazione che non determinano una più evidente dissipazione dell'energia del moto ondoso e, di conseguenza, limitano gli effetti di

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R03 – STUDIO DI AGITAZIONE INTERNA AL PORTO

agitazione ondosa sia per lo stato attuale dei luoghi sia per la configurazione di progetto;

- la configurazione nello stato di progetto, ovvero il prolungamento del molo di sopraflutto e la rimodulazione dei fondali nella zona di ingresso al porto migliorano la dissipazione del moto ondoso rispetto alla configurazione attuale, per tutti gli scenari simulati;
- la penetrazione del moto ondoso nello stato di progetto è nettamente smorzata in corrispondenza dell’imboccatura, dove le strutture dei moli principali e gli effetti combinati di rifrazione e diffrazione contribuiscono a dissipare l’energia delle onde, risultando sempre compatibile con i valori limite consigliati dal PIANC, ovvero permette l’accesso al porto secondo la rotta di manovra di progetto;
- il moto ondoso residuo che si insinua all’interno del bacino per lo stato di progetto, interessa prevalentemente la parte navigabile all’ingresso e l’imboccatura e mediamente risulta sempre compatibile con i limiti PIANC nelle diverse aree individuate;
- dei cinque settori simulati, le onde da 110°N e 125°N risultano quelle che determinano la maggiore agitazione in corrispondenza dell’imboccatura al porto;
- l’agitazione residua media in corrispondenza delle zone che saranno adibite a ormeggi e stazionamento delle barche si mantiene mediamente sempre entro i limiti definiti dalle soglie definite dalle raccomandazioni PIANC-AIPCN.

Nelle seguenti figure (da Figura 7 a Figura 21) si riportano le mappe cromatiche dell’agitazione residua per onde di frequenza 5 gg/anno,  $T_R = 5$  anni,  $T_R = 50$  anni (per le quali sono verificate le condizioni di comfort, sicurezza e limite nel porto).

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R03 – STUDIO DI AGITAZIONE INTERNA AL PORTO

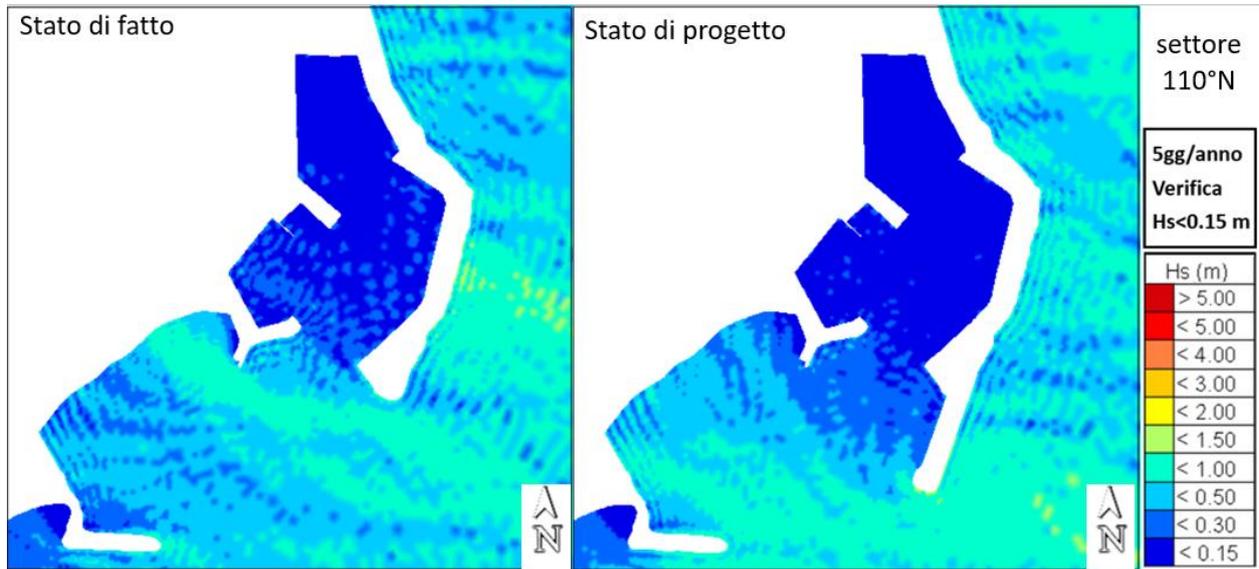


Figura 7 Mappa dell’agitazione SdF e SdP - verifica condizione di Comfort, Hs≤0.15m - settore 110°N

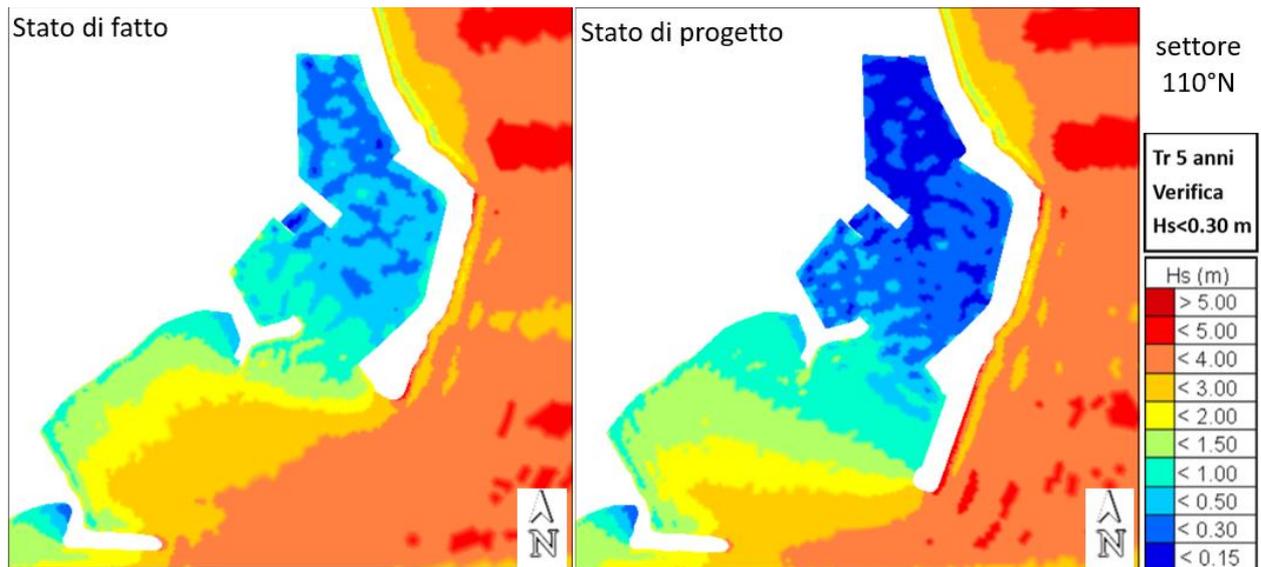


Figura 8 Mappa dell’agitazione SdF e SdP - verifica condizione di Sicurezza, Hs≤0.30m - settore 110°N

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R03 – STUDIO DI AGITAZIONE INTERNA AL PORTO

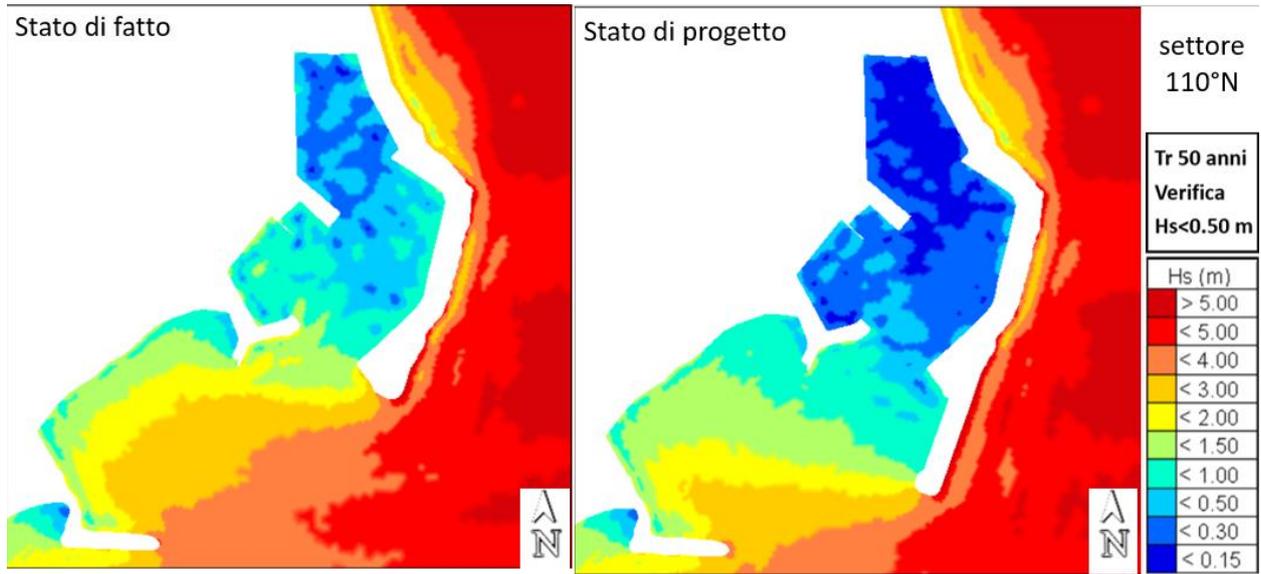


Figura 9 Mappa dell’agitazione SdF e SdP - verifica condizione Limite,  $H_s \leq 0.50m$  - settore  $110^\circ N$

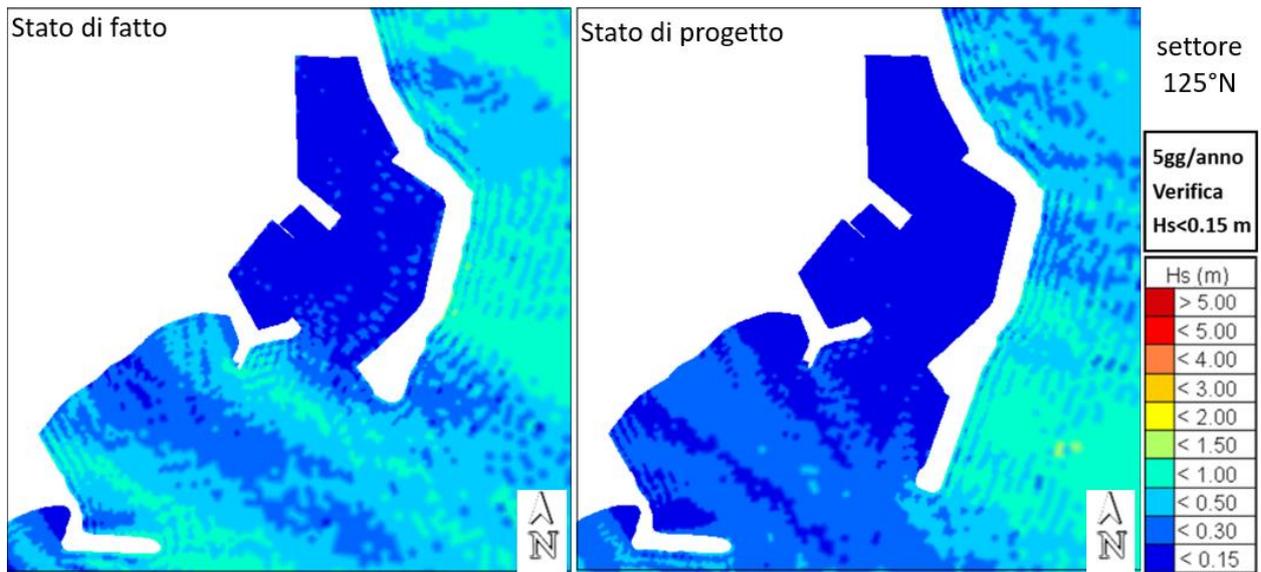


Figura 10 Mappa dell’agitazione SdF e SdP - verifica condizione di Comfort,  $H_s \leq 0.15m$  - settore  $125^\circ N$

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R03 – STUDIO DI AGITAZIONE INTERNA AL PORTO

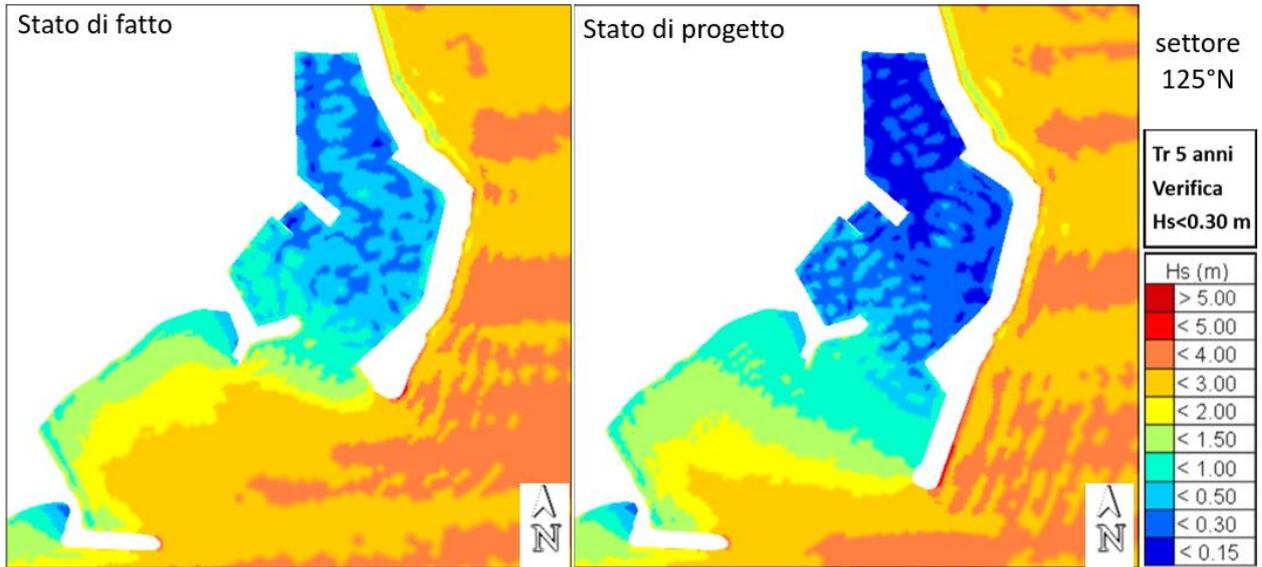


Figura 11 Mappa dell’agitazione SdF e SdP - verifica condizione di Sicurezza,  $H_s \leq 0.30m$  - settore 125°N

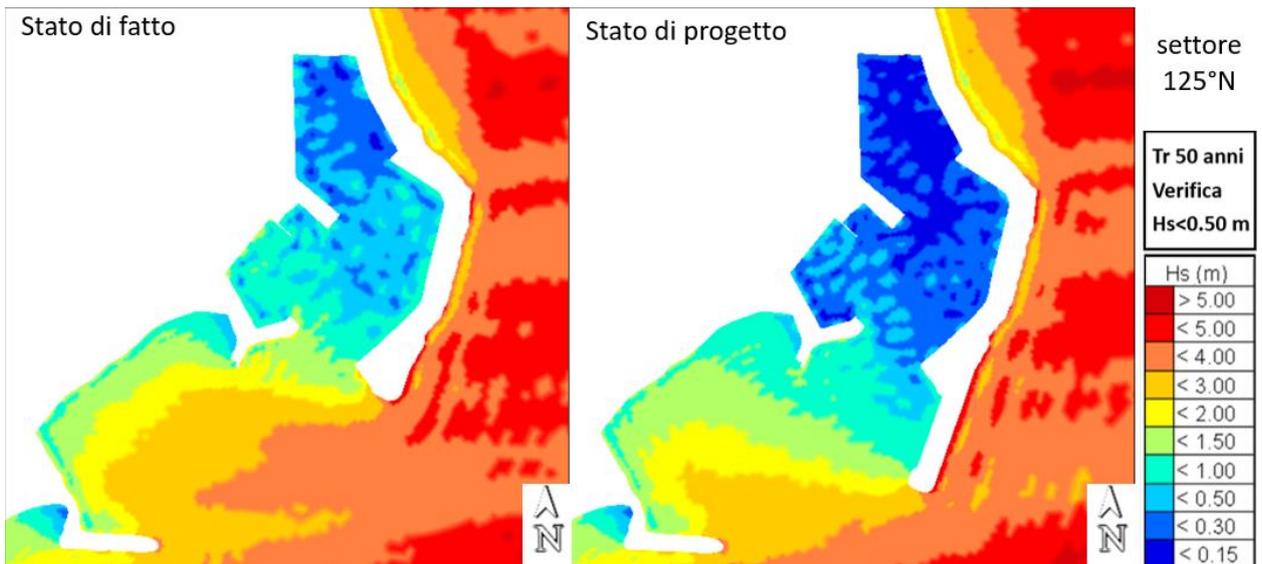
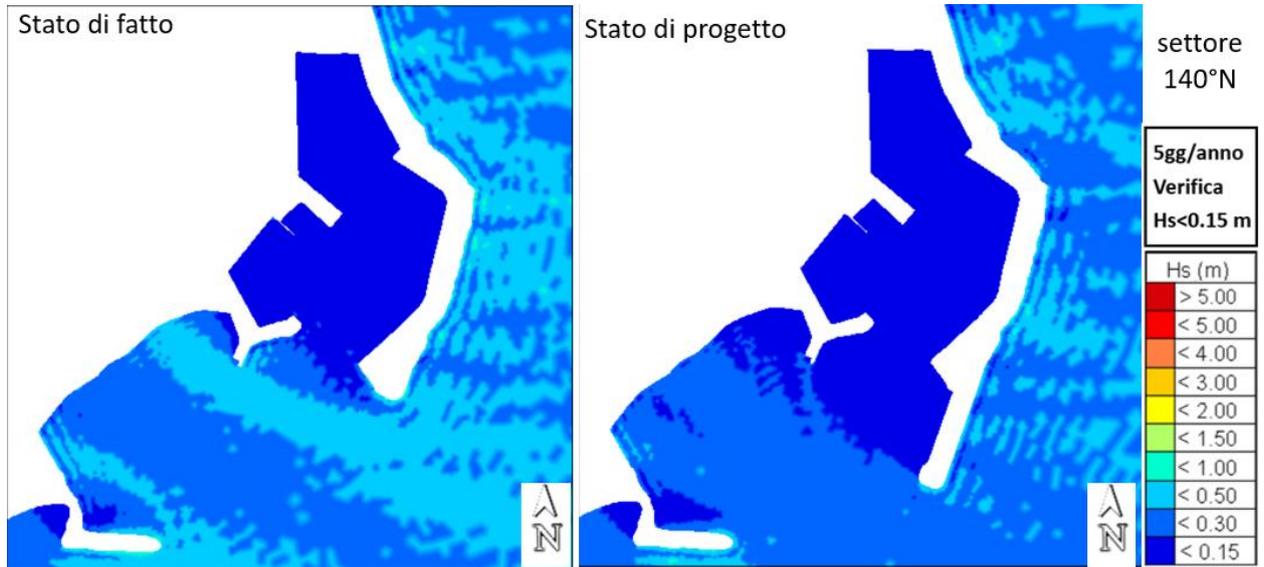


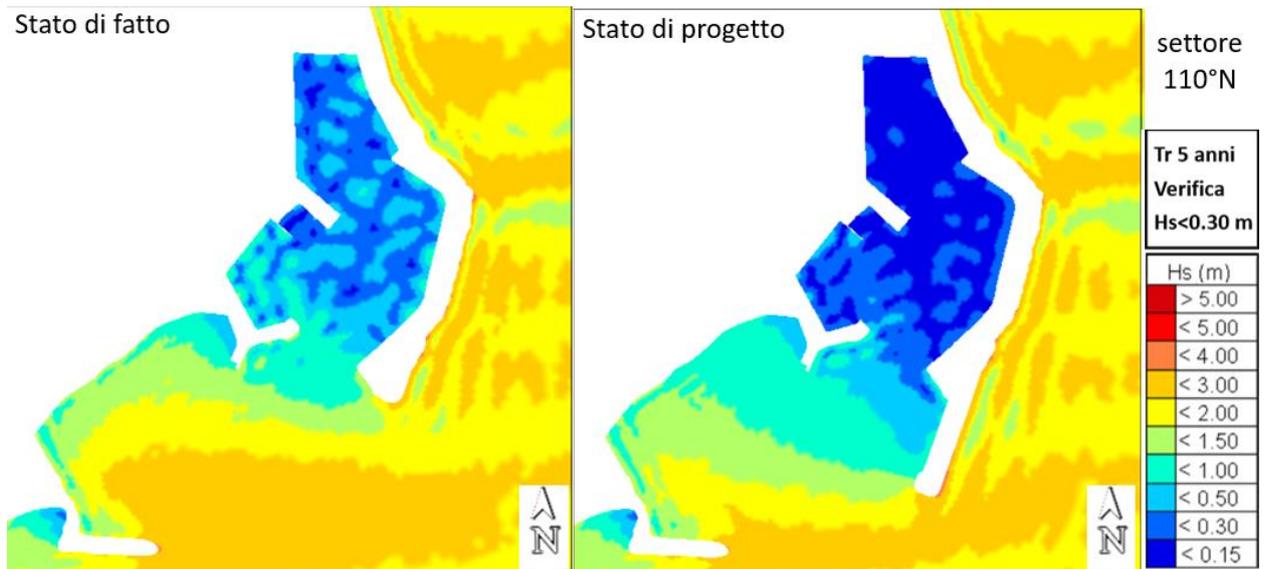
Figura 12 Mappa dell’agitazione SdF e SdP - verifica condizione Limite,  $H_s \leq 0.50m$  - settore 125°N

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R03 – STUDIO DI AGITAZIONE INTERNA AL PORTO



**Figura 13** Mappa dell’agitazione SdF e SdP - verifica condizione di Comfort, Hs≤0.15m - settore 140°N



**Figura 14** Mappa dell’agitazione SdF e SdP - verifica condizione di Sicurezza, Hs≤0.30m - settore 140°N

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R03 – STUDIO DI AGITAZIONE INTERNA AL PORTO

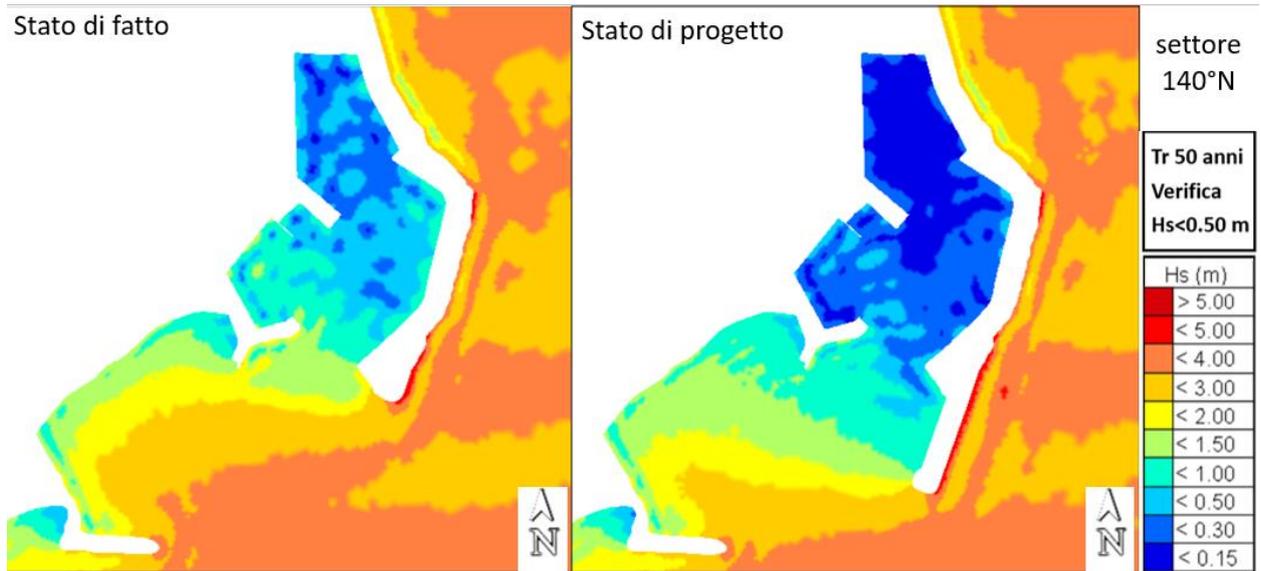


Figura 15 Mappa dell'agitazione SdF e SdP - verifica condizione Limite,  $H_s \leq 0.50m$  - settore 140°N

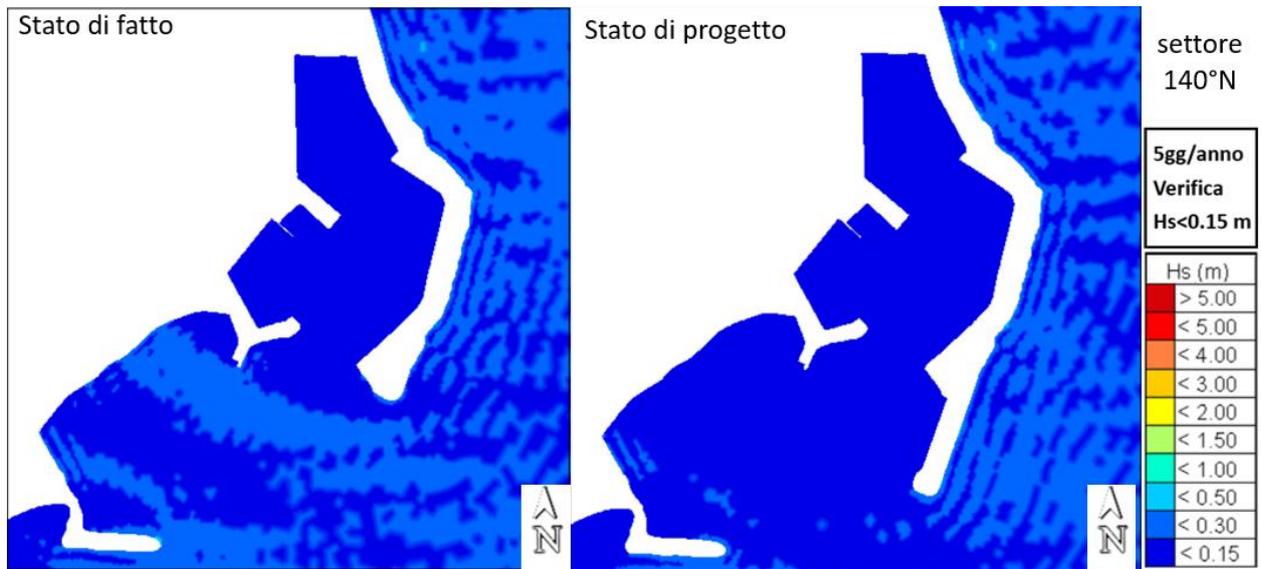
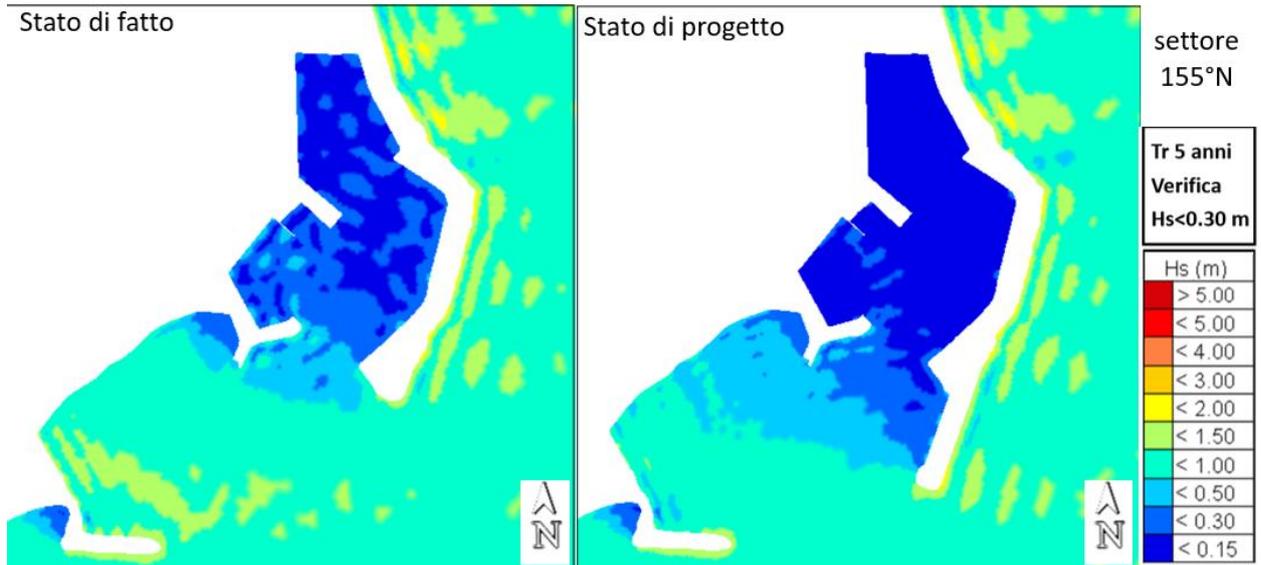


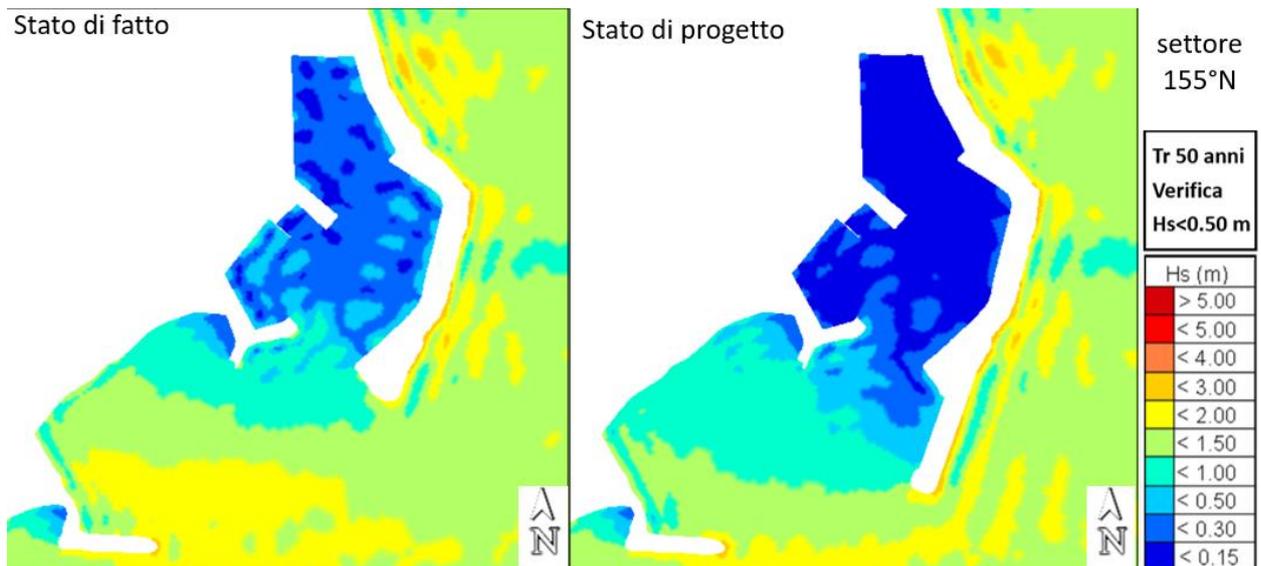
Figura 16 Mappa dell'agitazione SdF e SdP - verifica condizione di Comfort,  $H_s \leq 0.15m$  - settore 155°N

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R03 – STUDIO DI AGITAZIONE INTERNA AL PORTO



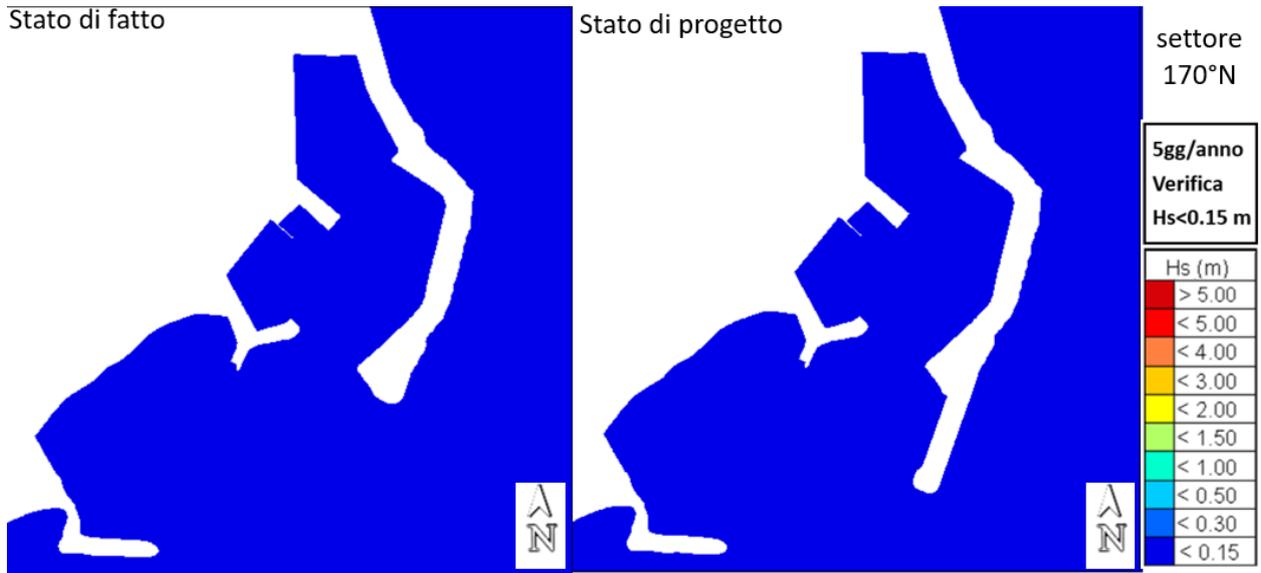
**Figura 17** Mappa dell’agitazione SdF e SdP - verifica condizione di Sicurezza,  $H_s \leq 0.30m$  - settore 155°N



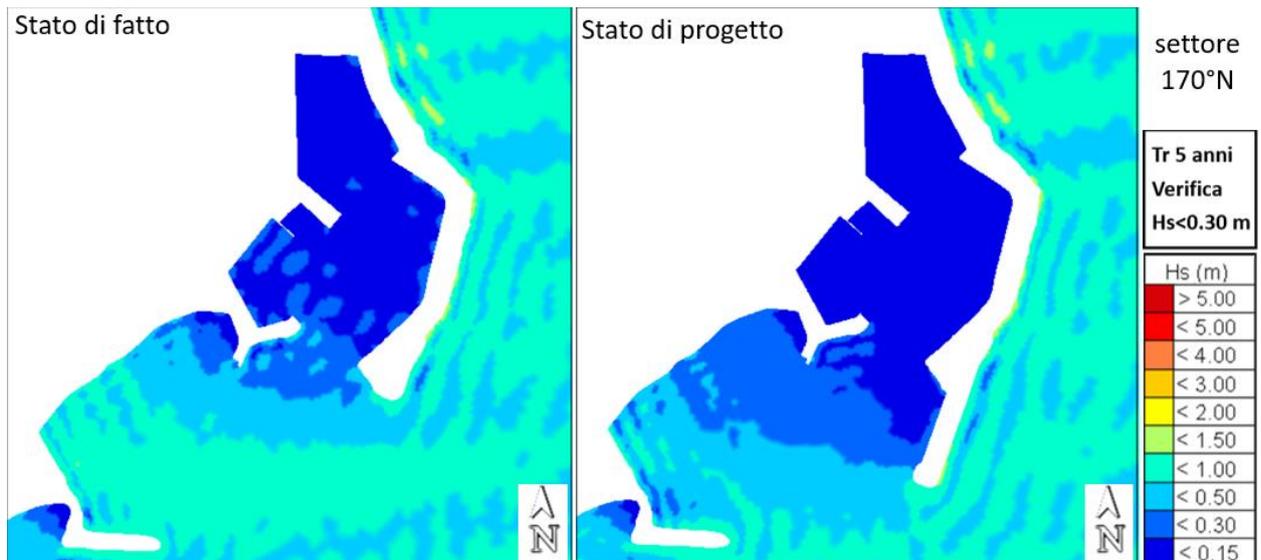
**Figura 18** Mappa dell’agitazione SdF e SdP - verifica condizione Limite,  $H_s \leq 0.50m$  - settore 155°N

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R03 – STUDIO DI AGITAZIONE INTERNA AL PORTO



**Figura 19** Mappa dell’agitazione SdF e SdP - verifica condizione di Comfort,  $H_s \leq 0.15m$  - settore 170°N



**Figura 20** Mappa dell’agitazione SdF e SdP - verifica condizione di Sicurezza,  $H_s \leq 0.30m$  - settore 170°N

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R03 – STUDIO DI AGITAZIONE INTERNA AL PORTO

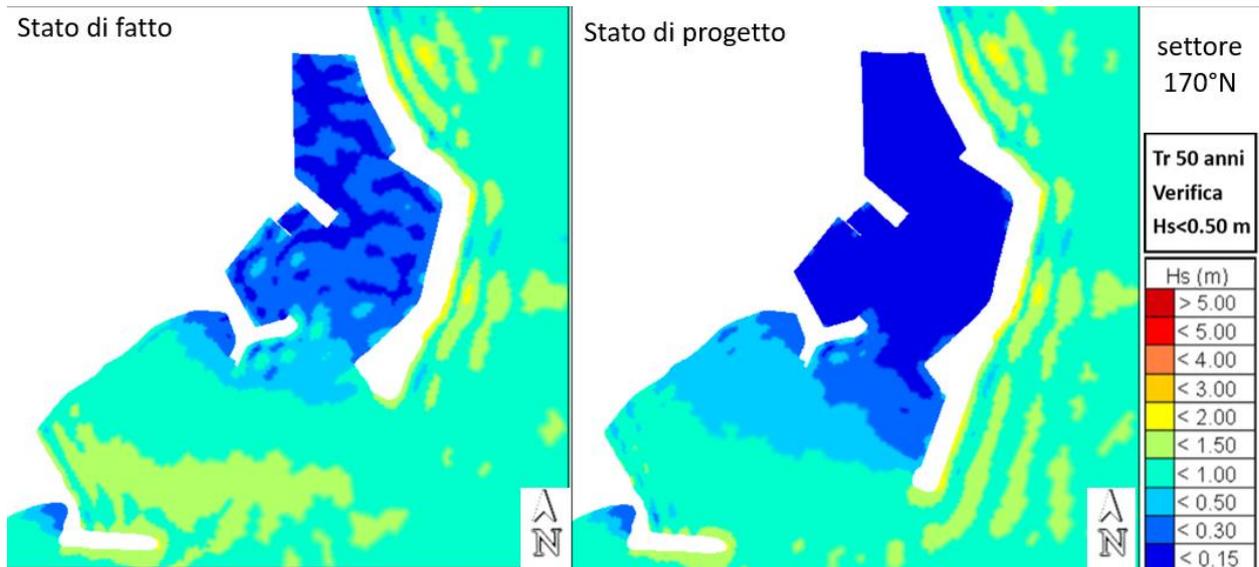


Figura 21 Mappa dell’agitazione SdF e SdP - verifica condizione Limite,  $H_s \leq 0.50\text{m}$  - settore  $170^\circ\text{N}$

### 3.5 Sensitività al periodo di picco $T_p$

I risultati esposti confermano una condizione di generale soddisfacimento dei valori limite dell’agitazione nelle aree interne al porto con riferimento ai limiti suggeriti dalle raccomandazioni PIANC. La caratterizzazione dell’agitazione residua nel porto è stata integrata dalla verifica di sensitività al periodo d’onda, uno dei parametri che maggiormente influisce nella penetrazione del moto ondoso in un bacino portuale. Il set di simulazioni condotte è riportato in Tabella 4 e consiste nelle stesse onde verificate nei risultati del paragrafo 3.4 per lo stato di progetto, a cui sono stati associati diversi periodi di picco in modo da coprire un range significativo da testare.

DIR ( $^\circ\text{N}$ )	$T_R$ (anni)	$H_s$ (m)	$T_{p1}$ (s)	$T_{p2}$ (s)	$T_{p3}$ (s)	condizione	verifica
110	5 gg/anno	0.9	3	5	7	comfort	$H_s \leq 0.15\text{ m}$
	5	3.9	8	10	12	sicurezza	$H_s \leq 0.30\text{ m}$
	50	5.6	9	11	13	limite	$H_s \leq 0.50\text{ m}$
125	5 gg/anno	0.9	3	5	7	comfort	$H_s \leq 0.15\text{ m}$
	5	3.9	8	10	12	sicurezza	$H_s \leq 0.30\text{ m}$
	50	5.6	9	11	13	limite	$H_s \leq 0.50\text{ m}$
140	5 gg/anno	1.4	4	6	8	comfort	$H_s \leq 0.15\text{ m}$
	5	3.6	8	10	12	sicurezza	$H_s \leq 0.30\text{ m}$
	50	4.6	8	10	12	limite	$H_s \leq 0.50\text{ m}$

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R03 – STUDIO DI AGITAZIONE INTERNA AL PORTO

155	5 gg/anno	1.4	4	6	8	comfort	Hs ≤ 0.15 m
	5	3.6	8	10	12	sicurezza	Hs ≤ 0.30 m
	50	4.6	8	10	12	limite	Hs ≤ 0.50 m
170	5 gg/anno	1.4	4	6	8	comfort	Hs ≤ 0.15 m
	5	3.6	8	10	12	sicurezza	Hs ≤ 0.30 m
	50	4.6	8	10	12	limite	Hs ≤ 0.50 m

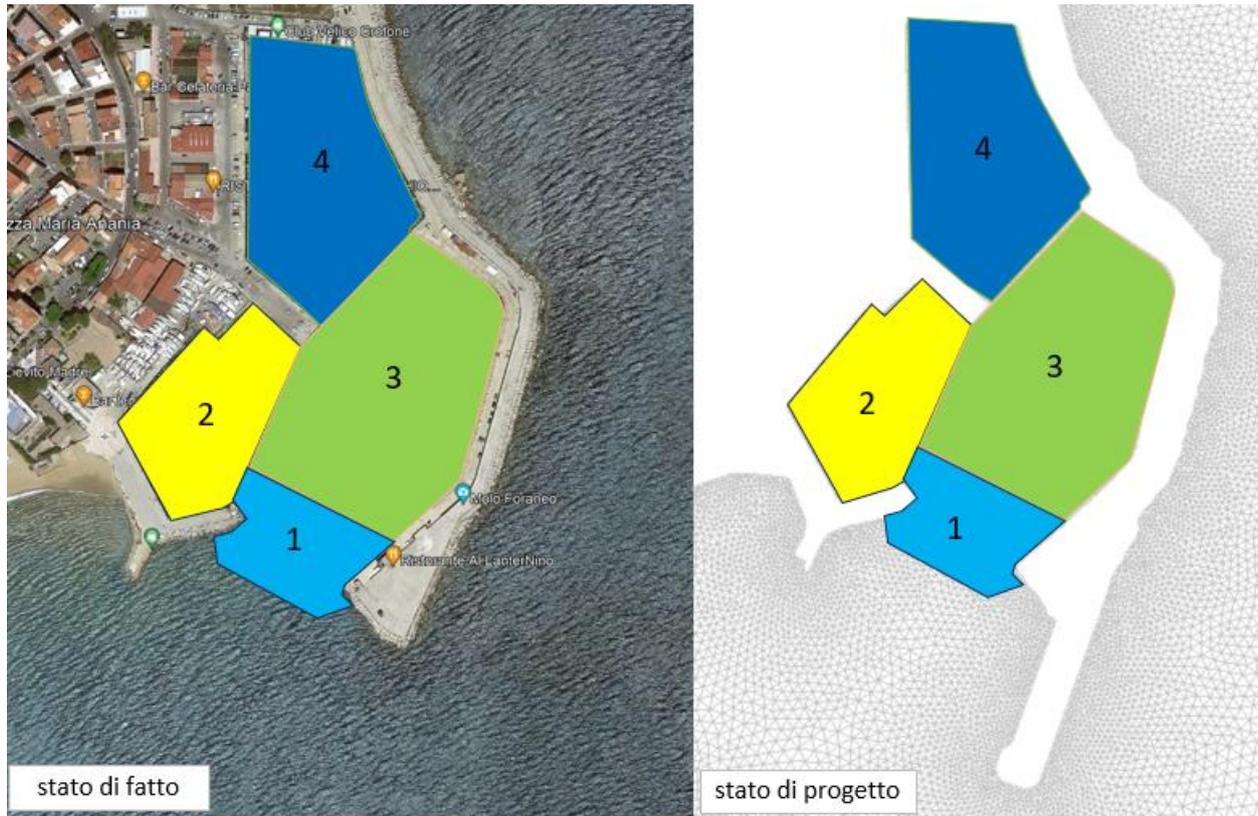
**Tabella 4 Condizioni ondose selezionate per la verifica di sensitività al periodo d'onda per lo stato di progetto**

I risultati sono stati analizzati per ottenere l'agitazione media residua in aree ben definite del porto per lo stato di progetto, la cui suddivisione è stata operata considerando sia lo sviluppo delle opere lungo il perimetro portuale sia l'uso previsto per le diverse strutture. La delimitazione delle 4 aree è riportato in Figura 22, in cui per chiarezza riportano su base ortofoto GoogleEarth e rispetto alla configurazione nello stato di progetto per cui sono state eseguite le suddette verifiche. In particolare:

- area 1, che delimita la zona all'imboccatura del porto;
- area 2, che delimita le aree di ormeggio delle banchine a ovest dell'imboccatura
- area 3, che delimita la porzione centrale del porto e le banchine interne del molo sopraflutto esistente
- area 4, che delimita la darsena più interna del bacino portuale.

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R03 – STUDIO DI AGITAZIONE INTERNA AL PORTO



**Figura 22** Suddivisione aree interne al porto, le simulazioni si riferiscono allo stato di progetto

I risultati delle simulazioni sono riportati di seguito per lo stato di progetto in forma tabellare attraverso la verifica delle condizioni medie di comfort, sicurezza e limite per ognuna delle zone definite e per i 5 settori considerati, ovvero 110°N, 125°N, 140°N, 155°N e 170°N.

In generale anche al variare del periodo di picco dell'onda la penetrazione del moto ondoso nel porto è ben smorzata dalla presenza delle strutture di progetto e migliorata dalla presenza dell'estensione del molo sopraflutto e le condizioni di agitazione interna risultano compatibili con l'uso e gli ormeggi previsti, oltre che con le condizioni limite di transito delle imbarcazioni attraverso l'imboccatura al porto. Inoltre:

- le onde dai settori 140°N e 170°N non inducono effetti significativi in nessuna delle aree interne al porto;

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R03 – STUDIO DI AGITAZIONE INTERNA AL PORTO

- l'agitazione interna al porto nelle aree destinate all'ormeggio delle imbarcazioni risulta nei limiti delle raccomandazioni PIANC;
- l'area 1 (imboccatura) risulta esposta ad una parte del moto ondoso residuo per le ondate da 110-140°N, in particolare la sensibilità al Tp consente di definire non soddisfacente la condizione di comfort per uno stazionamento prolungato di natanti per tale area (circostanza peraltro esclusa dato che l'area è adibita al solo transito delle imbarcazioni);

Nel complesso si confermano i risultati del cap 3.4 e si suggerisce, per le banchine lungo l'area 1, un utilizzo limitato al solo transito e non all'ormeggio/stazionamento prolungato dei natanti.

DIR (°N)	TR (anni)	Hs (m)	Tp (s)	zona 1	zona 2	zona 3
110	5 gg/anno	0.9	3	verificata	verificata	verificata
			5	verificata	verificata	verificata
			7	verificata	verificata	verificata
	5	3.9	8	verificata	non verificata	verificata
			10	verificata	non verificata	verificata
			12	verificata	non verificata	verificata
	50	5.6	9	verificata	verificata	verificata
			11	verificata	verificata	verificata
			13	verificata	verificata	verificata

**Tabella 5 Verifica di sensibilità al Tp per le onde dal settore di provenienza 110°N**

DIR (°N)	TR (anni)	Hs (m)	Tp (s)	zona 1	zona 2	zona 3
125	5 gg/anno	0.9	3	verificata	verificata	verificata
			5	verificata	verificata	verificata
			7	verificata	verificata	verificata
	5	3.9	8	verificata	non verificata	verificata
			10	verificata	non verificata	verificata
			12	verificata	non verificata	verificata
	50	5.6	9	verificata	verificata	verificata
			11	verificata	verificata	verificata
			13	verificata	verificata	verificata

**Tabella 6 Verifica di sensibilità al Tp per le onde dal settore di provenienza 125°N**

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

02.SP.R03 – STUDIO DI AGITAZIONE INTERNA AL PORTO

DIR (°N)	T <sub>R</sub> (anni)	H <sub>s</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	zona 1	zona 2	zona 3
140	5 gg/anno	1.4	4	verificata	verificata	verificata
			6	verificata	verificata	verificata
			8	verificata	verificata	verificata
	5	3.6	8	verificata	verificata	verificata
			10	verificata	verificata	verificata
			12	verificata	verificata	verificata
	50	4.6	8	verificata	verificata	verificata
			10	verificata	verificata	verificata
			12	verificata	verificata	verificata

**Tabella 7 Verifica di sensitività al T<sub>p</sub> per le onde dal settore di provenienza 140°N**

DIR (°N)	T <sub>R</sub> (anni)	H <sub>s</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	zona 1	zona 2	zona 3
155	5 gg/anno	1.4	4	verificata	verificata	verificata
			6	verificata	verificata	verificata
			8	verificata	verificata	verificata
	5	3.6	8	verificata	verificata	verificata
			10	verificata	verificata	verificata
			12	verificata	verificata	verificata
	50	4.6	8	verificata	verificata	verificata
			10	verificata	verificata	verificata
			12	verificata	verificata	verificata

**Tabella 8 Verifica di sensitività al T<sub>p</sub> per le onde dal settore di provenienza 155°N**

DIR (°N)	T <sub>R</sub> (anni)	H <sub>s</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	zona 1	zona 2	zona 3
170	5 gg/anno	1.4	4	verificata	verificata	verificata
			6	verificata	verificata	verificata
			8	verificata	verificata	verificata
	5	3.6	8	verificata	verificata	verificata
			10	verificata	verificata	verificata
			12	verificata	verificata	verificata
	50	4.6	8	verificata	verificata	verificata
			10	verificata	verificata	verificata
			12	verificata	verificata	verificata

**Tabella 9 Verifica di sensitività al T<sub>p</sub> per le onde dal settore di provenienza 170°N**

#### 4. CONCLUSIONI

La struttura del molo sopraflutto del porto vecchio di Crotona sarà estesa per migliorare la protezione del bacino interno della marina. Il presente studio riporta l'analisi condotta per la caratterizzazione delle condizioni di agitazione interna previste lungo le darsene interne e all'imboccatura, confrontando lo stato attuale dei luoghi (stato di fatto) con quello di progetto. Gli input alla modellazione numerica, volta a definire le condizioni di agitazione ondosa interna al porto, sono stati estratti dallo studio meteomarinario che comprende l'analisi degli eventi estremi a largo per il paragone in esame. Il grado di penetrazione delle onde e la verifica della configurazione di progetto sono stati verificati rispetto ai limiti suggeriti dalle raccomandazioni PIANC per il comfort nei porti turistici. Dallo studio si evince quanto segue:

- l'analisi degli eventi estremi condotta per sub-settori che interessano direttamente il porto ha riguardato la caratterizzazione delle onde per assegnati tempi di ritorno, da cui sono state estratte le onde da utilizzare per lo studio di agitazione. Esse sono state selezionate per tener conto delle onde che potenzialmente possono indurre effetti sull'agitazione interna al porto, ovvero sono state considerate 5 direzioni di provenienza del moto ondoso nel settore 110-170°N;
- lo studio di agitazione ondosa è stato condotto con riferimento alle raccomandazioni PIANC, che definiscono le onde da utilizzare per verificare la condizione di “comfort”, “sicurezza” e “limite” all'interno del bacino. L'analisi è stata condotta utilizzando le onde calcolate attraverso l'analisi statistica integrando le simulazioni con un ulteriore set di onde per esplorare la sensibilità al periodo di picco dell'onda. I risultati hanno mostrato generalmente il soddisfacimento delle verifiche delle condizioni per le aree definite all'interno del bacino e per la zona dell'imboccatura, salvo che per le onde con periodo di ritorno pari a 5 anni per le direzioni 110 e 125°N, con riferimento all'imboccatura per la verifica di “sicurezza  $H_s < 0.3$  m” tale verifica non pregiudica le attività di manovra e transito delle imbarcazioni all'imboccatura, ma è espressamente riferita alle imbarcazioni ormeggiate;

**“REALIZZAZIONE DELLA PROSECUZIONE DEL MOLO FORANEO DEL PORTO VECCHIO DI CROTONE PER MIGLIORARE IL RIDOSSO IN PRESENZA DI CONDIZIONI METEO AVVERSE”**

---

02.SP.R03 – STUDIO DI AGITAZIONE INTERNA AL PORTO

- l'agitazione interna al bacino, per lo stato di progetto, risulta sempre soddisfatta, ovvero le condizioni di sicurezza per i natanti ormeggiati nel porto rimane soddisfatta;
- lo stato di progetto determina un generale miglioramento dell'agitazione interna, mitigando degli effetti che invece si osservano dai risultati delle simulazioni per il porto nella configurazione attuale;
- in corrispondenza dell'imboccatura sono sempre mediamente verificate le condizioni limite per il transito delle imbarcazioni.