



Autorità di Sistema Portuale
del Mare di Sardegna

PORTO DI CAGLIARI

ADEGUAMENTO TECNICO FUNZIONALE

Titolo elaborato :

S2 - STUDIO DI AGITAZIONE ONDOSA PORTUALE

Scala:

2 4 0 1 0 P R 0 0 2 - 2 M A R

Segretario Generale:
Avv. Natale Ditel

R.U.P.:
Ing. Alessandra Mannai

Collaboratore del R.U.P.:
Ing. Monica Deidda

Consulenze specialistiche di
Ingegneria idraulica marittima



Gruppo di lavoro:
Ing. Paolo Contini
Prof. Ing. Paolo De Girolamo
Ing. Myrta Castellino
Ing. Jessica Ciarrocchi
Arch. Fabrizio D'Andrea

Ing. Gioele Ruffini
Ing. Davide Saltari

	31/01/2025	2	AGGIORNAMENTO PER PARERE CSLPP	Ciarrocchi	De Girolamo	Contini
	20/12/2024	1	EMISSIONE DEFINITIVA	Ciarrocchi	De Girolamo	Contini
	08/10/2024	0	EMISSIONE IN BOZZA	Ciarrocchi	De Girolamo	Contini
Rif. Dis.	Data	Rev.	DESCRIZIONE	Redatto:	Controllato:	Validato:

La MODIMAR s.r.l. si riserva la proprietà di questo disegno con la proibizione di riprodurlo o trasferirlo a terzi senza autorizzazione scritta.
This document is property of MODIMAR s.r.l. Reproduction and divulgation forbidden without written permission

Visto del Committente:

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S2 - Studio di agitazione ondosa portuale.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	002	-2	MAR

INDICE

1 INTRODUZIONE	1
1.1 Obiettivi e metodologia di lavoro	1
1.1.1 Fase 1	1
1.1.2 Fase 2	2
2 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E DELLA PROBLEMATIC	4
3 MOTO ONDOSI DI RIFERIMENTO	6
3.1 Condizioni di moto ondoso al largo ed in prossimità dell'imboccatura portuale	6
4 STUDIO DELLA PENETRAZIONE DEL MOTO ONDOSI	8
4.1 Modello numerico utilizzato	8
4.2 Selezione delle forzanti di moto ondoso simulate	9
4.3 Configurazioni portuali esaminate nella Fase 1	10
4.4 Configurazioni portuali esaminate nella Fase 2	10
4.5 Definizione delle condizioni al contorno	11
5 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI NUMERICHE DI AGITAZIONE ONDOSI	
RELATIVI ALLA FASE 1	16
6 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI NUMERICHE DI AGITAZIONE ONDOSI	
RELATIVI ALLA FASE 2 (Configurazione ATF 2025)	16
6.1 Direzione di moto ondoso: 180°N, TR=2 anni	17
6.2 Direzione di moto ondoso: 180°N, TR=20 anni	18
6.3 Direzione di moto ondoso: 180°N, TR=50 anni	18
6.4 Direzione di moto ondoso: 165°N, TR=2 anni	19
6.5 Direzione di moto ondoso: 165°N, TR=20 anni	19
6.6 Direzione di moto ondoso: 165°N, TR=50 anni	20
6.7 Direzione di moto ondoso: 150°N, TR=2 anni	20
6.8 Direzione di moto ondoso: 150°N, TR=20 anni	21
6.9 Direzione di moto ondoso: 150°N, TR=50 anni	21
Allegato 1: TAVOLE	1

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S2 - Studio di agitazione ondosa portuale.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	002	-2	MAR

1 INTRODUZIONE

L'AdSP del Mare di Sardegna con Decreto n. 216 del 14/06/2024 ha affidato alla società Modimar s.r.l. l'attività di supporto specialistico alla Direzione Tecnica SUD dell'Ente per lo studio della configurazione delle opere marittime e per gli aspetti di ingegneria marittima, finalizzato alla predisposizione dell'Adeguamento Tecnico Funzionale del PRP per la zona "A" – Porto Turistico del PRP di Cagliari (CIG B22212C614).

La presente relazione riporta i risultati dello "Studio di agitazione ondosa portuale" che costituisce parte del servizio di supporto specialistico di cui sopra.

Il ruolo di coordinamento del gruppo di lavoro della Modimar, che ha curato le prestazioni specialistiche di ingegneria idraulica marittima a supporto del Servizio Tecnico dell'AdSP, è stato svolto dall'Ing. Paolo Contini.

Lo Studio specialistico di seguito riportato è stato redatto dall' Ing. Jessica Ciarrocchi e dalla Dott.ssa Ing. Myrta Castellino con il coordinamento scientifico del Prof. Ing. Paolo De Girolamo.

1.1 Obiettivi e metodologia di lavoro

L'obiettivo del presente studio è quello di analizzare mediante l'applicazione di un idoneo codice numerico, l'agitazione del moto ondoso nella zona del Porto Vecchio di Cagliari, destinata ai sensi del vigente PRP, a costituire il Porto Turistico.

Si richiama che il PRP di Cagliari e l'ATF in corso di redazione, prevedono di realizzare una nuova opera interna portuale (denominata Pennello Bonaria) avente la funzione di difendere dal moto ondoso incidente e di delimitare lo specchio d'acqua del Porto Turistico.

Il lavoro, come di seguito descritto, è stato diviso in due fasi.

1.1.1 Fase 1

Nella prima fase si sono esaminate due configurazioni portuali, in particolare:

- lo stato attuale, denominato **Configurazione A**;
- la configurazione di PRP (mantenendo la banchina di riva nell'assetto attuale), denominata **Configurazione B** per la quale sono state esaminate due varianti ciascuna caratterizzata da diversi valori del coefficiente di riflessione (K) per la nuova diga. Le due varianti sono state denominate:
 - **Configurazione B1**, con $K = 0.9$;
 - **Configurazione B2**, con $K = 0.35$;

I risultati ottenuti con lo stato attuale sono stati utilizzati sia per valutare l'effettiva necessità dell'opera per schermare il moto ondoso, sia in termini comparativi per valutare gli effetti della nuova diga interna.

Le condizioni di moto ondoso incidente simulate sono state desunte dallo "Studio Meteomarino"

In particolare si è analizzata l'agitazione ondosa in relazione a stati di mare estremi caratterizzati dai tempi di ritorno di 2, 20 e 50 anni provenienti dal settore di traversia (compreso tra 140° e 180° N) che interessa l'imboccatura del Porto Vecchio.

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S2 - Studio di agitazione ondosa portuale.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	002	-2	MAR

Per ciascun tempo di ritorno si sono esaminate 3 direzioni di provenienza delle onde allo scopo di comprendere: (i) la variabilità direzionale delle onde nell'ambito del settore di traversia e (ii) la possibile influenza, sulle onde incidenti, delle riflessioni operate dalle opere foranee del Porto Canale. In totale quindi sono state eseguite $3 \times 3 \times 3 = 27$ simulazioni numeriche.

Si evidenzia che mentre il tempo di ritorno di 2 anni rappresenta condizioni di moto ondoso abbastanza frequenti, il $Tr = 20$ anni rappresenta condizioni di moto ondoso estreme che comunque possono verificarsi più volte durante la vita economica dell'opera. Infine il $Tr = 50$ anni rappresenta condizioni limite con una piccola probabilità di accadimento.

Per condurre il presente studio è stato utilizzato il codice numerico CGWAVE, sviluppato dall'US Army Corps of Engineers, che risolve l'equazione detta di "mild-slope" di tipo ellittico, mediante la tecnica numerica degli elementi finiti utilizzando, per discretizzare l'area di calcolo, elementi di forma triangolare con geometria comunque variabile nello spazio.

I risultati ottenuti con le simulazioni numeriche in termini di altezza d'onda significativa H_s sono stati confrontati con i limiti di agitazione interna per i porti turistici suggeriti dal PIANC (AIPCN-PIANC, ASSOCIAZIONE INTERNAZIONALE DI NAVIGAZIONE) e contenuti nel documento dal titolo: "Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici". Tali limiti prevedono di non superare le seguenti soglie:

- condizioni di "sicurezza" valutate in relazione al tempo di ritorno $Tr = 5$ anni: $H_s \leq 0.30$ m;
- condizioni "limite" valutate in relazione al tempo di ritorno $Tr = 50$ anni: $H_s \leq 0.50$ m;

Le simulazioni effettuate con lo stato attuale (**Configurazione A**) hanno mostrato il superamento delle condizioni di agitazione limite suggerite dall'AIPCN e pertanto si può affermare che risulta necessario prevedere un'opera interna di protezione del nuovo Porto Turistico dal moto ondoso incidente proveniente dalla imboccatura del Porto Vecchio.

Nella prima configurazione presa in esame per la nuova diga (**Configurazione B1**) si è assunto per le opere foranee della stessa un valore del coefficiente di riflessione elevato ($K = 0.9$), compatibile con opere del tipo "a parete verticale" prive di dispositivi "antiriflettenti". I risultati ottenuti, pur avendo mostrato un effetto riduttivo dell'agitazione ondosa all'interno del nuovo porto turistico rispetto alla situazione attuale, hanno evidenziato che le riflessioni indotte sulle onde incidenti che raggiungono il lato esterno della nuova diga di delimitazione, provocano, rispetto alla situazione attuale, un aumento del livello medio di agitazione portuale nella porzione Nord del Porto Vecchio.

Pertanto per limitare tale effetto si è deciso di ridurre il coefficiente di riflessione della nuova diga, sia sul paramento esterno sia sul paramento interno, portandolo a $K = 0.35$, ovvero ad un valore compatibile ad esempio con un'opera del tipo "a gettata" oppure con un'opera del tipo "a parete verticale" dotata di idonee celle antiriflettenti.

I risultati ottenuti, che soddisfano i limiti suggeriti dal PIANC, hanno mostrato una riduzione dell'agitazione ondosa nella zona Nord del Porto Vecchio, sia in relazione alla configurazione B1, sia in relazione allo stato attuale.

1.1.2 Fase 2

Nella Fase 2 si è esaminata la Configurazione C, scaturita dall'ottimizzazione della Configurazione B2, la quale corrisponde a quella di ATF base.

2 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E DELLA PROBLEMATICA

Con riferimento alla Figura 2.1, il Porto di Cagliari si colloca nella porzione meridionale della Sardegna e nella zona centrale dell'omonimo Golfo il quale si affaccia sul Canale di Sardegna ad una distanza di circa 200 km dalla costa africana.

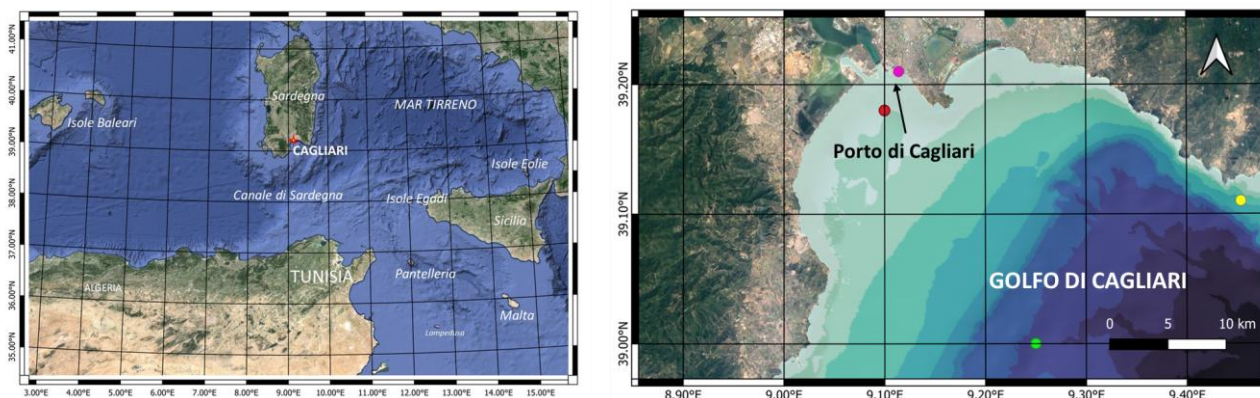


Figura 2.1 – Inquadramento geografico del porto di Cagliari.

Il porto attualmente è suddiviso in due parti, il Porto Canale ad Ovest ed il Porto Vecchio situato ad Est (Figura 2.2).

L'area di interesse per il presente lavoro ricade nella porzione meridionale del Porto Vecchio e riguarda il Porto Turistico previsto dal PRP.

In particolare è stata analizzata l'agitazione ondosa nello specchio d'acqua del porto turistico, sia nello stato attuale, sia a seguito della realizzazione dell'opera di delimitazione portuale interna denominata "Pennello Bonaria" e del pontile denominato "Pennello S. Elmo", come stabilito dal PRP e riportato nella Figura 2.3.



Figura 2.2 – Porto di Cagliari nello stato attuale (2024).

PORTO VECCHIO

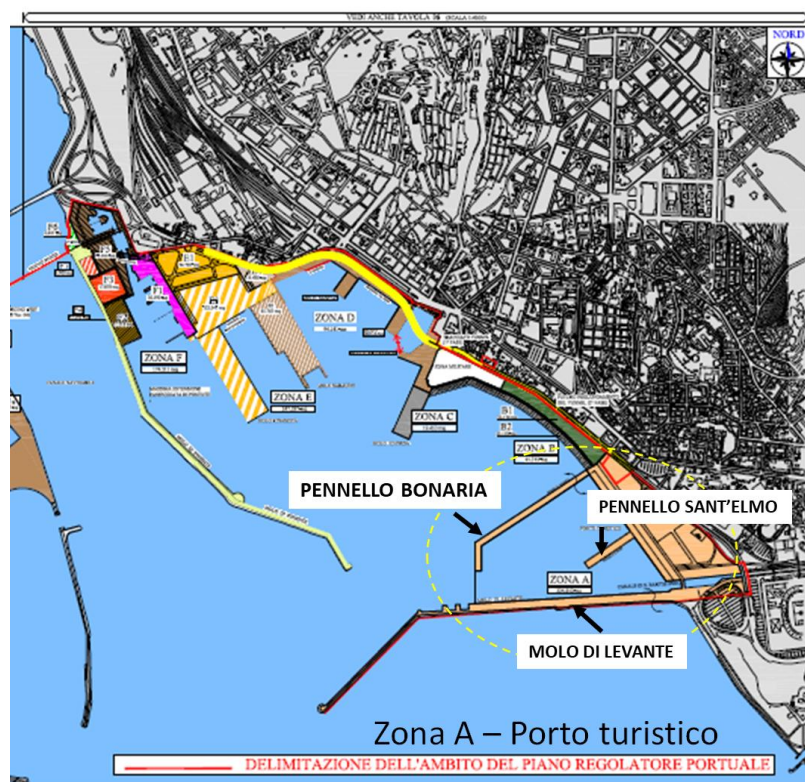


Figura 2.3 – Porto di Cagliari – Dettaglio zonizzazione del Porto Vecchio prevista dal PRP.

3 MOTO ONDOSO DI RIFERIMENTO

Nei seguenti paragrafi si riportano in maniera sintetica le caratteristiche del moto ondoso utilizzate per il presente studio di agitazione ondosa, desunti dallo "Studio meteomarinario" al quale si rimanda per i dettagli.

3.1 Condizioni di moto ondoso al largo ed in prossimità dell'imboccatura portuale

Nell'ambito dello studio di propagazione da largo verso riva è stato applicato il modello di propagazione inversa spettrale MEROPE il quale ha consentito di propagare nel punto di inversa spettrale tutti gli stati di mare della serie storica 1940-2022 ricostruita al largo e di valutare pertanto le caratteristiche di clima di moto ondoso in prossimità dell'imboccatura del Porto di Cagliari.

La serie storica propagata in costa è stata quindi analizzata per definire il clima ondametrico medio nel punto di inversa.

I risultati ottenuti sono riportati nel grafico polare (rosa di moto ondoso media annuale) a destra della Figura 3.1. Mentre a sinistra della stessa figura è riportata per un confronto diretto la rosa ondametrica a largo.

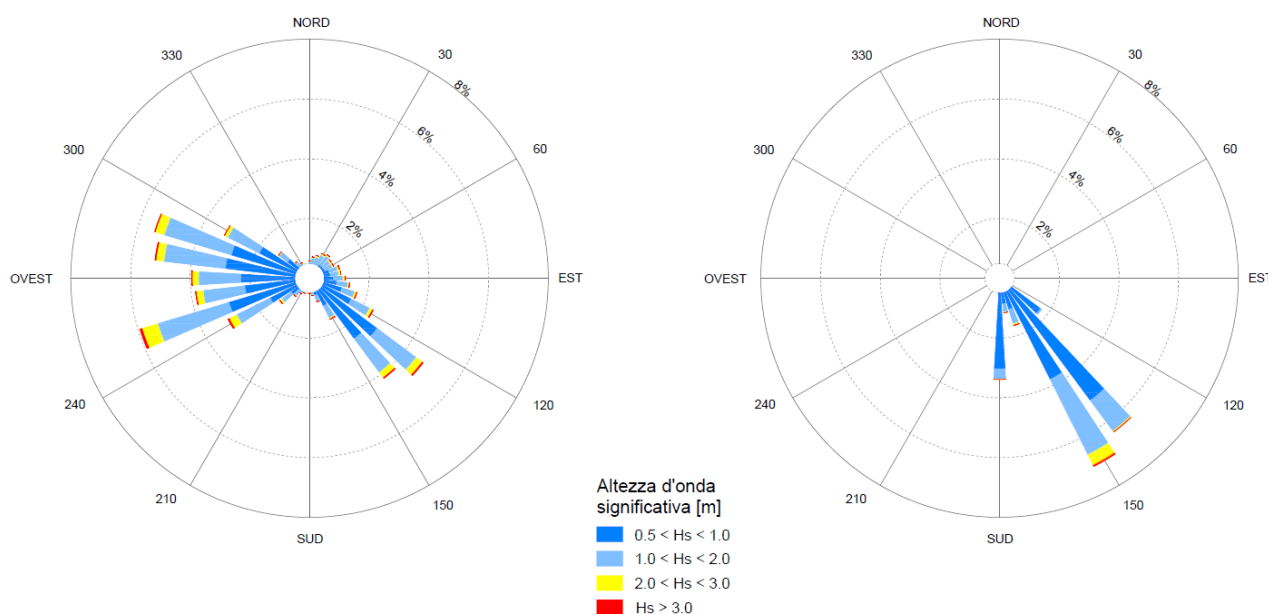


Figura 3.1 - Rose ondametriche a largo nel Punto ERA5 Cagliari (pannello di sinistra) e propagate nel Punto di inversa in prossimità del Porto di Cagliari (pannello di destra).



Figura 3.2 - Esposizione geografica del punto di acquisizione ERA5 Cagliari e del punto di inversa spettrale.

Tenendo conto delle differenti esposizioni geografiche del Punto ERA5 Cagliari e del Punto di Inversa spettrale, evidenziati nella Figura 3.2, si comprende che nel punto d'inversa posto di fronte all'imboccatura del porto di Cagliari risultano completamente schermati dalla costa gli stati di mare provenienti a largo dal III e IV quadrante, mentre quelli provenienti dal II quadrante tendono a ruotare per rifrazione verso Sud.

In sostanza quindi i due settori di traversia presenti a largo, in costa si riducono ad uno solo ricadente nel II quadrante.

Per il presente studio si è analizzata l'agitazione ondosa in relazione a stati di mare estremi, riportati in , caratterizzati dai tempi di ritorno di 2, 20 e 50 anni provenienti dal settore di traversia (compreso tra 140° e 180°N).

Tr (anni)	Hs (m)	Tp (s)
2	3.0	7.8
5	3.5	8.4
10	3.9	8.7
15	4.1	8.9
20	4.2	9.1
25	4.4	9.2
50	4.8	9.5
100	5.2	9.9

Tabella 3.1- Eventi estremi - Settore 140°N-180°N.

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S2 - Studio di agitazione ondosa portuale.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	002	-2	MAR

4 STUDIO DELLA PENETRAZIONE DEL MOTO ONDOSONO

4.1 Modello numerico utilizzato

Per condurre il presente studio è stato utilizzato il codice numerico CGWAVE, sviluppato dall'US Army Corps of Engineers, che risolve l'equazione detta di "mild-slope" (Berkhoff, 1972¹, De Girolamo et al. (1988²), Beltrami et al. 2001³, Bellotti et al. 2003⁴) di tipo ellittico, mediante la tecnica numerica degli elementi finiti utilizzando, per discretizzare l'area di calcolo, elementi di forma triangolare con geometria comunque variabile nello spazio. L'equazione di mild-slope regola la propagazione di onde regolari su fondali variabili in presenza dei fenomeni fisici combinati di diffrazione, rifrazione, riflessione e dissipazioni di energia per frangimento e attrito sul fondo. Il modello può tenere conto della dispersione in direzione e frequenza dell'energia.

Il modello numerico CGWAVE è stato validato a seguito di numerosi test messi a disposizione dagli autori (Vijay Panchang, Zeki Demirbilek⁵), nei quali i risultati del modello sono stati confrontati con osservazioni di laboratorio e soluzioni analitiche.

Per approfondimenti sul modello CGWAVE e per ulteriori riferimenti bibliografici si rimanda alla pagina internet: <https://www.xmswiki.com/wiki/SMS:CGWAVE>.

Si osserva che i codici agli elementi finiti che risolvono la versione ellittica della mild-slope, costituiscono attualmente uno degli strumenti maggiormente affidabili e versatili per eseguire studi di penetrazione del moto ondoso nei bacini portuali. Uno dei vantaggi di questi codici risiede nel fatto che è possibile imporre, con esattezza, lungo le linee che identificano le banchine portuali, il coefficiente di riflessione desiderato. Ciò invece non è possibile, ad esempio, con i modelli tipo "Boussinesq", per i quali è necessario creare lungo le banchine contorni "fittizi" assorbenti, denominati nella letteratura specializzata "sponge-layers". Questi contorni occupano uno spazio "fisico" in direzione ortogonale alla banchina, che nella realtà non esiste. La larghezza degli "sponge-layers" dipende dalla lunghezza delle onde incidenti e dal coefficiente di riflessione che si vuole riprodurre numericamente. In tal modo si è costretti a modificare in modo "fittizio", rispetto alla realtà, la geometria delle banchine, ottenendo risultati "approssimati" proprio nella zona di maggior interesse, ovvero dove ormeggiano le navi.

Un ulteriore vantaggio dei modelli tipo "mild-slope" agli elementi finiti, risiede nel fatto che la griglia di calcolo consente di seguire in modo accurato geometrie dei contorni anche molto articolate e di qualsiasi forma, poiché è possibile modificare, dove è necessario, la forma e la dimensione degli elementi, senza incrementare in modo rilevante i tempi di calcolo.

¹ Berkhoff, J.C.W., (1972), "Computation of combined refraction-diffraction", Proc., 13th Int. Conf. On Coast. Eng., ASCE, New York, 471-490.

² De Girolamo, P., Kostense, J.K., Dingemans, M.W. (1988), "Inclusion of wave breaking in a mild slope model", Proc. Int. Con. Computer model in Ocean Eng., Schrefler & Zienkiewicz, Balkema, Rotterdam, the Netherlands.

³ Beltrami, G.M., Bellotti, G., De Girolamo, P. and Sammarco, P. (2001) "Treatment of Wave Breaking and Total Absorption in a Mild-slope Equation FEM model", Jour. Of Waterway, Port, Coastal and ocean Eng., ASCE, Sept.-Oct. 2001, pp. 263-271.

⁴ Bellotti, G., Beltrami, G.M., and De Girolamo, P. (2003), "Internal generation of waves in 2D fully elliptic mild-slope equation FEM models", Coastal Engineering, 49 (2003) pp. 71-81.

⁵ Panchang, Demirbilek, "Simulation of waves in harbors using two-dimensional ellipticequation models", In:Advances in Coastal and Ocean Engineering Vol. 7. Word Scientific PublishingCo., p. 125-162

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S2 - Studio di agitazione ondosa portuale.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	002	-2	MAR

Ciò non è possibile, ad esempio, con i codici tipo Boussinesq che di solito risolvono le equazioni discretizzandole alle differenze finite su griglie di calcolo dal dominio generico di forma rettangolare e con passo di discretizzazione costante.

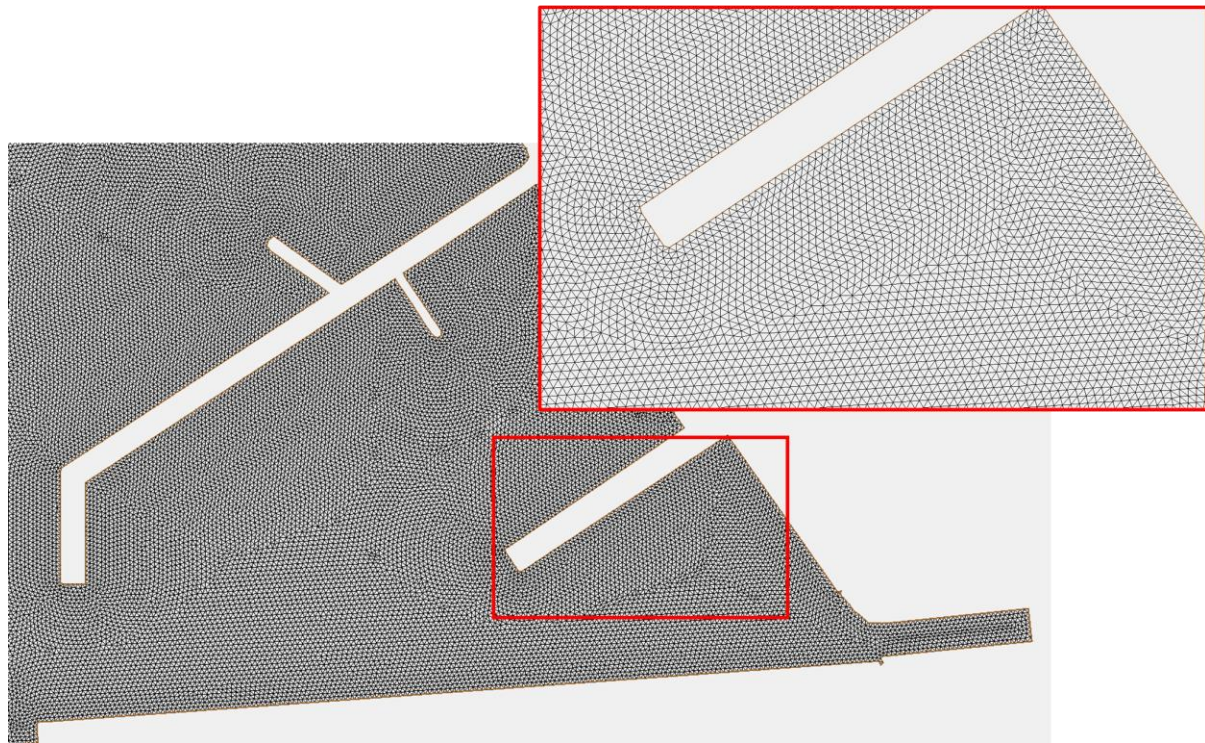


Figura 4.1 – Dettaglio mesh di calcolo utilizzata nel modello numerico agli elementi finiti CGWAVE.

Nella fase preliminare dello studio è stata costruita una fitta mesh di calcolo (riportata parzialmente a titolo di esempio nella Figura 4.1), con la quale sono stati discretizzati gli specchi liquidi da simulare. Successivamente, all'interno del modello di calcolo sono state definite le condizioni al contorno sia in termini di forzanti del moto ondoso (altezza, periodo e direzione dell'altezza d'onda incidente) sia come valori del coefficiente di riflessione da associare ai diversi contorni che caratterizzano gli schemi portuali presi in esame per il porto di Cagliari.

4.2 Selezione delle forzanti di moto ondoso simulate

Per la determinazione dei livelli di agitazione ondosa residua da considerare nelle simulazioni all'interno del Porto Vecchio di Cagliari, sono stati esaminati gli scenari che prevedono le condizioni di moto ondoso riportati nella Tabella 4.1.

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S2 - Studio di agitazione ondosa portuale.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	002	-2	MAR

Condizioni di moto ondoso	TR (anni)	Dir (°N)	Tp (s)	Hs (m)
1	2	180	8.0	3.0
2	20	180	9.0	4.2
3	50	180	9.5	4.8
4	2	165	8.0	3.0
5	20	165	9.0	4.2
6	50	165	9.5	4.8
7	2	150	8.0	3.0
8	20	150	9.0	4.2
9	50	150	9.5	4.8

Tabella 4.1 - Parametri di input per lo studio dell'agitazione interna nel porto di Cagliari.

4.3 Configurazioni portuali esaminate nella Fase 1

Le configurazioni portuali esaminate nell'ambito della prima fase del presente studio sono di seguito descritte.

➤ Configurazione A

La configurazione A coincide con lo stato attuale del porto di Cagliari.

➤ Configurazione B1

Questa configurazione contempla le opere previste dall'ATF (vedi Figura 2.3), nello specifico differisce dalla configurazione attuale (Configurazione A) per:

- i. prolungamento dei pennelli Bonaria e Sant'Elmo;
- ii. la riqualificazione del Molo di Levante.

In questa configurazione il prolungamento del pennello Bonaria è stato pensato come opera riflettente, con un coefficiente di riflessione K pari a 0.9. Inoltre, sia per il pennello Sant'Elmo che per la riqualificazione del Molo di Levante, sono stati assunti coefficienti di riflessione pari a $K = 0.9$ e dunque assimilabili a opere a parete verticali riflettenti.

➤ Configurazione B2

Quest'ultima configurazione presenta le stesse caratteristiche planimetriche della Configurazione B1 ma è caratterizzata da un coefficiente di riflessione del pennello Bonaria $K = 0.35$, dunque realizzato con un'opera del tipo "a gettata" o con un'opera dotata di dispositivi antiriflettenti. Anche in questo caso, per il pennello Sant'Elmo e per la riqualificazione del Molo di Levante, sono stati assunti coefficienti di riflessione pari a $K = 0.9$ e dunque assimilabili a opere a parete verticali riflettenti.

4.4 Configurazioni portuali esaminate nella Fase 2

La configurazione portuale esaminata nella seconda fase del presente studio riguarda l'ottimizzazione della Configurazione B2, ovvero:

➤ Configurazione C

In questa configurazione, riassumendo, sono previste le seguenti opere:

- i. prolungamento dei pennelli Bonaria e Sant'Elmo;
- ii. la riqualificazione del Molo di Levante.

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S2 - Studio di agitazione ondosa portuale.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	002	-2	MAR

- iii. la realizzazione di un nuovo molo con planimetria rettangolare posizionato ortogonalmente al pennello Bonaria;
- iv. la realizzazione di un allargamento della testata terminale del Molo;
- v. la realizzazione di un pennellino radicato al molo di levante finalizzato a delimitare la sezione di imboccatura portuale.

Il prolungamento del pennello Bonaria così come le opere ad esso collegate, sono state pensate come opere antiriflettenti, con un coefficiente di riflessione K pari a 0.35. Inoltre, sia per il pennello Sant'Elmo che per la riqualificazione del Molo di Levante, sono stati assunti coefficienti di riflessione pari a $K = 0.9$ e dunque assimilabili a opere a parete verticali riflettenti.

4.5 Definizione delle condizioni al contorno

Per il calcolo dei livelli di agitazione ondosa residua all'interno dello specchio liquido è stato necessario definire le condizioni al contorno del dominio di calcolo.

Per ogni configurazione analizzata il contorno dello specchio liquido è stato suddiviso in tratti caratterizzati da un diverso grado di riflessione del moto ondoso.

I coefficienti di riflessione K (rapporto tra l'altezza d'onda riflessa H_r e quella incidente H_i) delle opere delimitanti le aree portuali (interne ed esterne) sono stati scelti in funzione delle caratteristiche riflettenti delle stesse opere secondo quanto di seguito elencato:

- $K = 0,90$ per le banchine a parete verticale completamente riflettenti;
- $K = 0,35$ per le mantellate delle opere a gettata, tratti rocciosi e banchine antiriflettenti;
- $K = 0,10$ per le spiagge assorbenti;
- $K = 0,00$ per i confini aperti (completamente permeabili).

Nel dettaglio, lungo i contorni che rappresentano la linea di costa sono stati imposti i coefficienti riportati in Tabella 4.2.

Coefficiente di riflessione		
Confini aperti (completamente permeabili)	$K = 0.00$	
Spiagge assorbenti	$K = 0.10$	
Tratti rocciosi naturali ed opere a scogliera	$K = 0.35$	
Parete verticale riflettente	$K = 0.90$	

Tabella 4.2 - Definizione dei coefficienti di riflessione K

Si riportano nelle figure seguenti le planimetrie di ciascuna configurazione esaminata evidenziando con scala cromatica i relativi coefficienti di riflessione assunti per descrivere i "contorni" del dominio di calcolo (da Figura 4.2 a Figura 4.5).



Figura 4.2 - Coefficienti di riflessione degli elementi di contorno per il modello CGWAVE – Configurazione A – Configurazione attuale.



Figura 4.3 - Coefficienti di riflessione degli elementi di contorno per il modello CGWAVE – Configurazione B1 – Molo interno riflettente.



Figura 4.4 - Coefficienti di riflessione degli elementi di contorno per il modello CGWAVE – Configurazione B2 – Molo interno assorbente.



Figura 4.5 - Coefficienti di riflessione degli elementi di contorno per il modello CGWAVE – Configurazione C – ATF 2025.

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S2 - Studio di agitazione ondosa portuale.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	002	-2	MAR

5 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI NUMERICHE DI AGITAZIONE ONDOSA RELATIVI ALLA FASE 1

I risultati delle simulazioni numeriche sono riportati nelle tavole allegate, dalla Tav. 1 alla Tav. 27.

Nelle prime 9 tavole sono presenti i risultati delle simulazioni, ottenuti per ciascuna condizione di moto ondoso ed in relazione alle tre configurazioni portuali oggetto di studio.

Dalla Tav. 10 alla Tav. 18 sono stati riportati i risultati in forma grafica delle simulazioni effettuate in corrispondenza di 4 sezioni interne alla Zona A “Darsena turistica”.

Dalla Tav. 19 alla Tav. 27 infine sono presenti i risultati in corrispondenza di 3 sezioni del Porto Vecchio per le zone esterne rispetto alla Darsena Turistica.

Le simulazioni effettuate con lo stato attuale (**Configurazione A**) hanno mostrato il superamento delle condizioni di agitazione limite suggerite dall'AIPCN e pertanto si può affermare che volendo potenziare e riqualificare per le funzioni della portualità turistica la zona A (sud orientale) del Porto Vecchio risulta necessario realizzare il prolungamento dell'attuale “Pennello Bonaria” quale molo di protezione dal moto ondoso incidente proveniente dalla imboccatura esterna del Porto Vecchio.

Come si evince dalle tavole, in generale le condizioni di moto ondoso che causano la maggiore penetrazione all'interno del porto turistico sono quelle provenienti da 180°N. Il grado di agitazione interna al porto turistico, denominato “zona A” nel PRP, mediamente presenta un'attenuazione a seguito della riqualificazione e prolungamento del pennello Bonaria, e dunque con la delimitazione dello specchio acqueo. In particolare, nella **Configurazione B1** (coefficiente di riflessione pari a $K=0.9$) si è assunta per la nuova diga una struttura del tipo “a parete verticale” priva di dispositivi “antiriflettenti”. I risultati ottenuti, pur avendo mostrato un effetto riduttivo dell'agitazione ondosa all'interno del nuovo porto turistico rispetto alla situazione attuale, hanno evidenziato che le riflessioni indotte sulle onde incidenti che raggiungono il lato esterno della nuova diga di delimitazione, provocano, rispetto alla situazione attuale, un aumento del livello medio di agitazione portuale nella porzione Nord del Porto Vecchio.

Pertanto per limitare tale effetto si è deciso di ridurre il coefficiente di riflessione della nuova diga, adottando la **Configurazione B2**, portandolo a $K = 0.35$, ovvero ad un valore compatibile ad esempio con un'opera del tipo “a gettata” oppure con un'opera del tipo “a parete verticale” dotata di celle antiriflettenti.

I risultati ottenuti hanno mostrato una riduzione dell'agitazione ondosa nella zona Nord del Porto Vecchio, sia in relazione alla configurazione B1, sia in relazione allo stato attuale.

6 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI NUMERICHE DI AGITAZIONE ONDOSA RELATIVI ALLA FASE 2 (Configurazione ATF 2025)

Sulla base delle simulazioni condotte, la soluzione ottimale dal punto di vista dell'agitazione interna portuale è risultata la **Configurazione B2** che viene denominata Configurazione base ATF. Questa configurazione è stata successivamente oggetto di ottimizzazione, arrivando a definire la configurazione di ATF 2025, ovvero la **Configurazione C**.

I risultati ottenuti per questa configurazione, descritta ampiamente nei paragrafi precedenti, sono di seguito riportati dalla Figura 6.1 alla Figura 6.9.

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S2 - Studio di agitazione ondosa portuale.					
	Data: 31.01.2025					
	24	010	PR	002	-2	MAR

In ciascuna figura vengono riportati i diagrammi di agitazione ondosa ottenuti per le tre direzioni di propagazione del moto ondoso incidente e per gli stati di mare caratterizzati dal $T_r=2$ anni, 20 anni e 50 anni.

6.1 Direzione di moto ondoso: 180°N, TR=2 anni

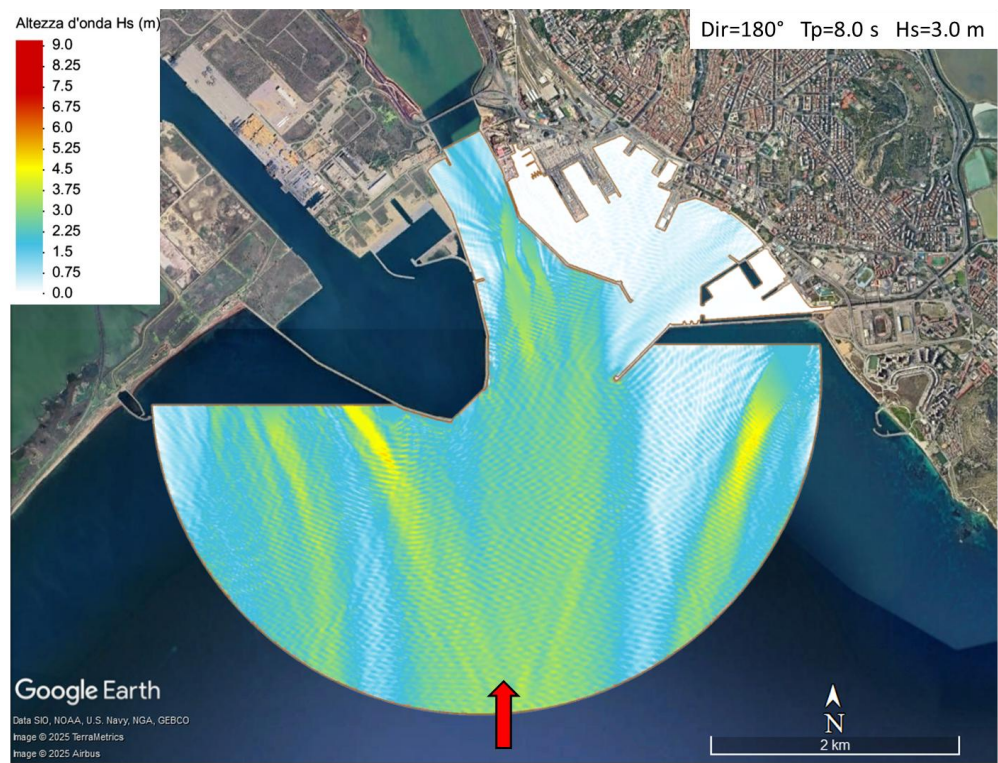


Figura 6.1- Agitazione ondosa per la Configurazione ATF 2025 in relazione a $Dir = 180^{\circ}N$, $T_p = 8.0s$, $H_s = 3.0m$.

6.2 Direzione di moto ondoso: 180°N , $\text{TR}=20$ anni

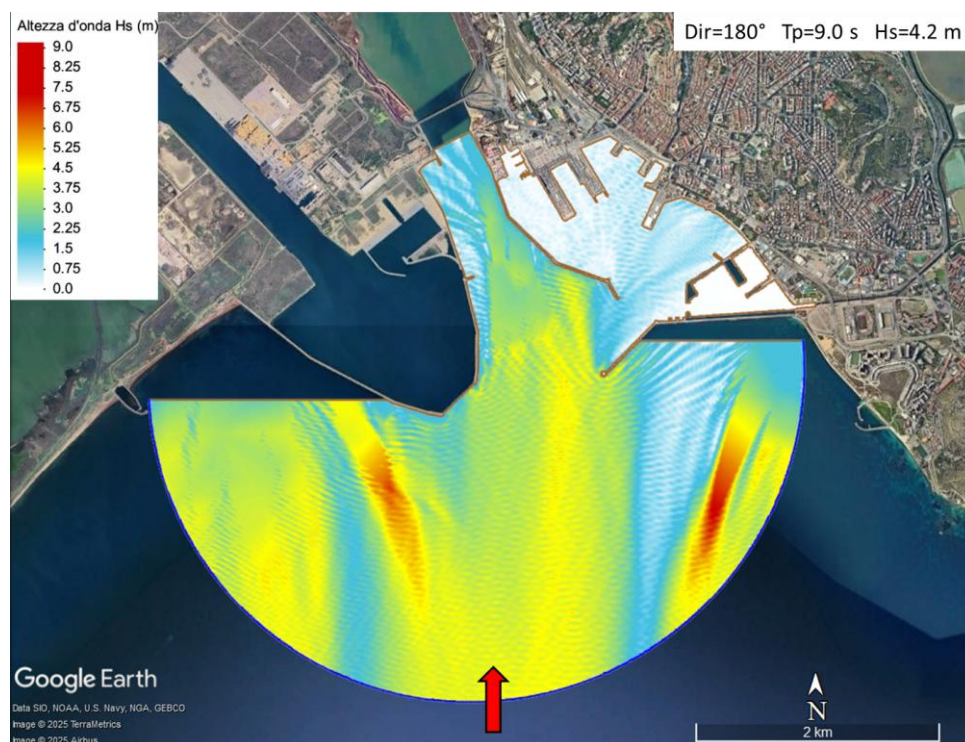


Figura 6.2 Agitazione ondosa per la Configurazione ATF 2025 in relazione a $\text{Dir} = 180^{\circ}\text{N}$, $T_p = 9.0\text{s}$, $H_s = 4.2\text{m}$.

6.3 Direzione di moto ondoso: 180°N , $\text{TR}=50$ anni

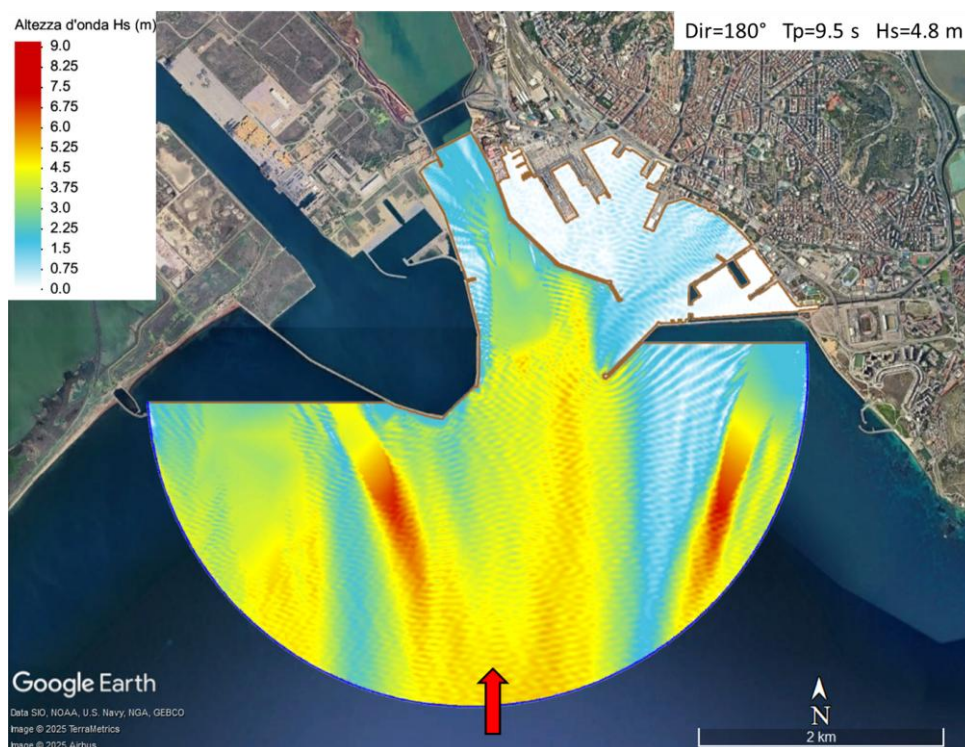


Figura 6.3 - Agitazione ondosa per la Configurazione ATF 2025 in relazione a $\text{Dir} = 180^{\circ}\text{N}$, $T_p = 9.5\text{s}$, $H_s = 4.8\text{m}$.

6.4 Direzione di moto ondoso: 165°N , $\text{TR}=2$ anni

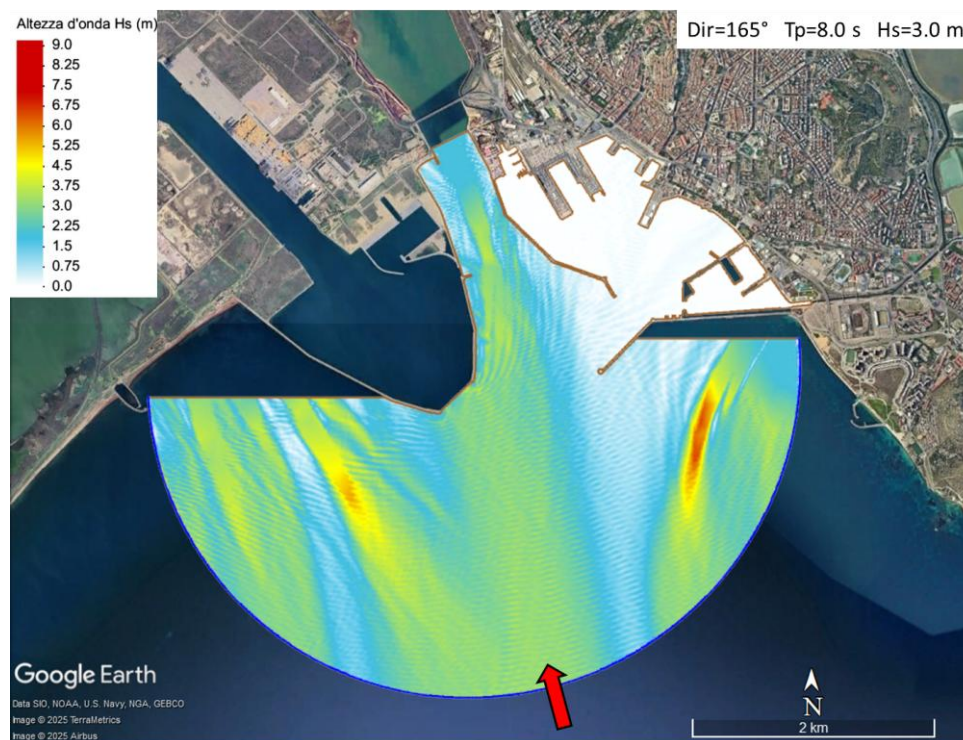


Figura 6.4 - Agitazione ondosa per la Configurazione ATF 2025 in relazione a $\text{Dir} = 165^{\circ}\text{N}$, $\text{Tp} = 8.0\text{s}$, $\text{Hs} = 3.0\text{m}$.

6.5 Direzione di moto ondoso: 165°N , $\text{TR}=20$ anni

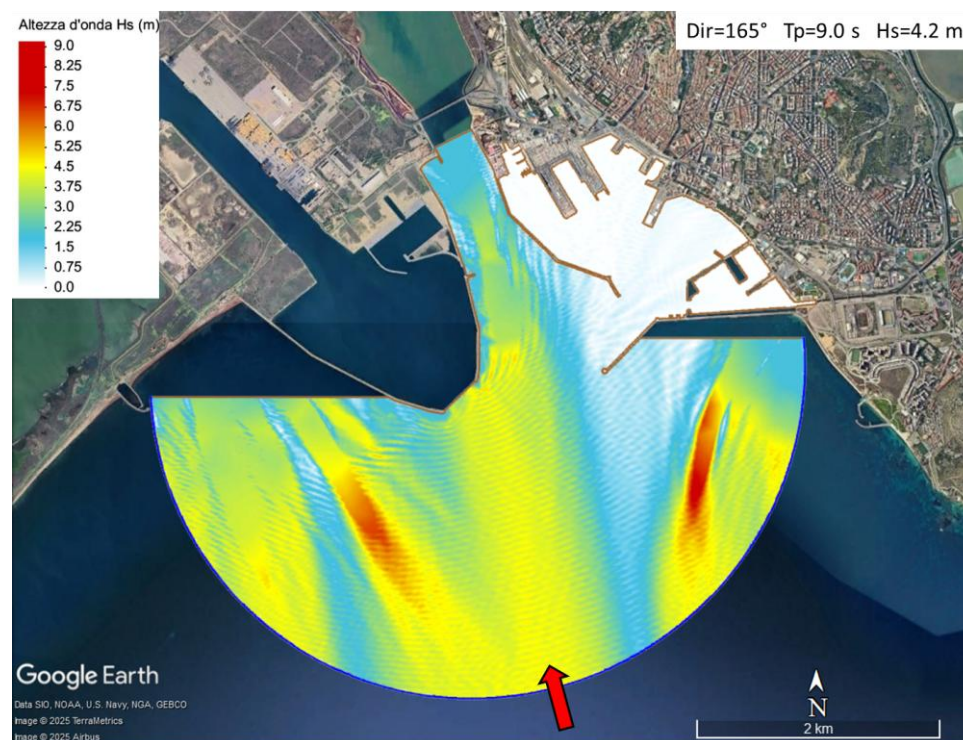
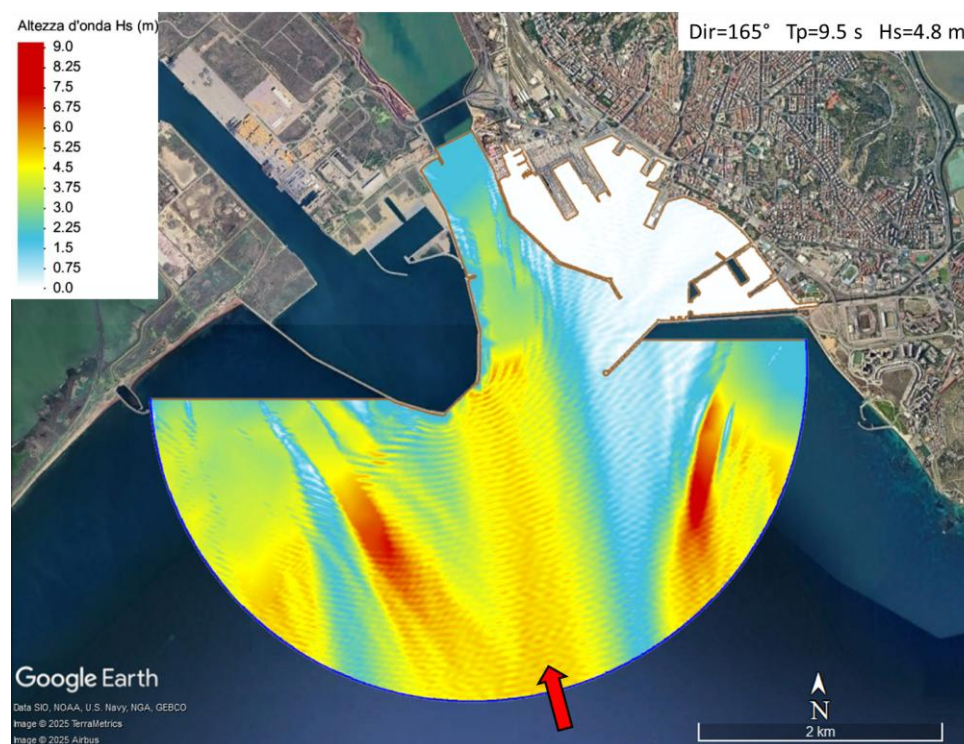
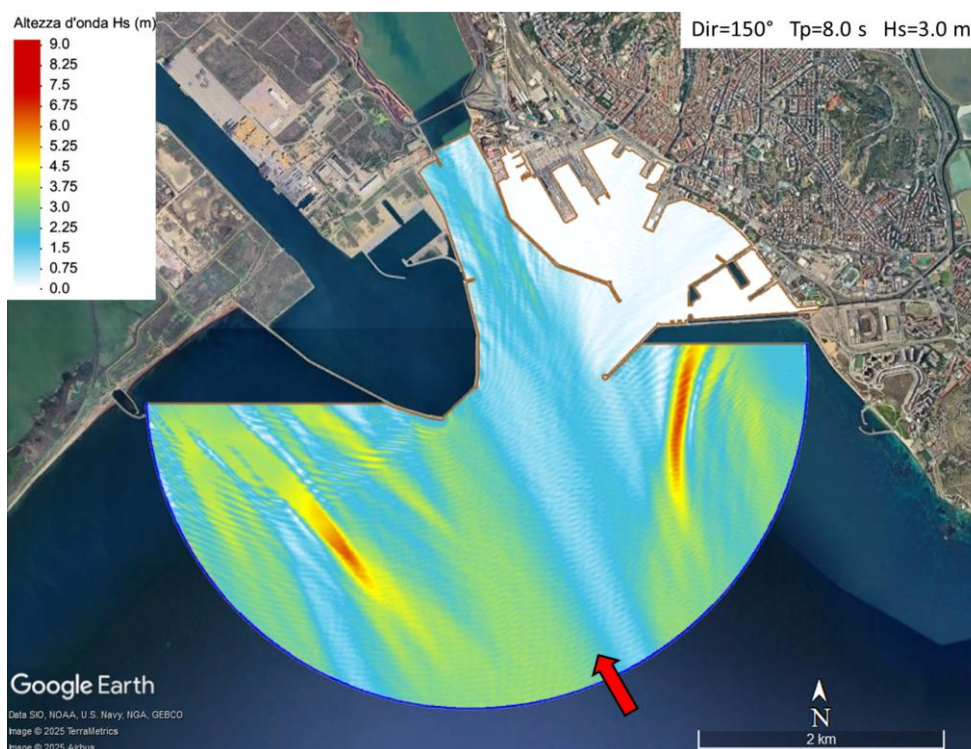


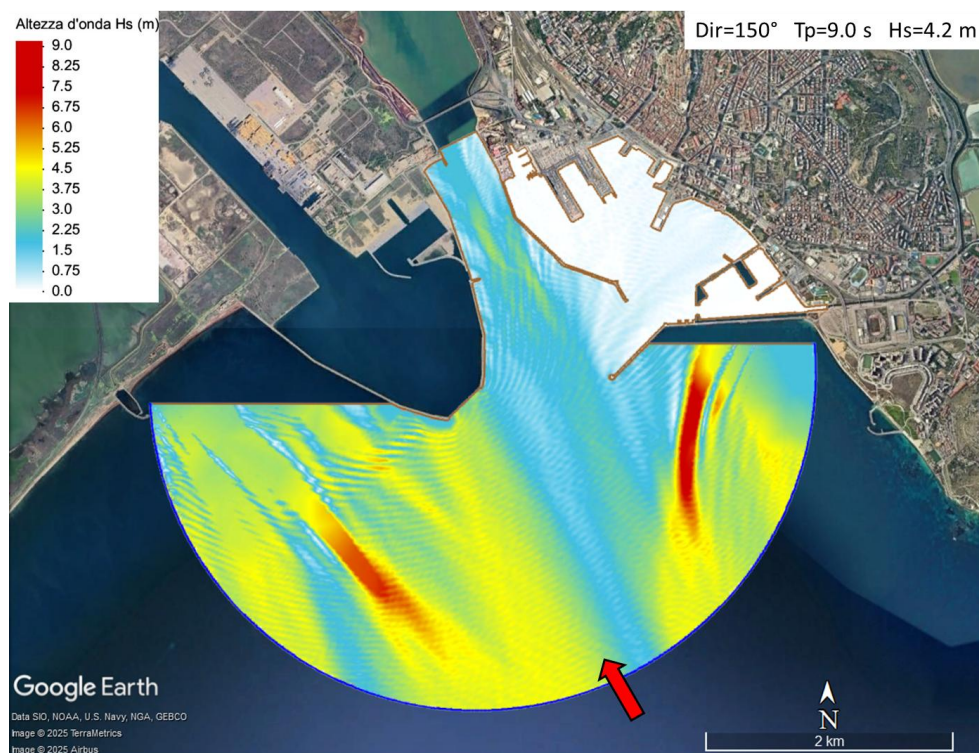
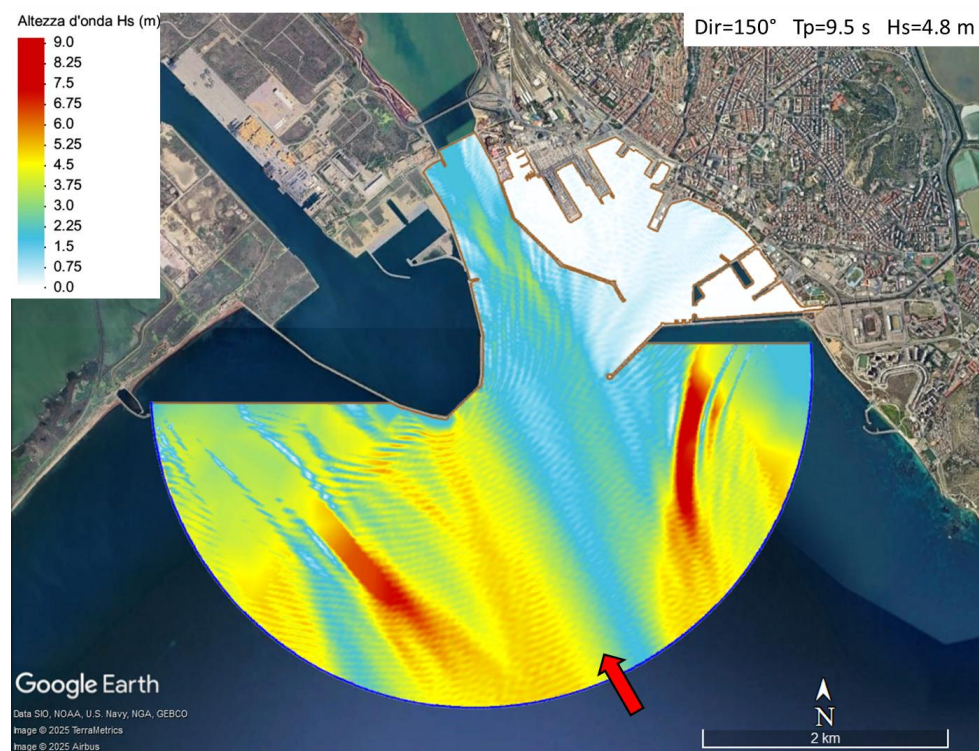
Figura 6.5 - Agitazione ondosa per la Configurazione ATF 2025 in relazione a $\text{Dir} = 165^{\circ}\text{N}$, $\text{Tp} = 9.0\text{s}$, $\text{Hs} = 4.2\text{m}$.

6.6 Direzione di moto ondoso: 165°N, TR=50 anni

Figura 6.6 - Agitazione ondosa per la Configurazione ATF 2025 in relazione a $Dir = 165^\circ N$, $T_p = 9.5s$, $H_s = 4.8m$.

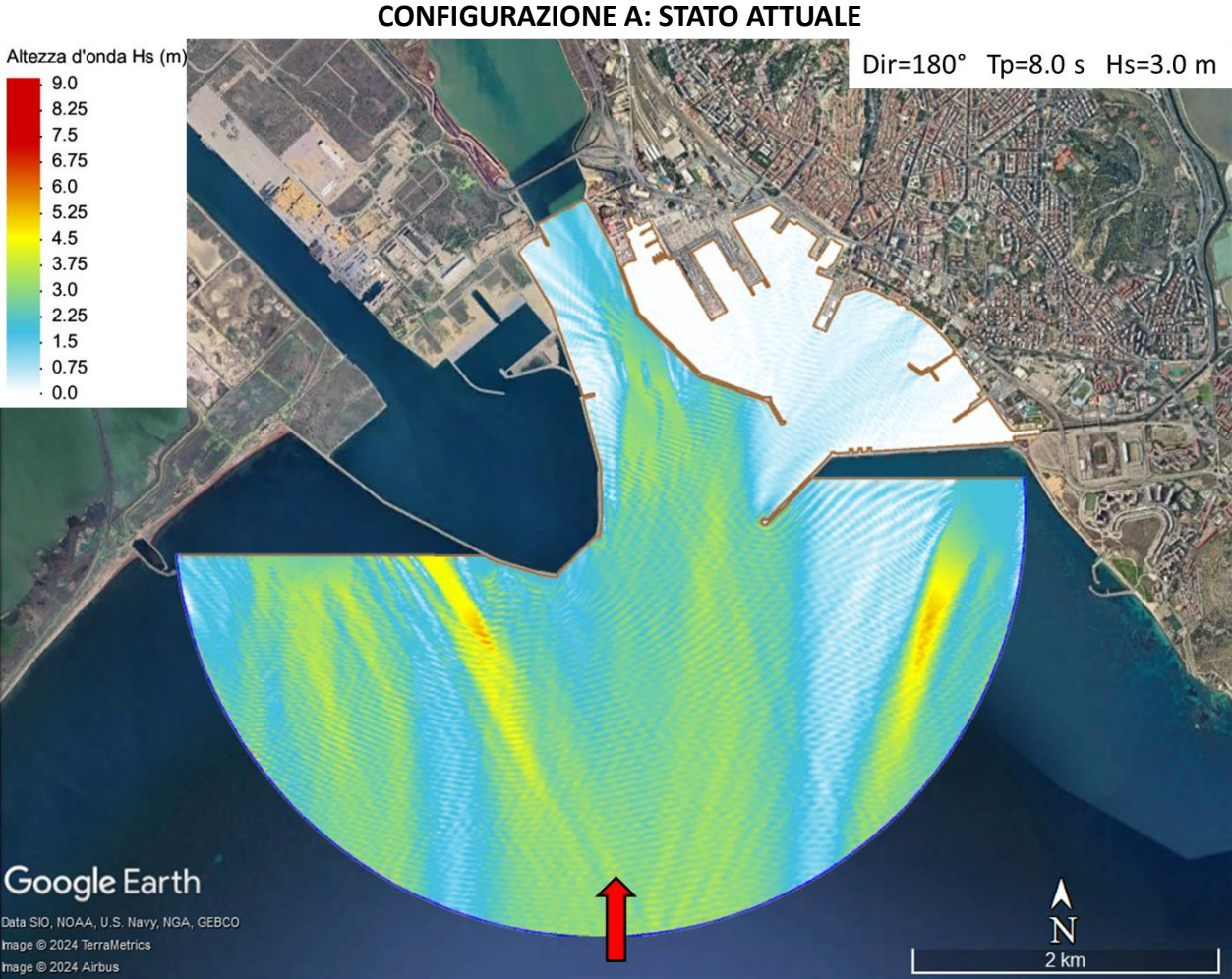
6.7 Direzione di moto ondoso: 150°N, TR=2 anni

Figura 6.7- Agitazione ondosa per la Configurazione ATF 2025 in relazione a $Dir = 180^\circ N$, $T_p = 8.0s$, $H_s = 3.0m$.

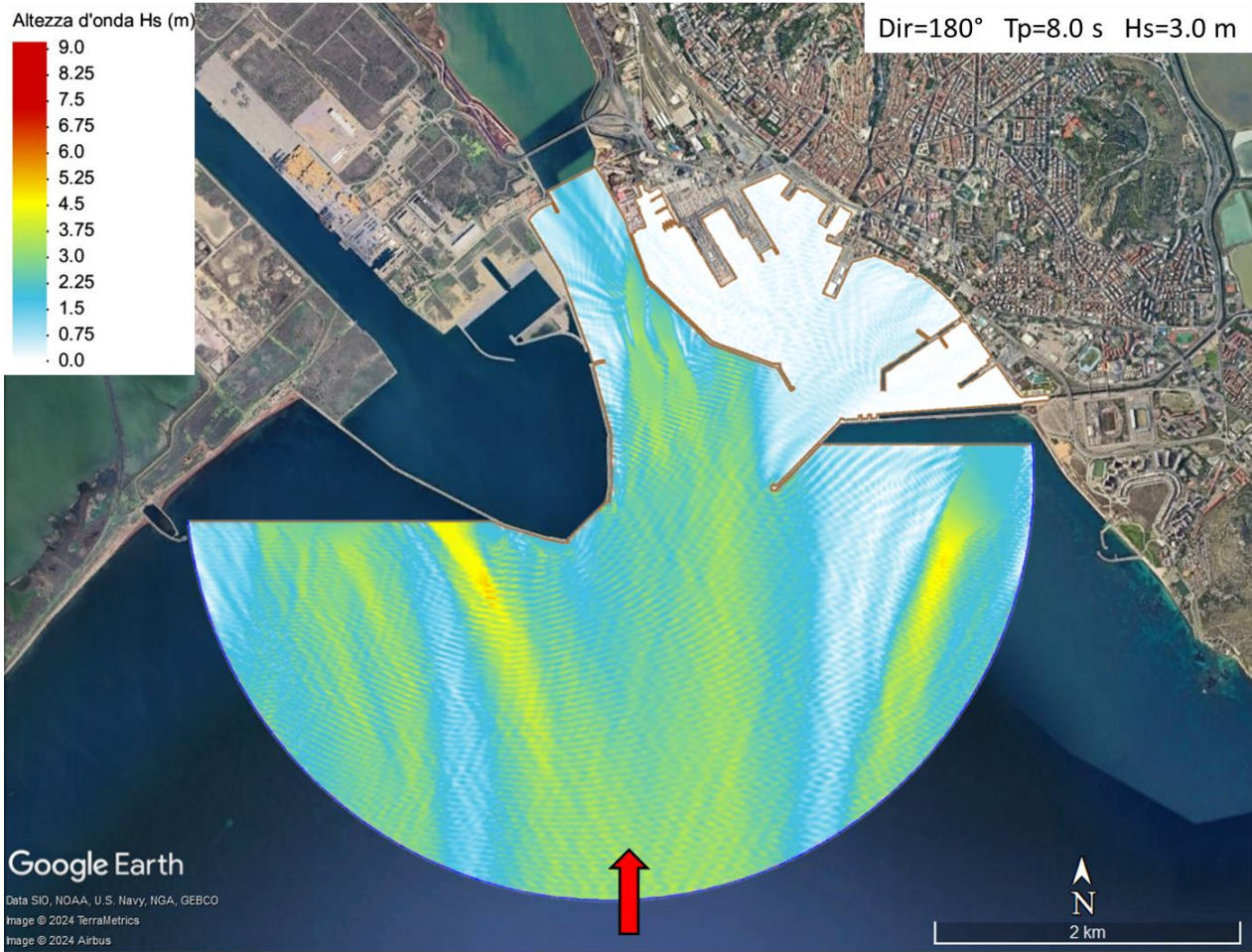
6.8 Direzione di moto ondoso: 150°N , $\text{TR}=20$ anniFigura 6.8 - Agitazione ondosa per la Configurazione ATF 2025 in relazione a $\text{Dir} = 165^{\circ}\text{N}$, $T_p = 9.0\text{s}$, $H_s = 4.2\text{m}$.6.9 Direzione di moto ondoso: 150°N , $\text{TR}=50$ anniFigura 6.9 - Agitazione ondosa per la Configurazione ATF 2025 in relazione a $\text{Dir} = 165^{\circ}\text{N}$, $T_p = 9.5\text{s}$, $H_s = 4.8\text{m}$.

Allegato 1: TAVOLE

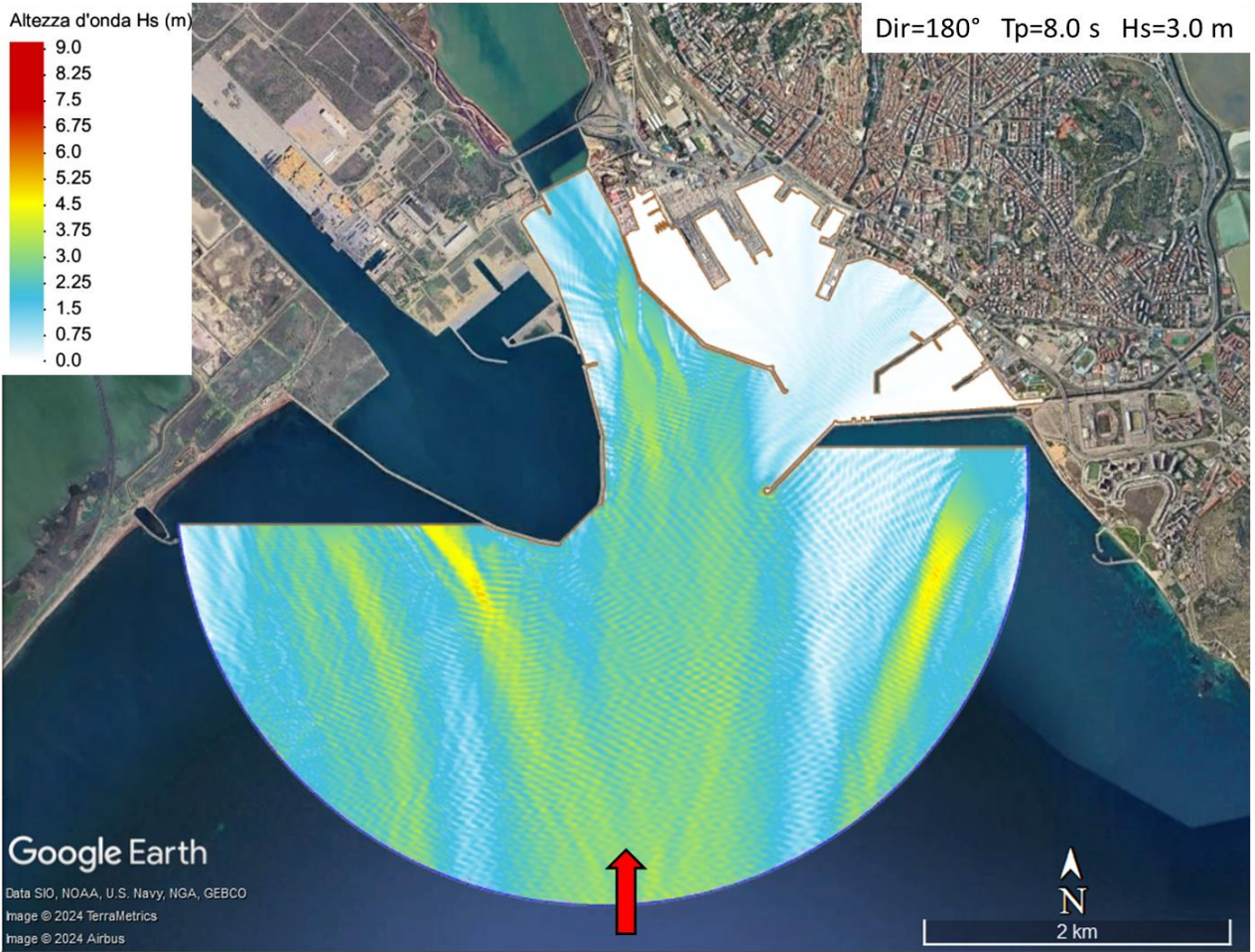
TAV_1:
RISULTATI CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO 1:
TR= 2 anni
Dir=180°N Tp=8.0s Hs=3.0m



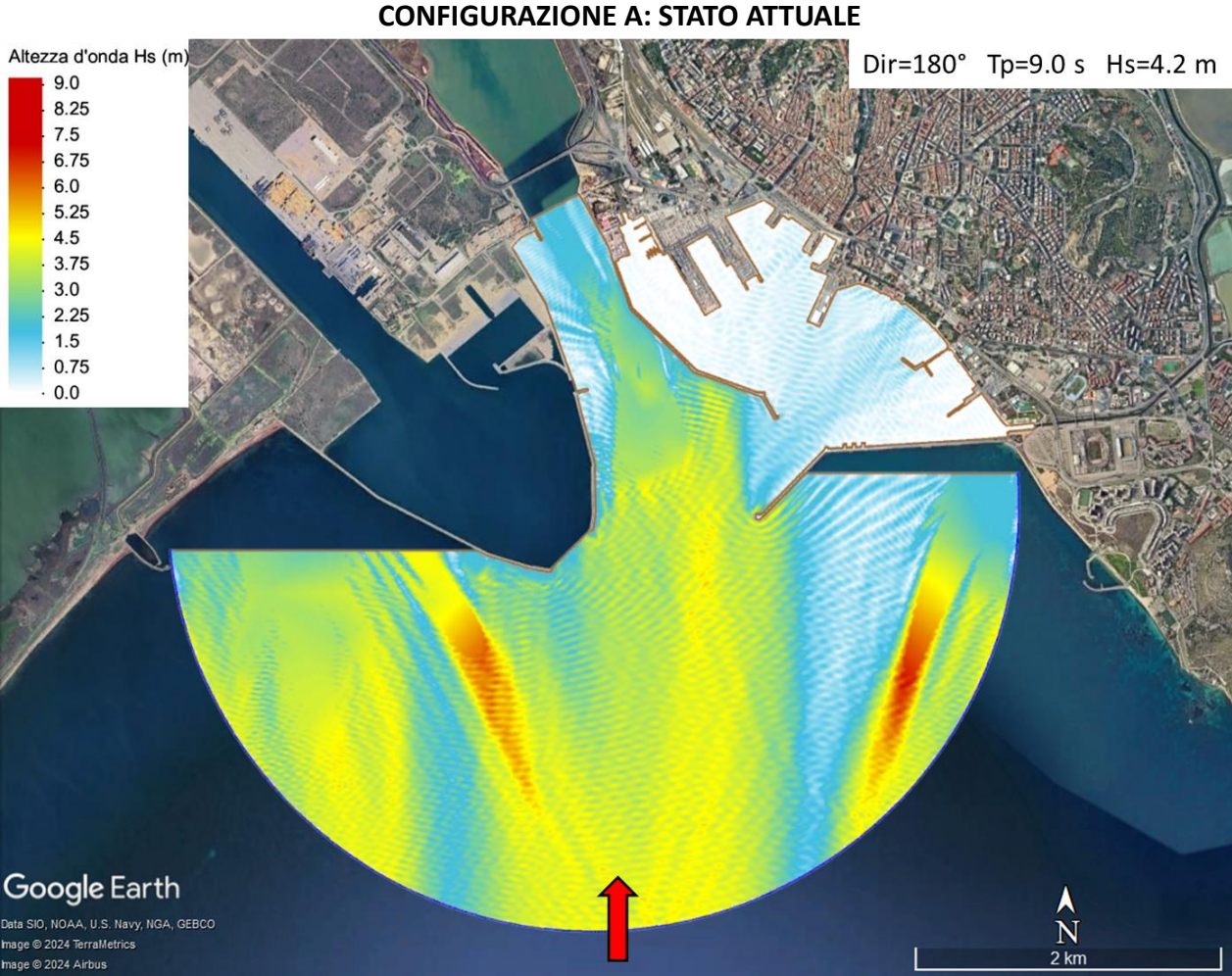
**CONFIGURAZIONE B1: MOLO INTERNO
RIFLETTEnte**



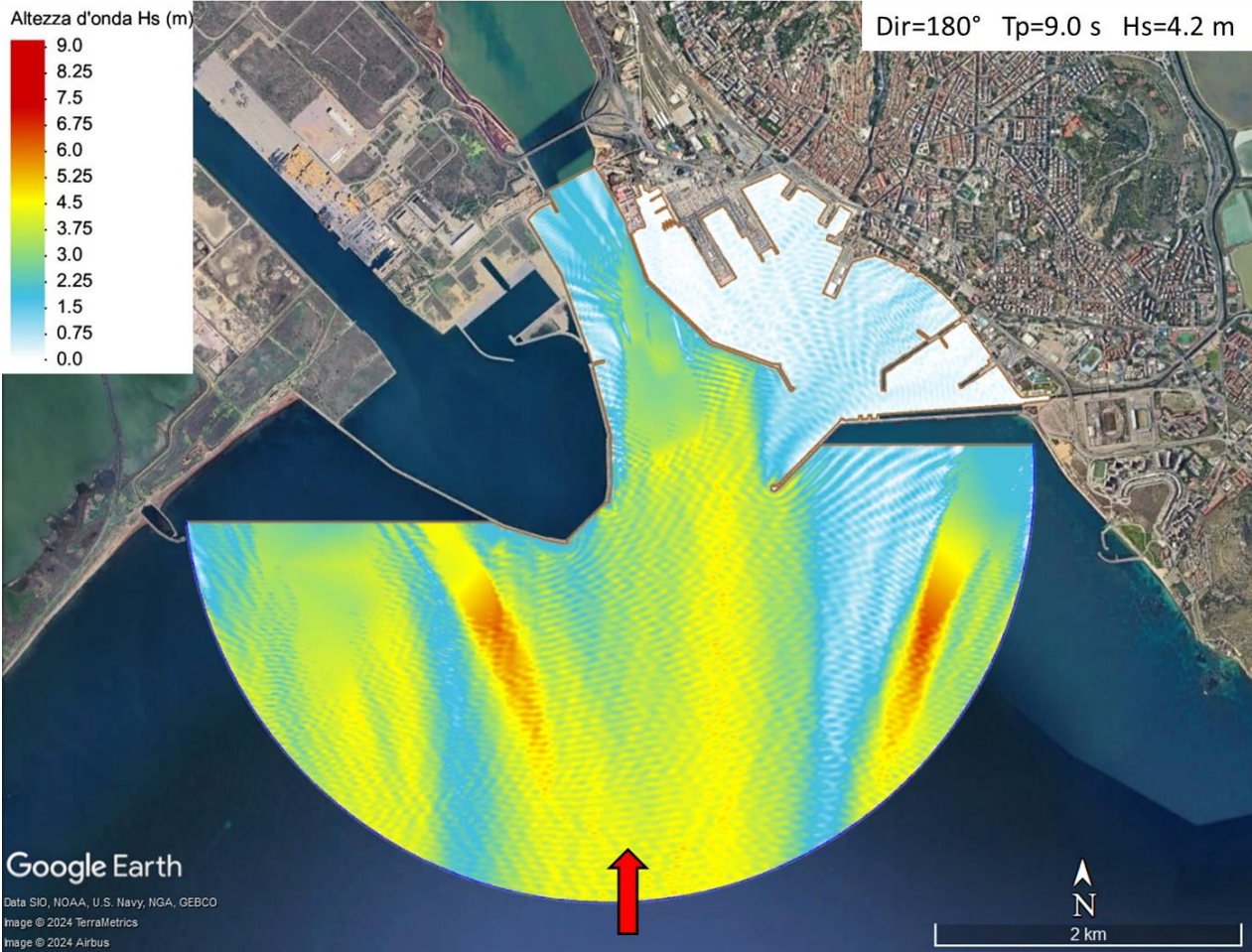
**CONFIGURAZIONE B2: MOLO INTERNO
ASSORBENTE**



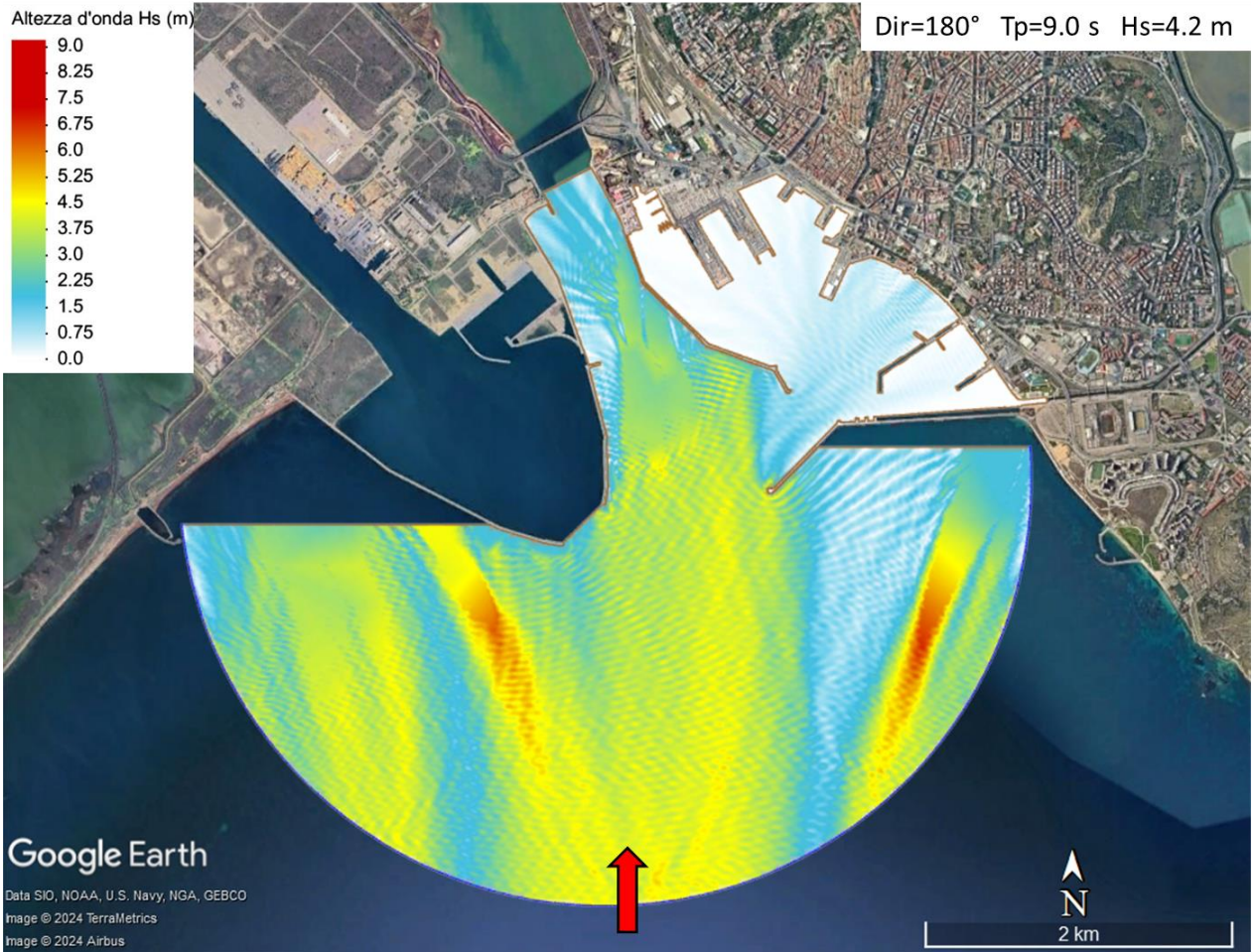
TAV_2:
RISULTATI CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO 2:
TR= 20 anni
Dir=180°N Tp=9.0s Hs=4.2m



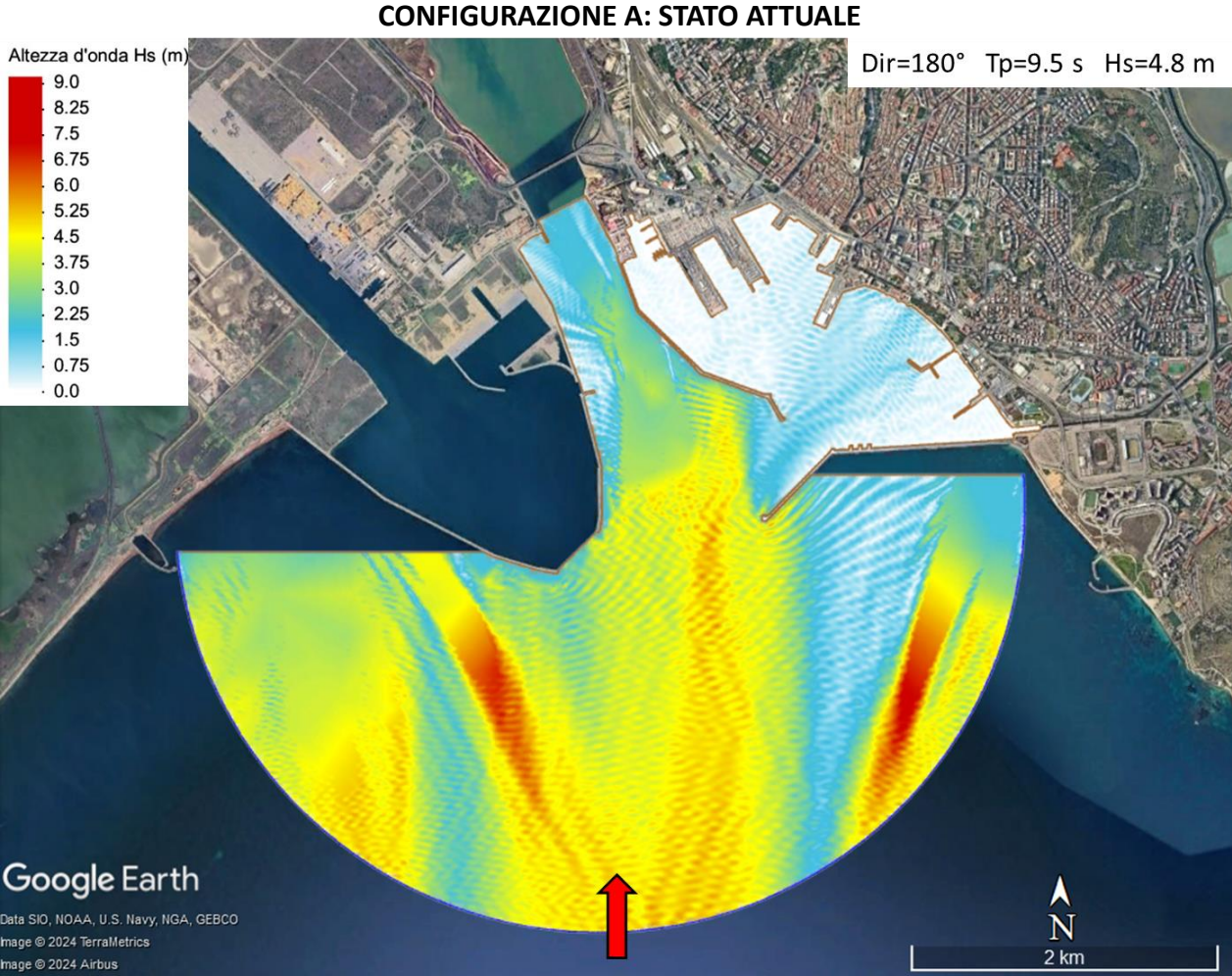
CONFIGURAZIONE B1: MOLO INTERNO RIFLETTENTE



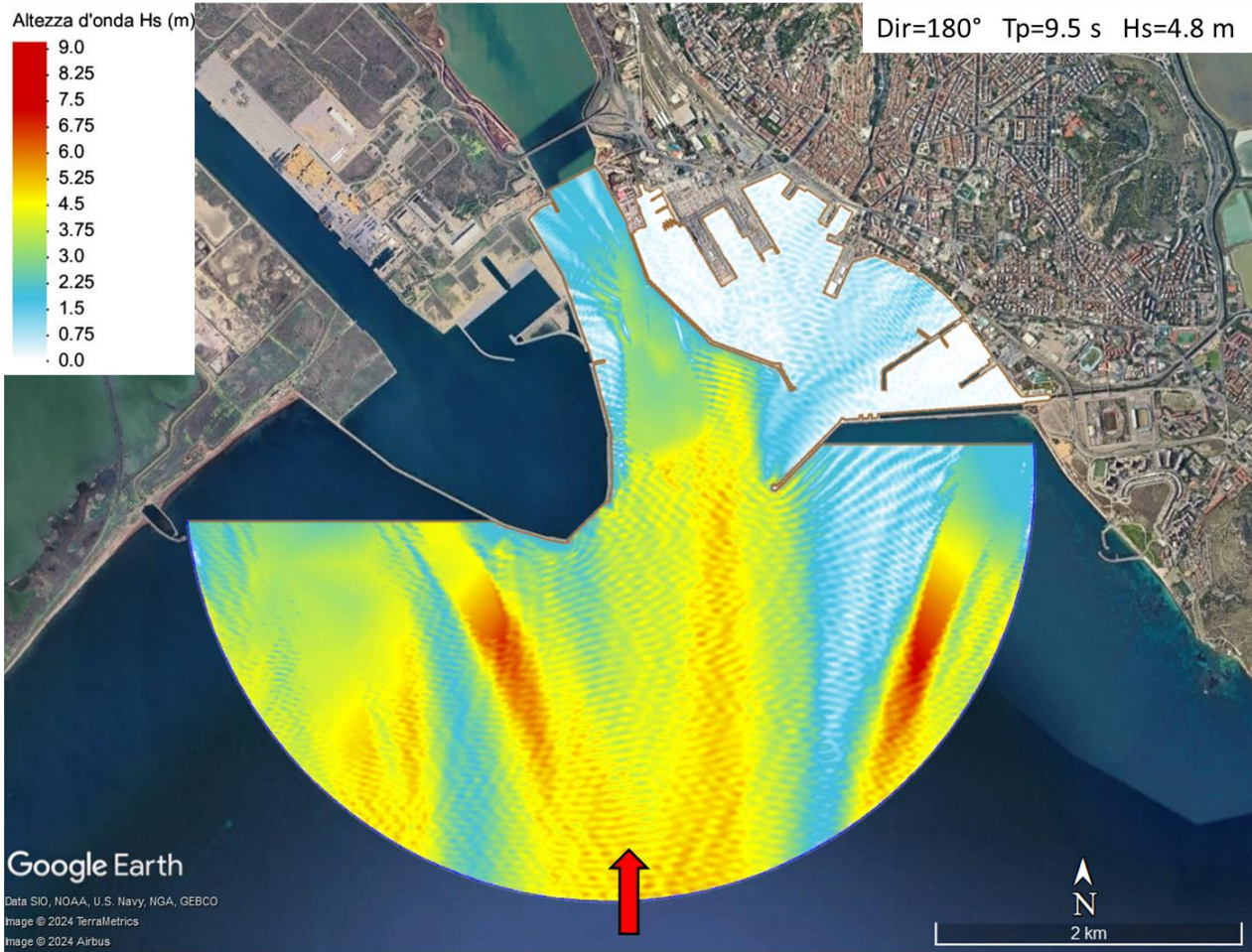
CONFIGURAZIONE B2: MOLO INTERNO ASSORBENTE



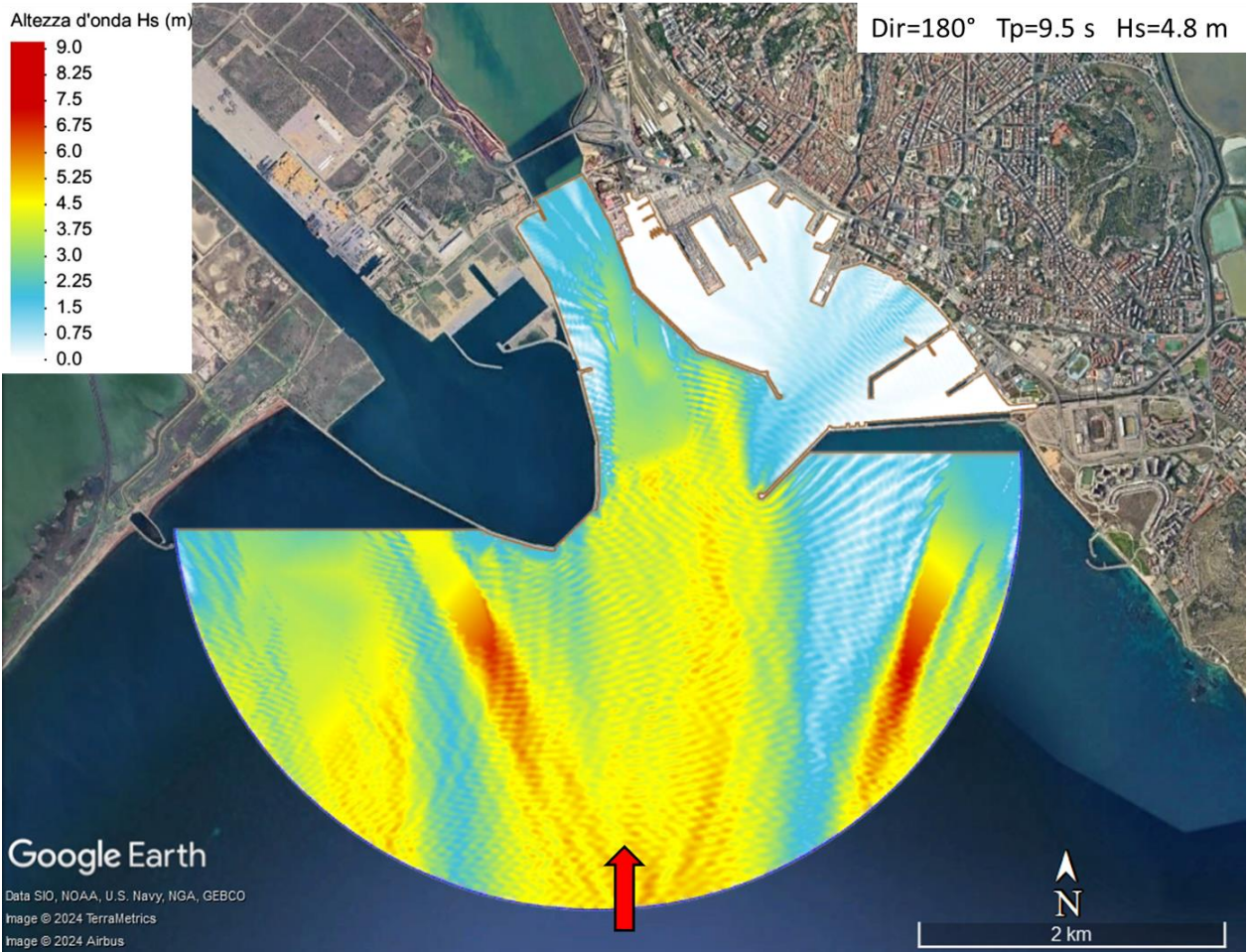
TAV_3:
RISULTATI CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO 3:
TR= 50 anni
Dir=180°N Tp=9.5s Hs=4.8m



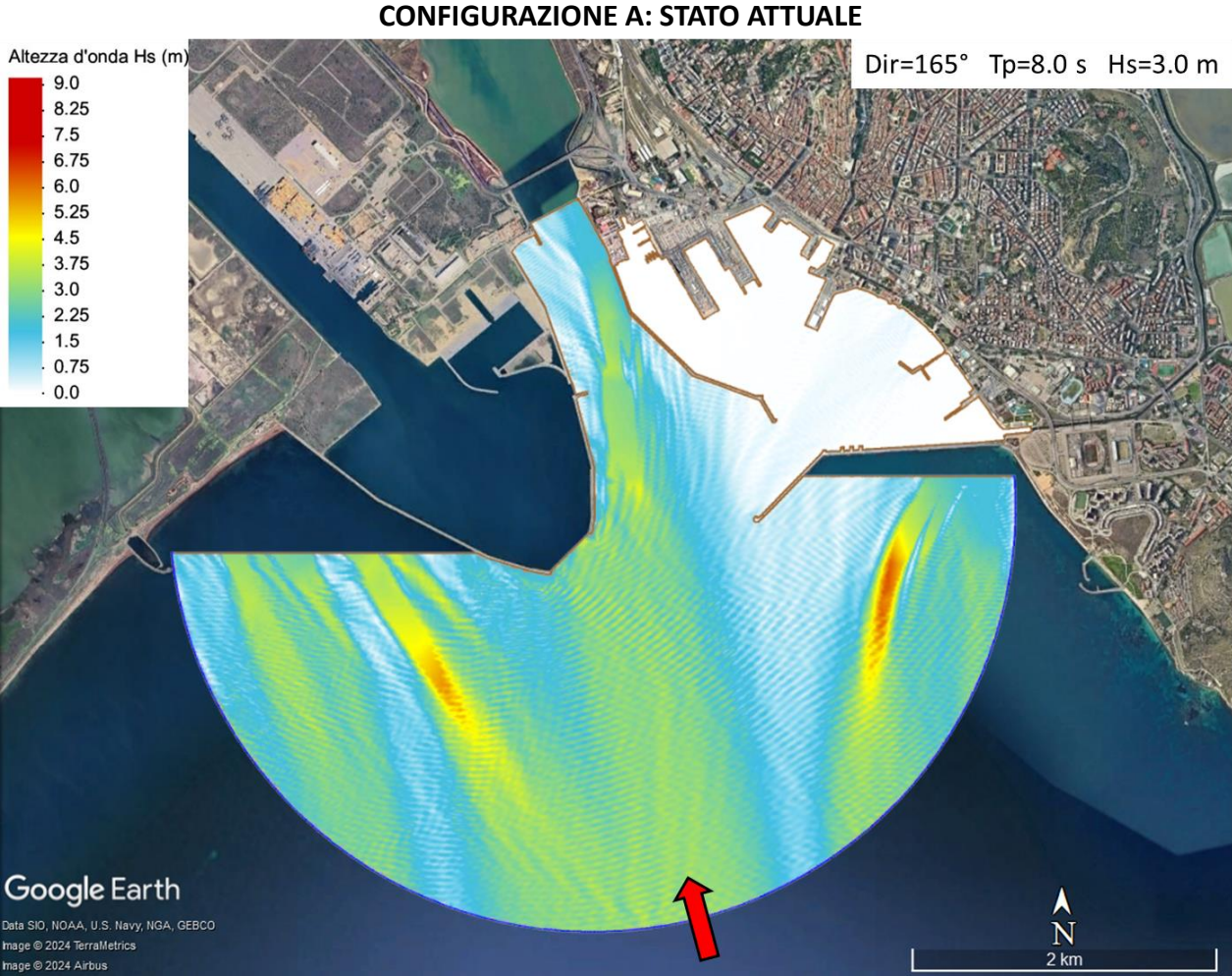
CONFIGURAZIONE B1: MOLO INTERNO RIFLETTEnte



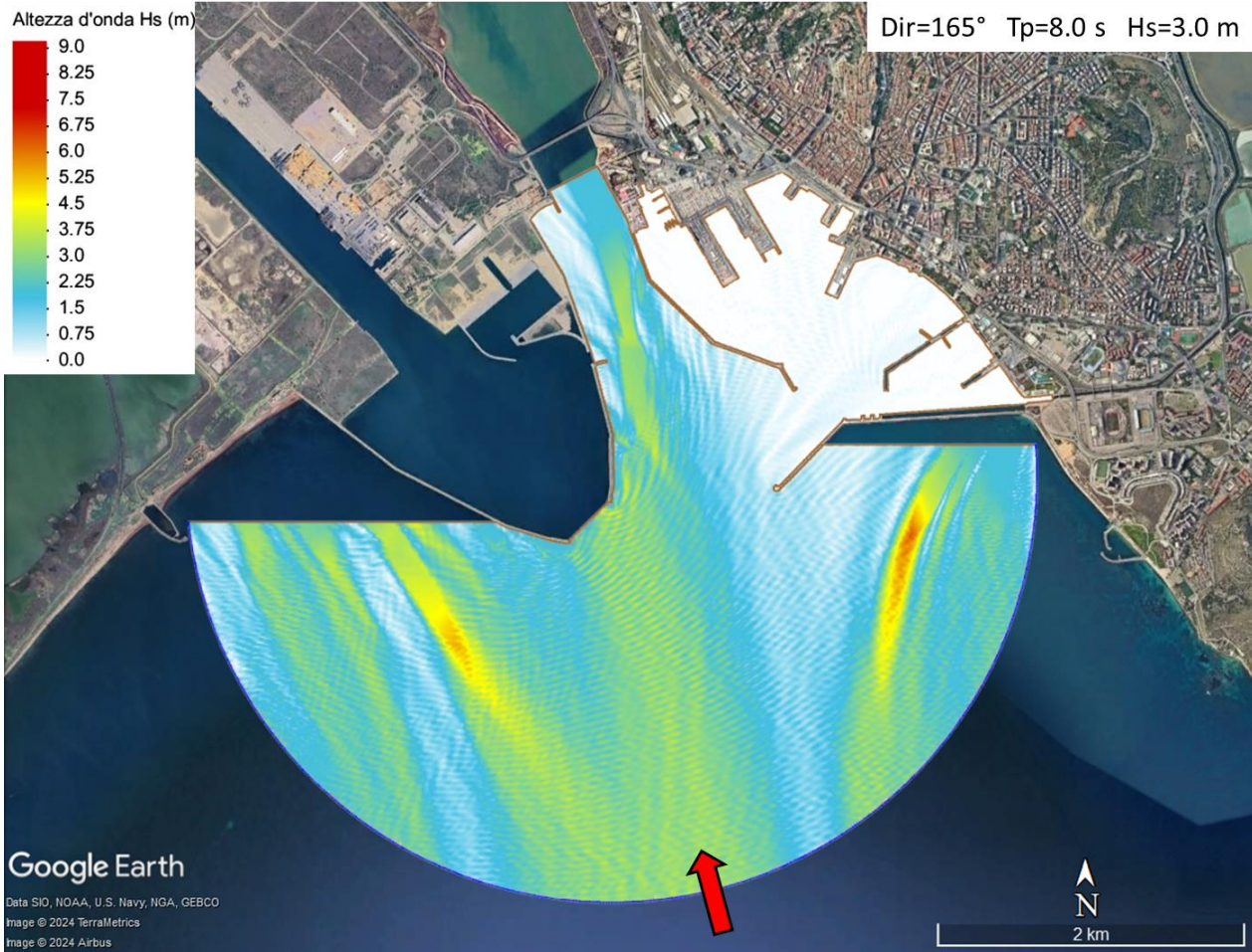
CONFIGURAZIONE B2: MOLO INTERNO ASSORBENTE



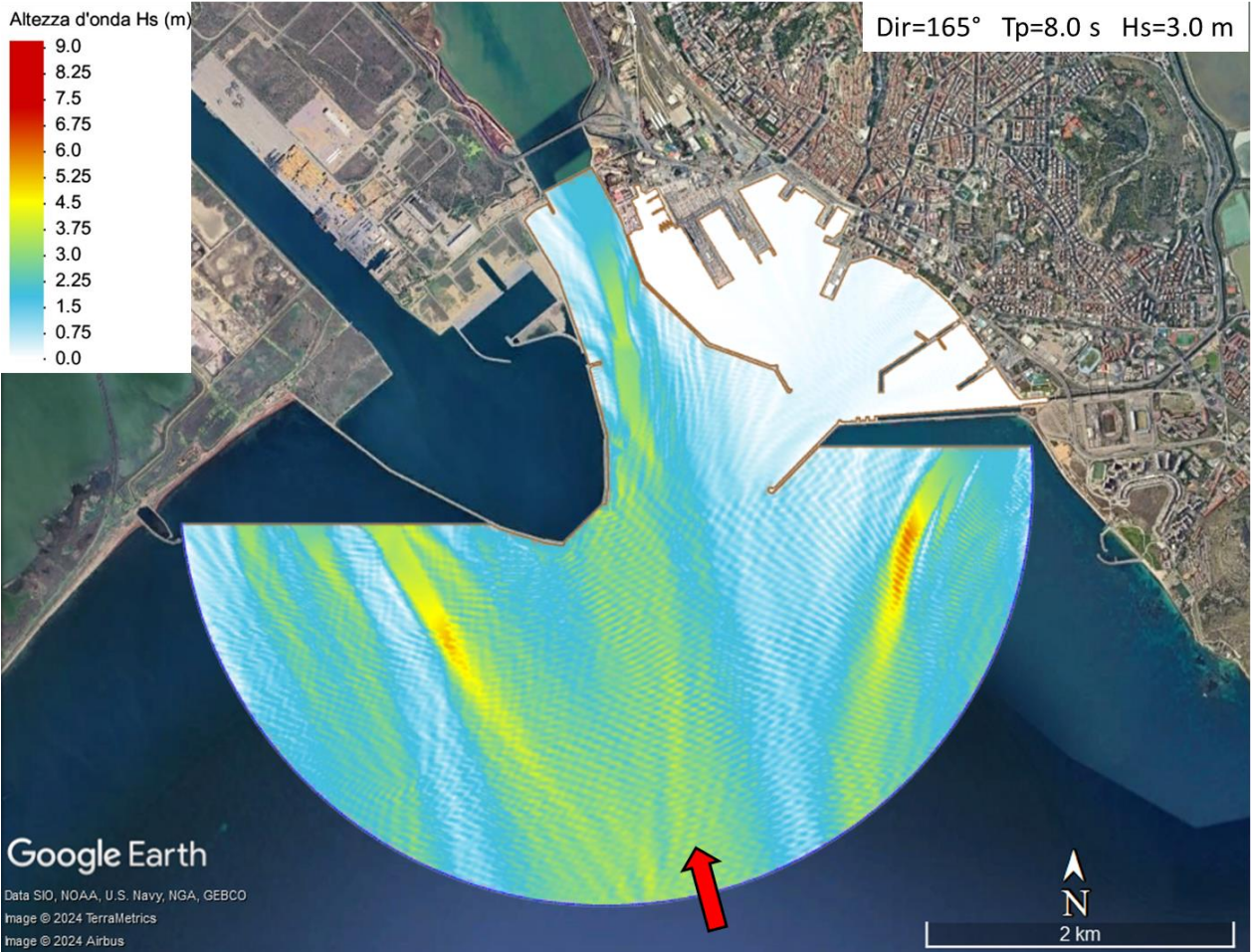
TAV_4:
RISULTATI CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO 4 :
TR= 2 anni
Dir=165°N Tp=8.0s Hs=3.0m



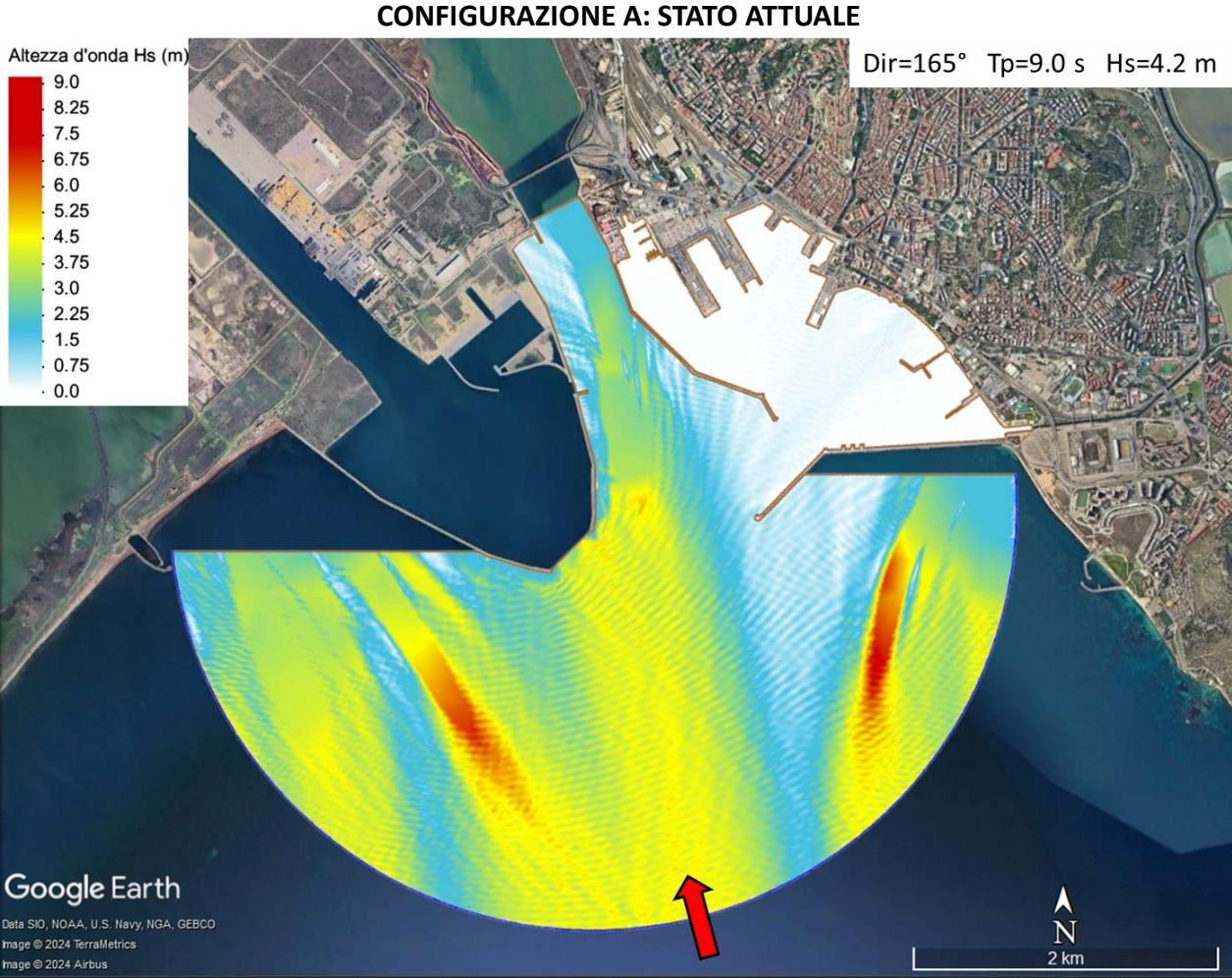
CONFIGURAZIONE B1: MOLO INTERNO RIFLETTEnte



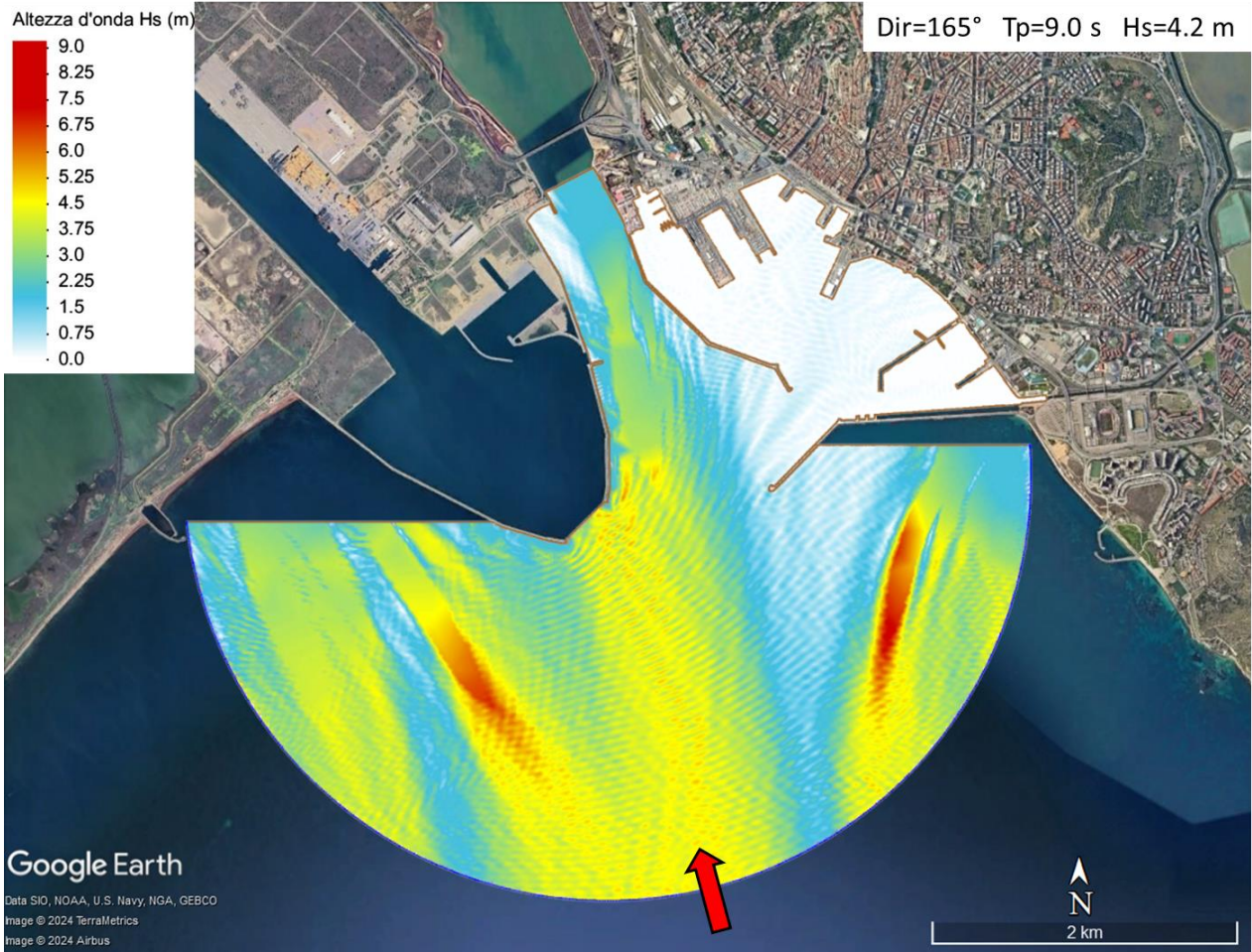
CONFIGURAZIONE B2: MOLO INTERNO ASSORBENTE



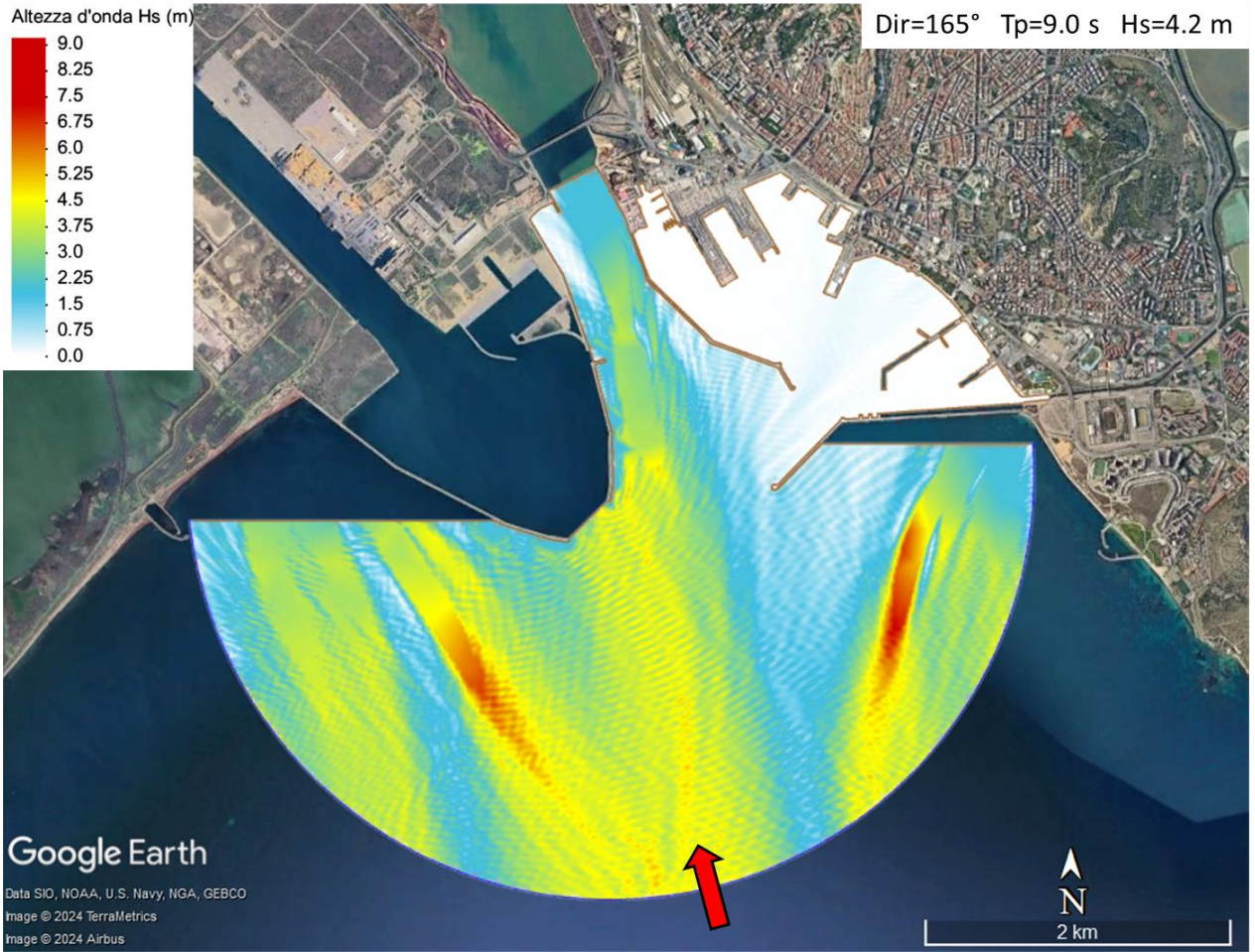
TAV_5:
RISULTATI CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO 5:
TR= 20 anni
Dir=165°N Tp=9.0s Hs=4.2m



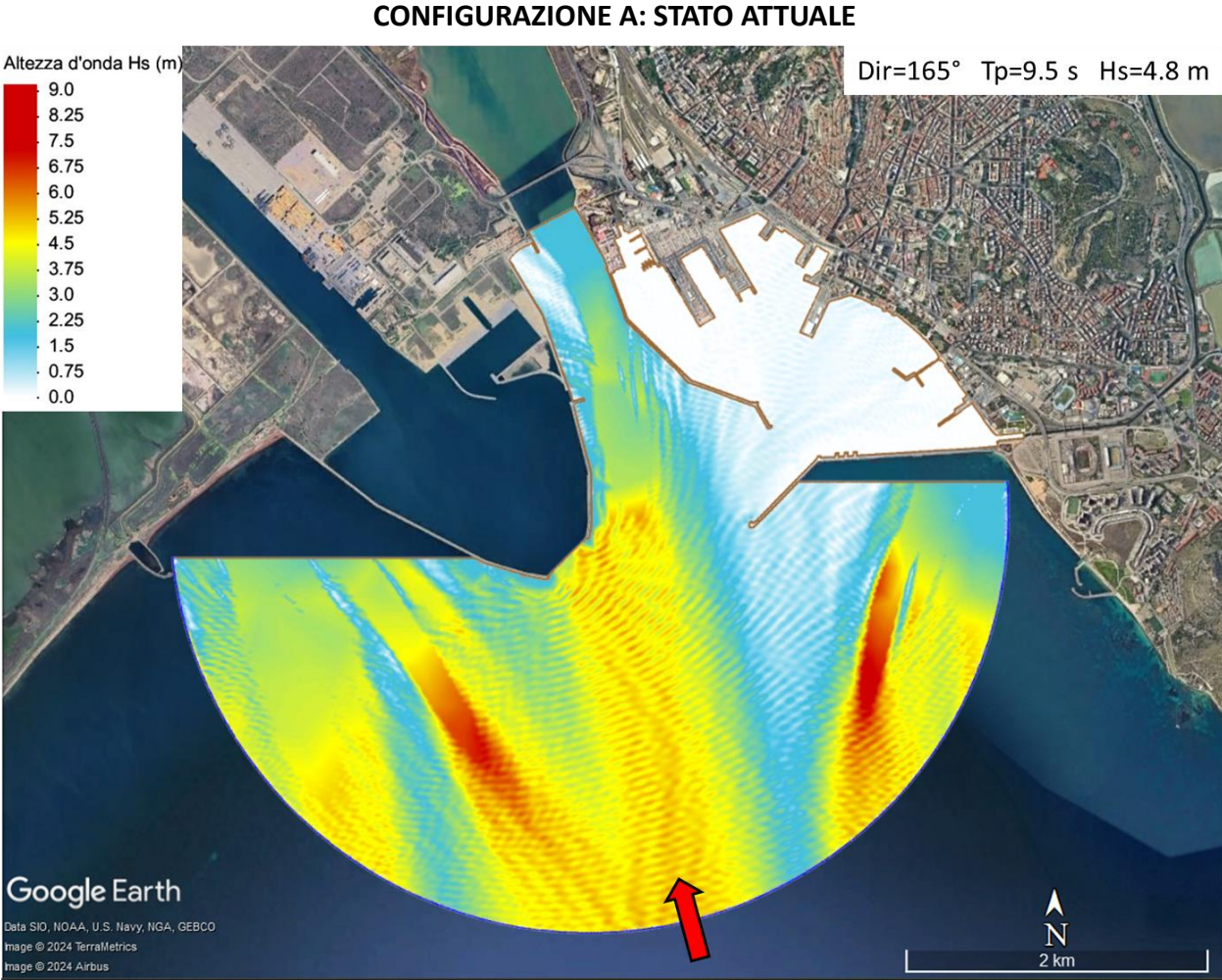
CONFIGURAZIONE B1: MOLO INTERNO RIFLETTEnte



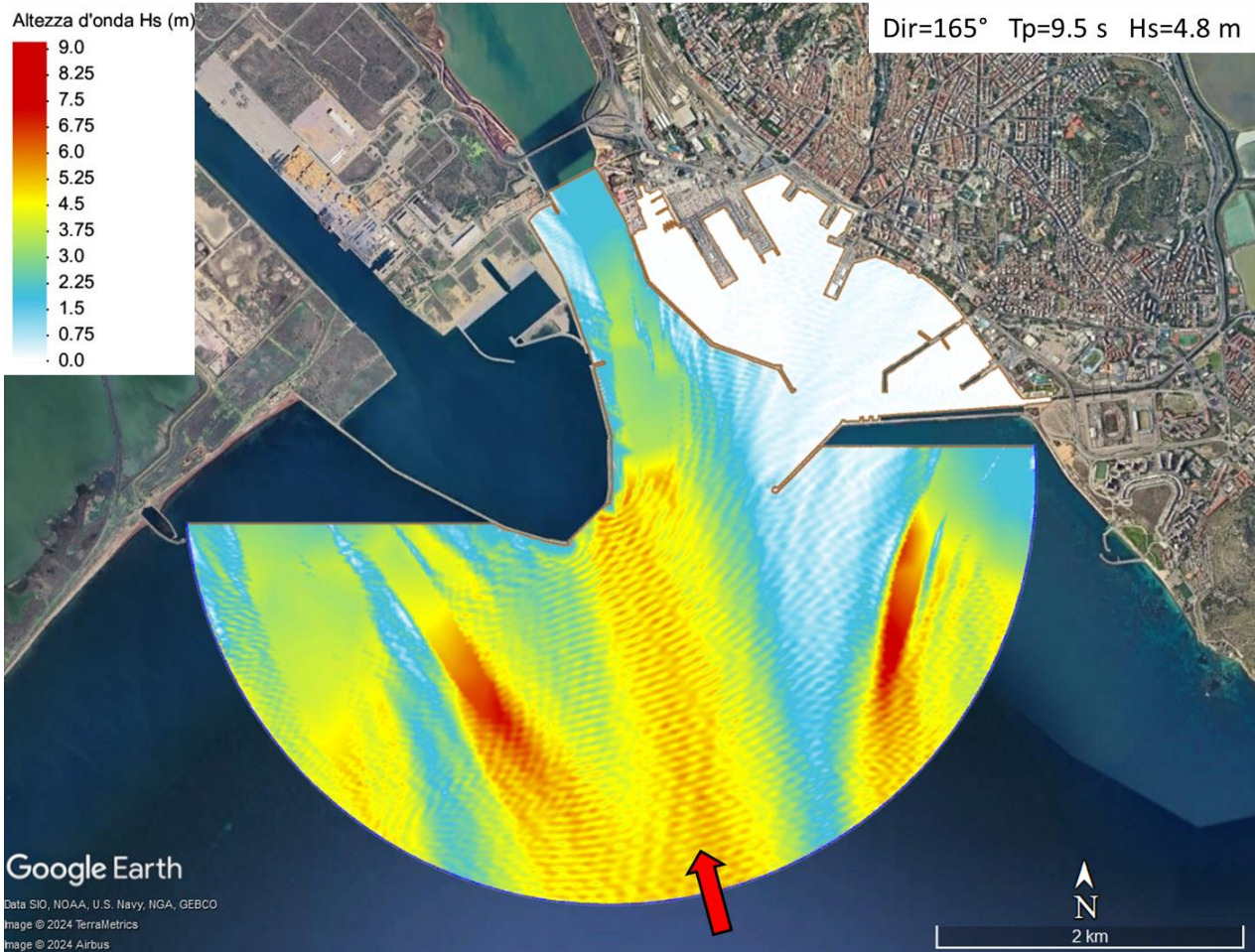
CONFIGURAZIONE B2: MOLO INTERNO ASSORBENTE



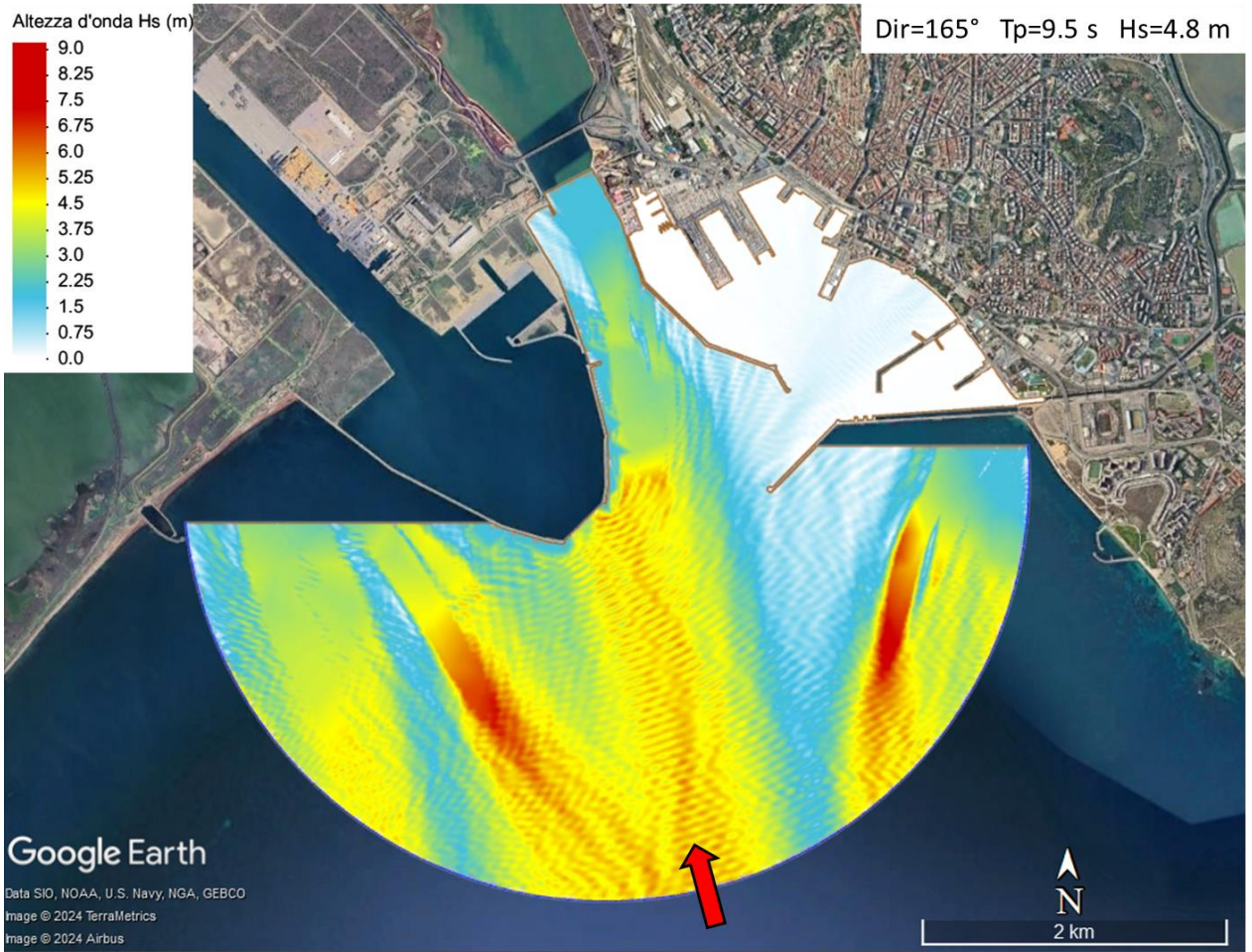
TAV_6:
RISULTATI CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO 6:
TR= 50 anni
Dir=165°N Tp=9.5s Hs=4.8m



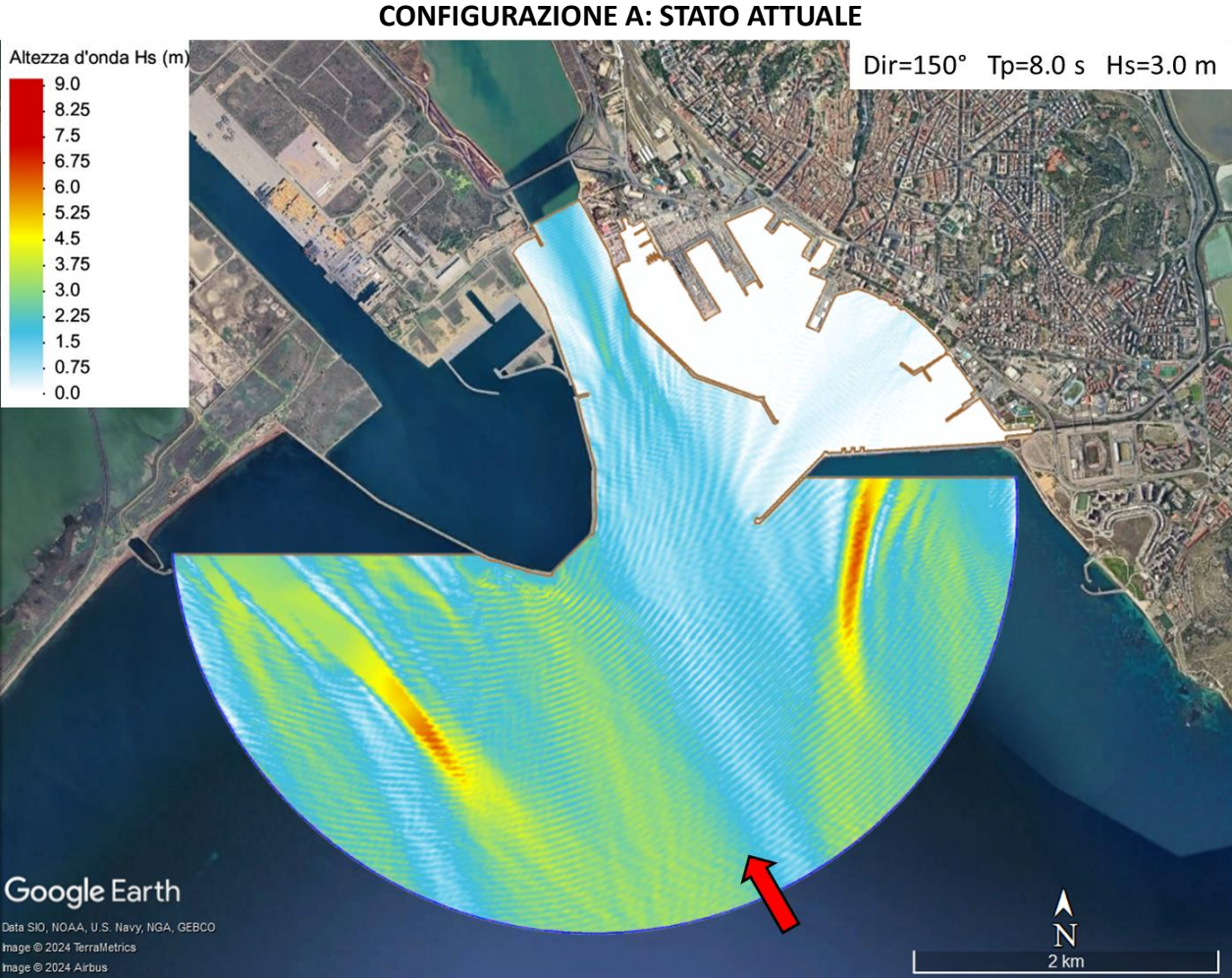
CONFIGURAZIONE B1: MOLO INTERNO RIFLETTEnte



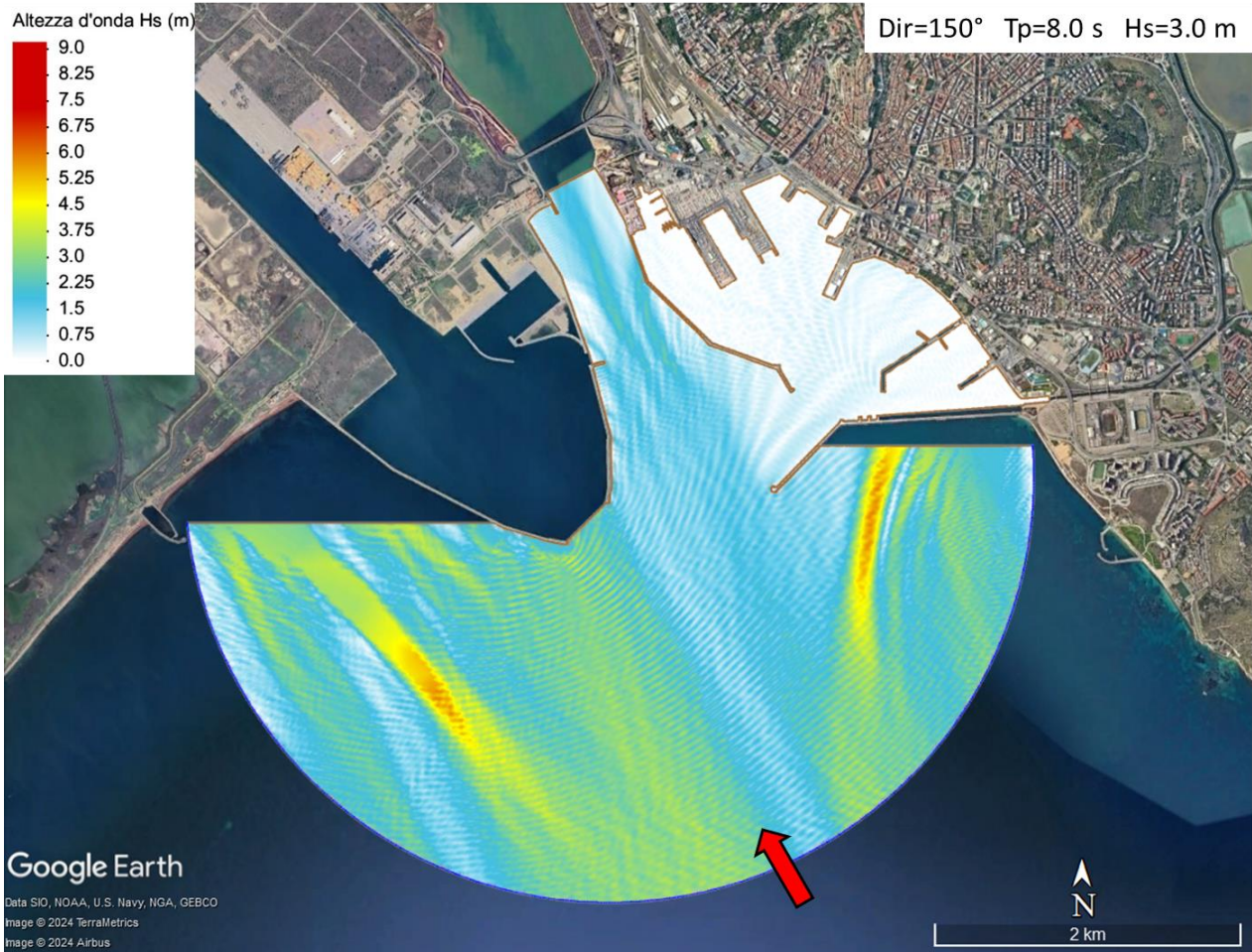
CONFIGURAZIONE B2: MOLO INTERNO ASSORBENTE



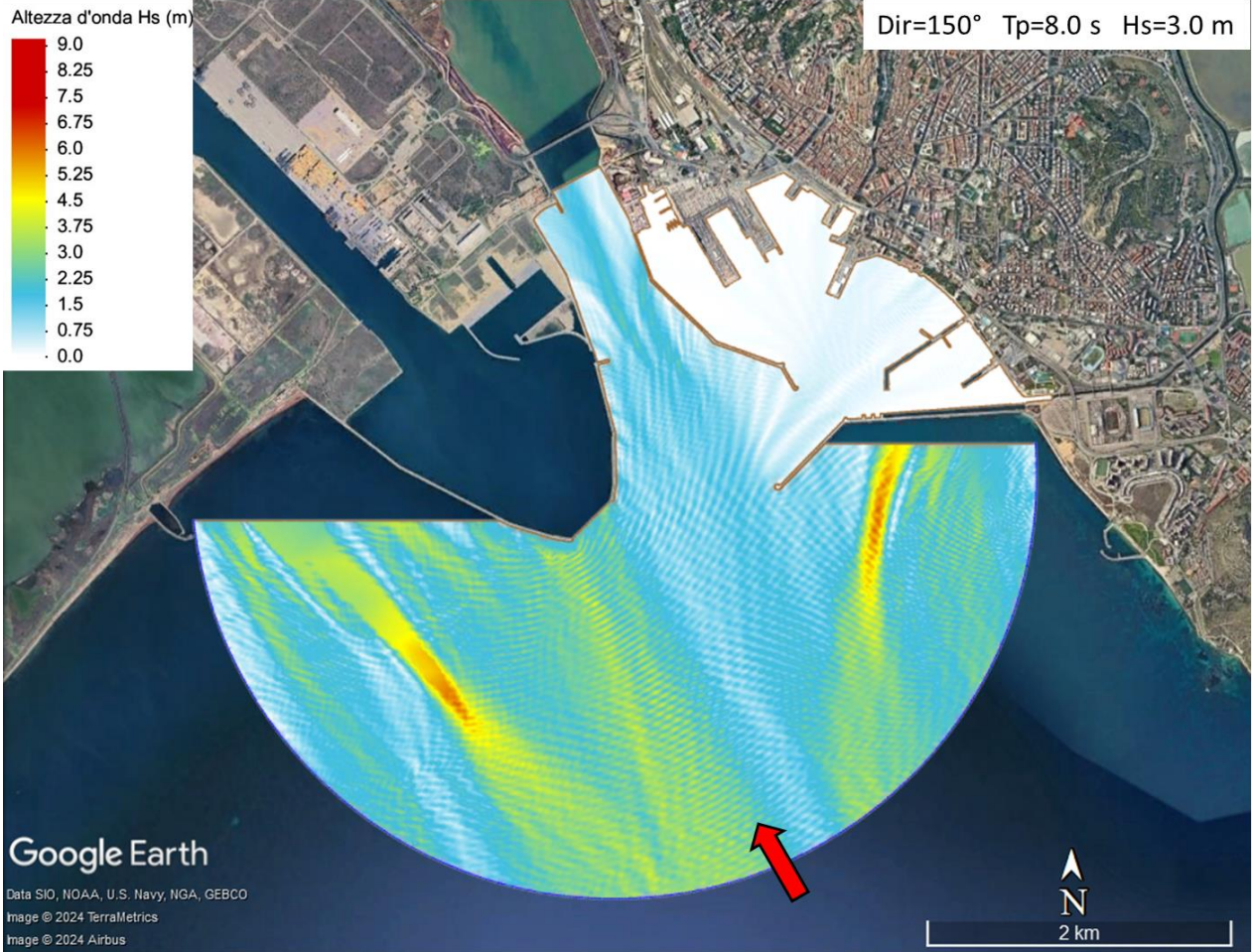
TAV_7:
RISULTATI CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO 7 :
TR= 2 anni
Dir=150°N Tp=8.0s Hs=3.0m



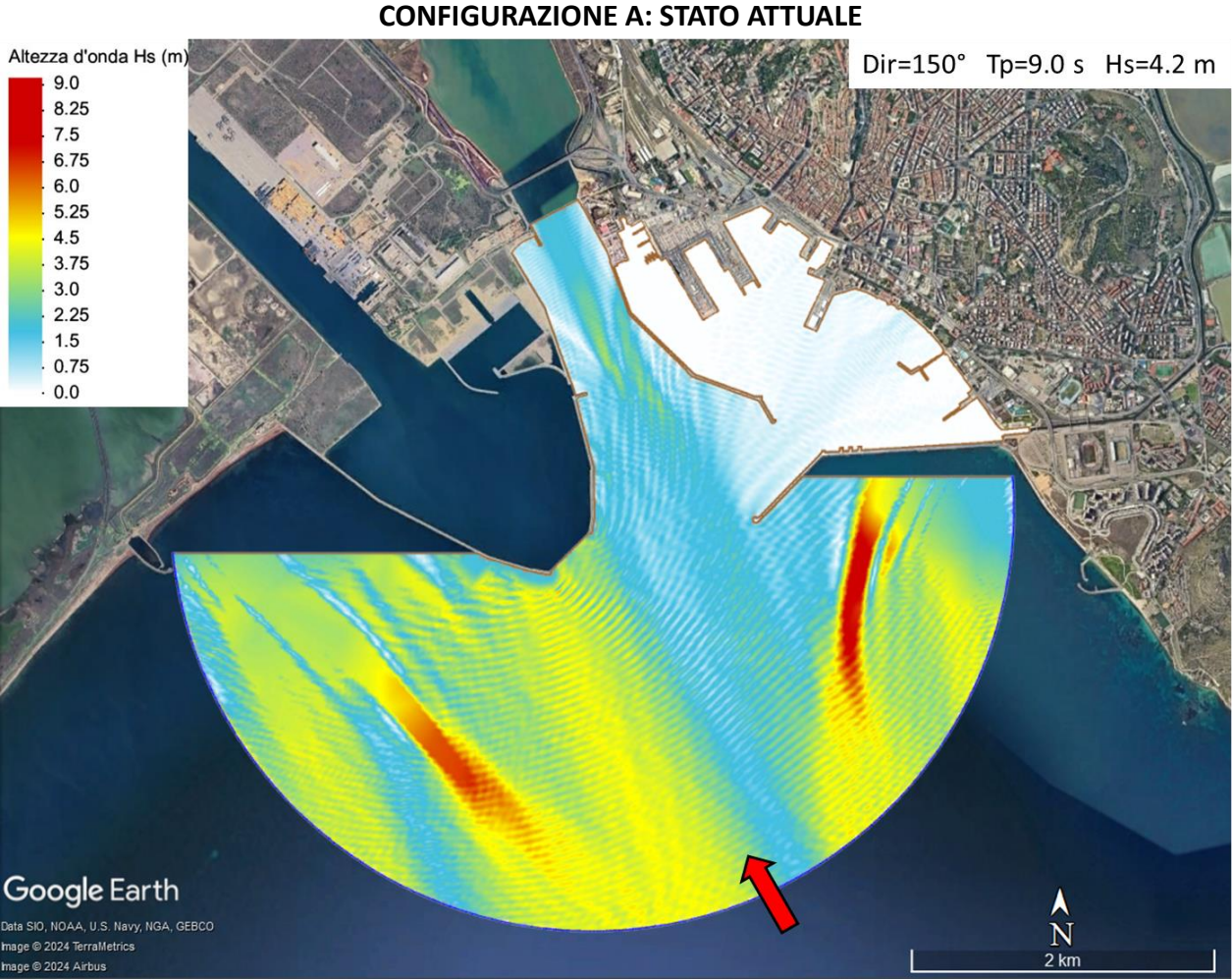
CONFIGURAZIONE B1: MOLO INTERNO RIFLETTEnte



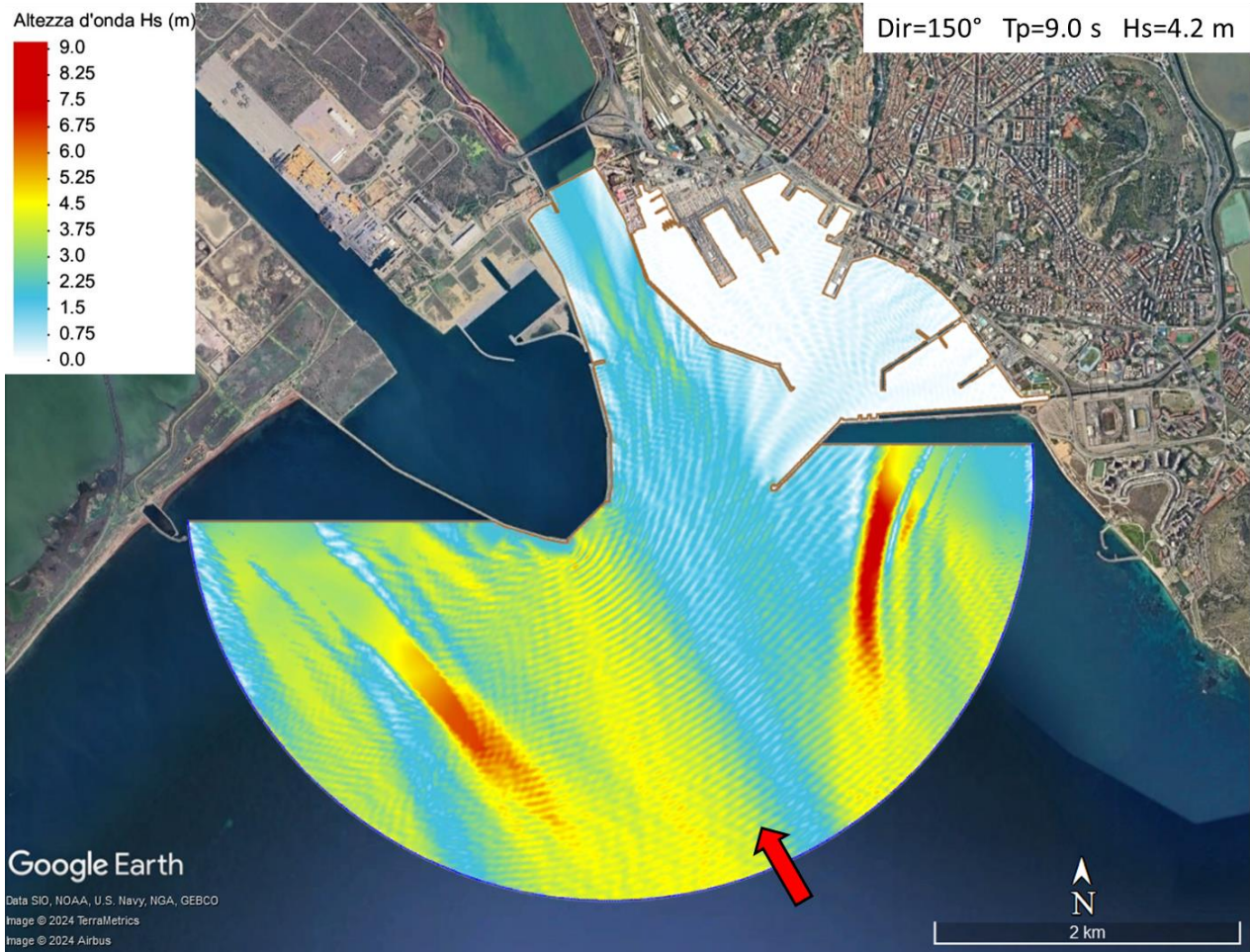
CONFIGURAZIONE B2: MOLO INTERNO ASSORBENTE



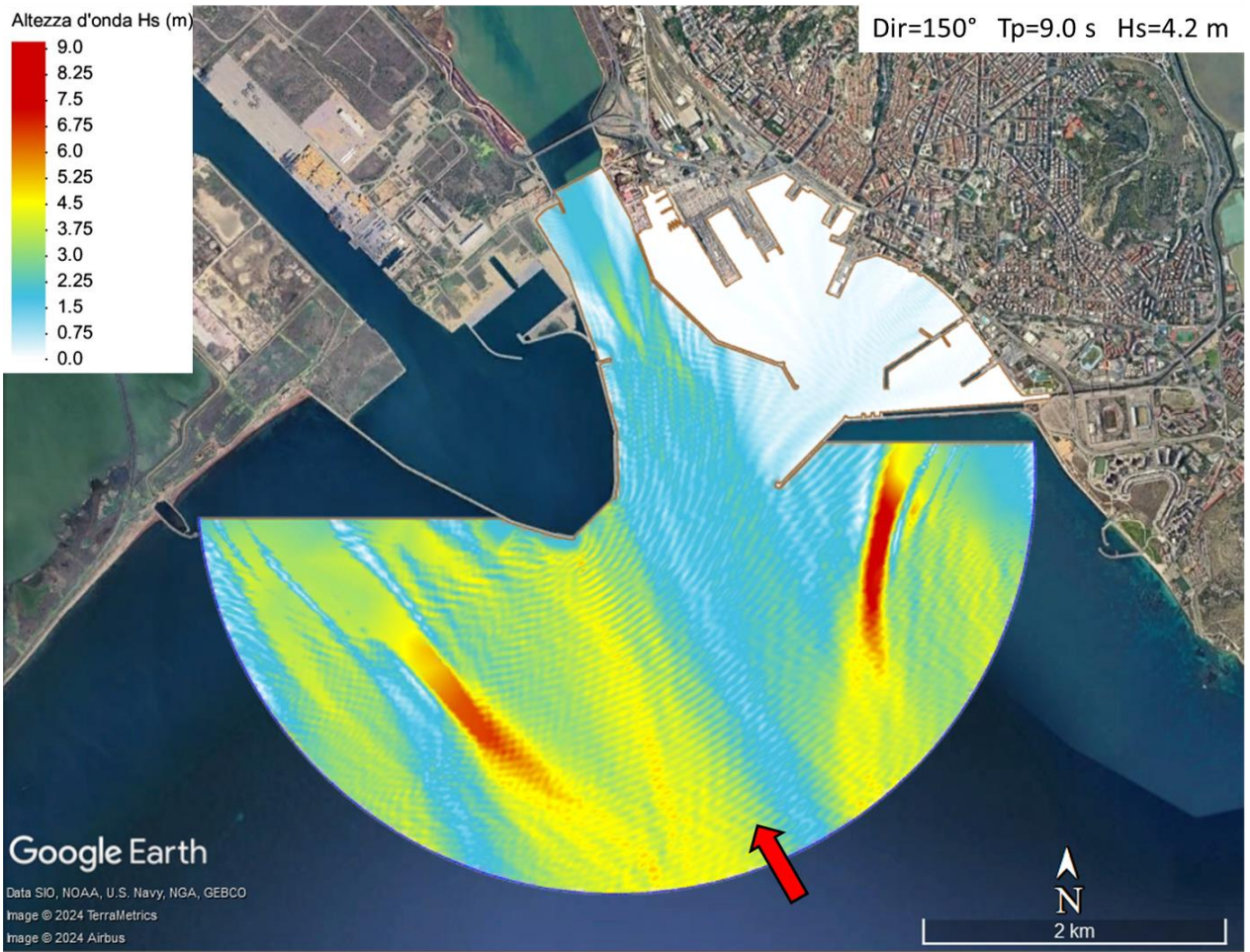
TAV_8:
RISULTATI CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO 8:
TR= 20 anni
Dir=150°N Tp=9.0s Hs=4.2m



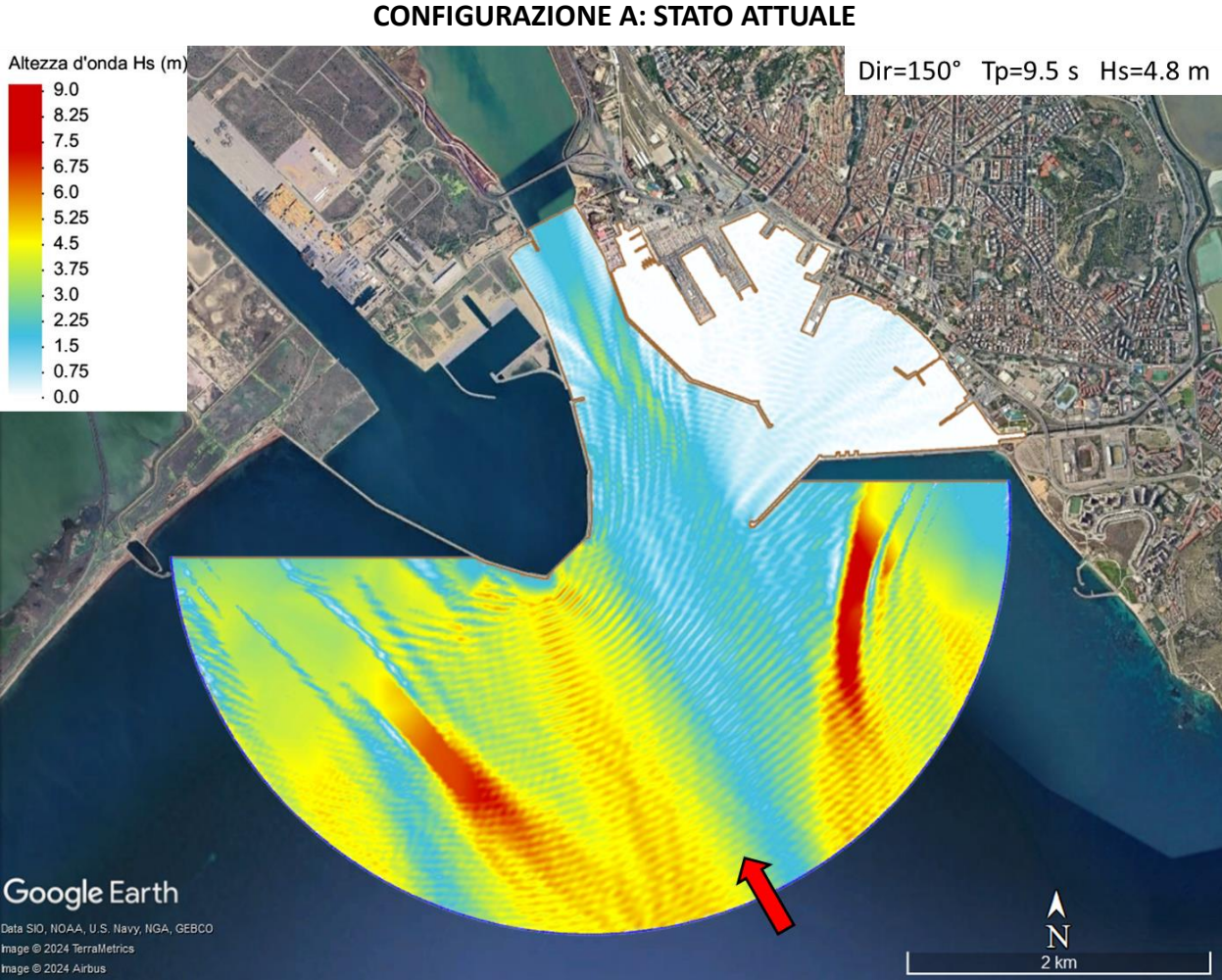
CONFIGURAZIONE B1: MOLO INTERNO RIFLETTENTE



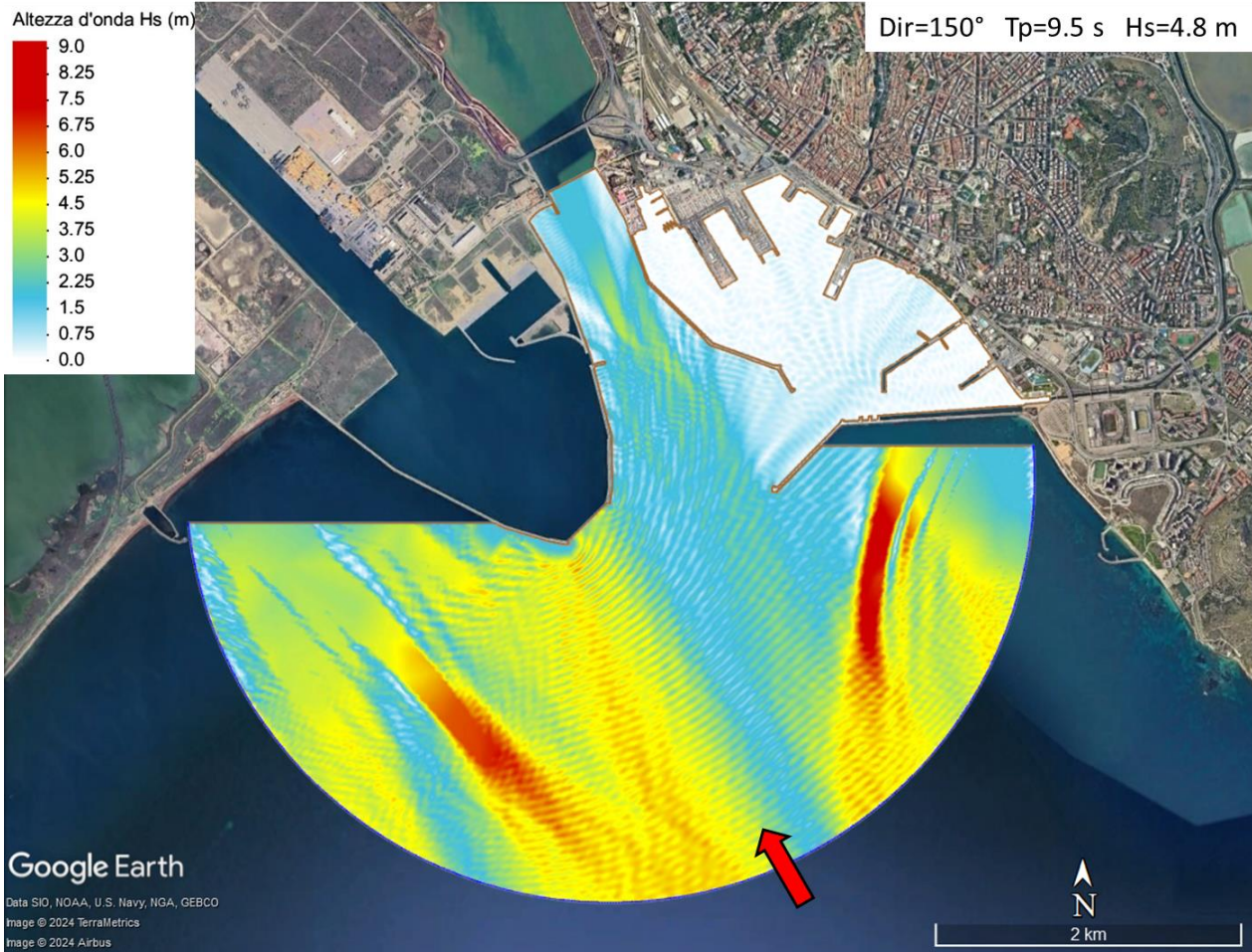
CONFIGURAZIONE B2: MOLO INTERNO ASSORBENTE



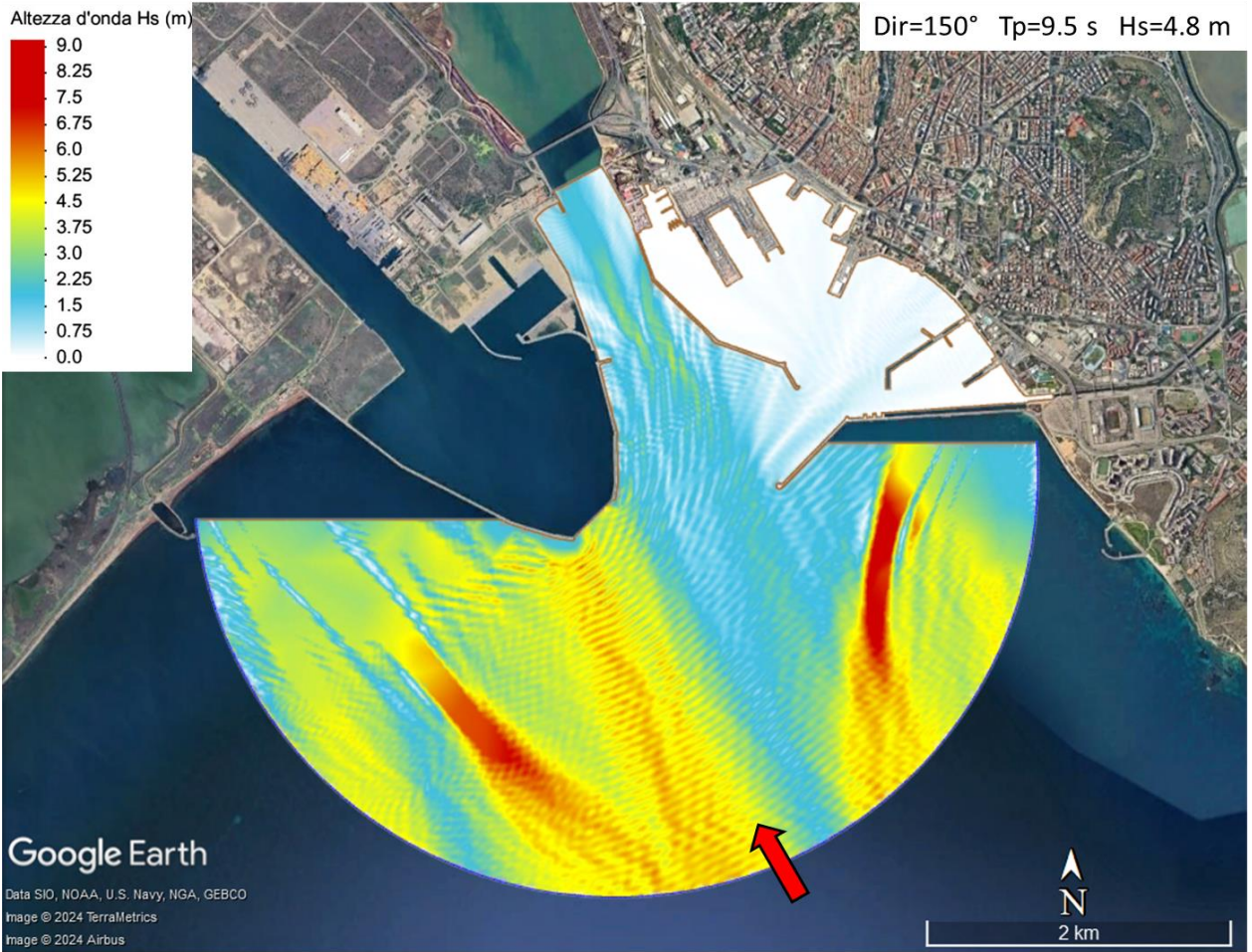
TAV_9:
RISULTATI CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO 9:
TR= 50 anni
Dir=150°N Tp=9.5s Hs=4.8m



CONFIGURAZIONE B1: MOLO INTERNO RIFLETTENTE

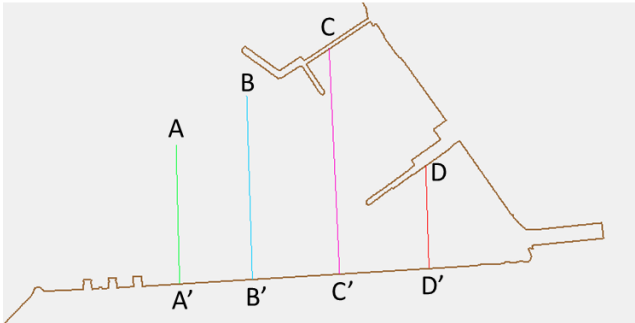


CONFIGURAZIONE B2: MOLO INTERNO ASSORBENTE

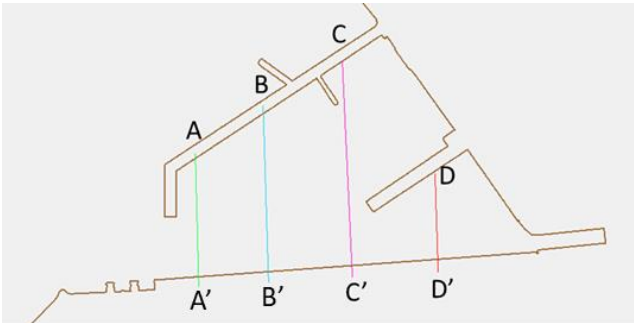


TAV_10: Confronto risultati sezioni interne al porto turistico
CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO 1:
TR= 2 anni
Dir=180°N Tp=8.0s Hs=3.0m

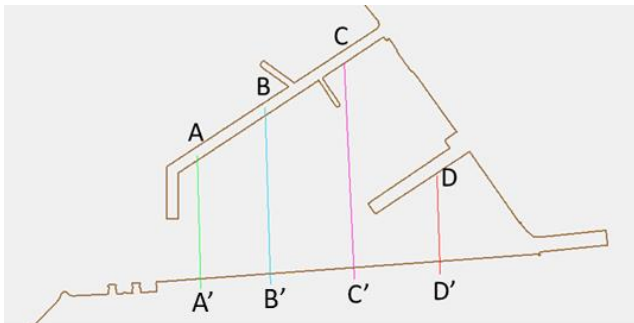
CONFIGURAZIONE A: STATO ATTUALE



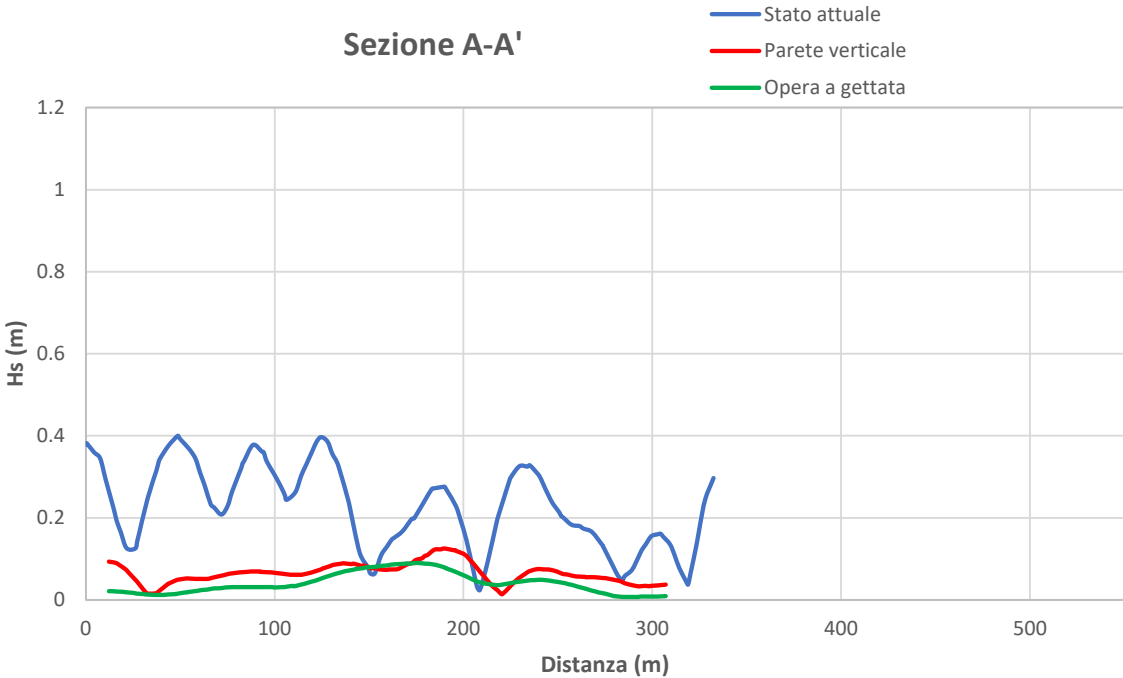
CONFIGURAZIONE B1: MOLO INTERNO RIFLETTENTE



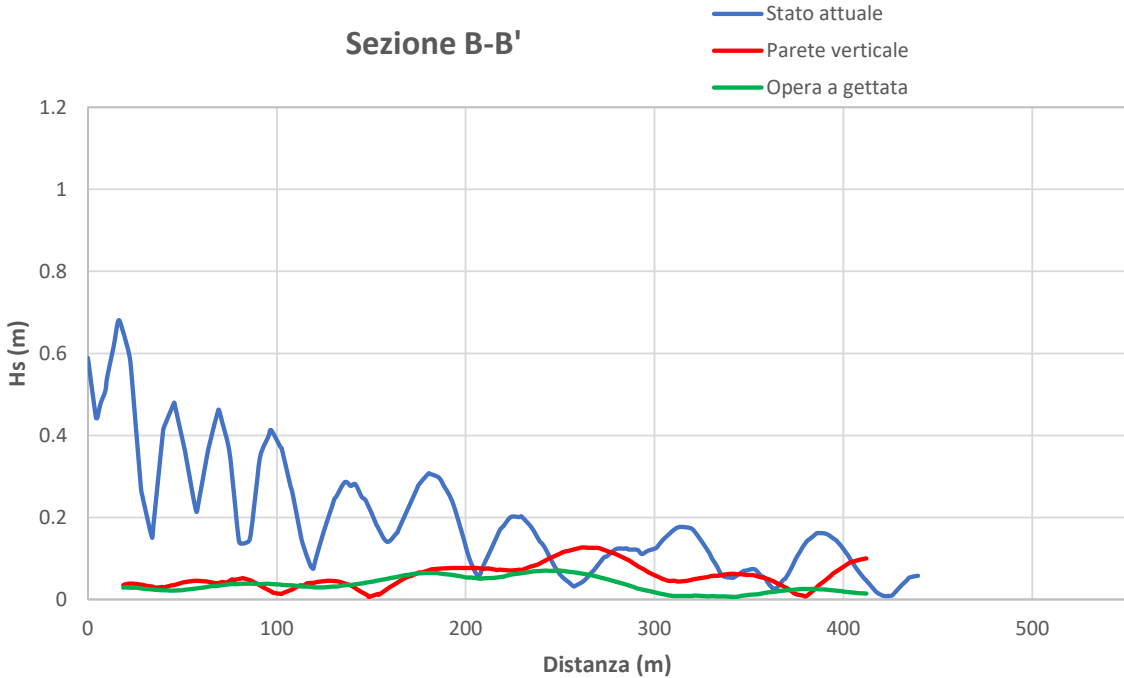
CONFIGURAZIONE B2: MOLO INTERNO ASSORBENTE



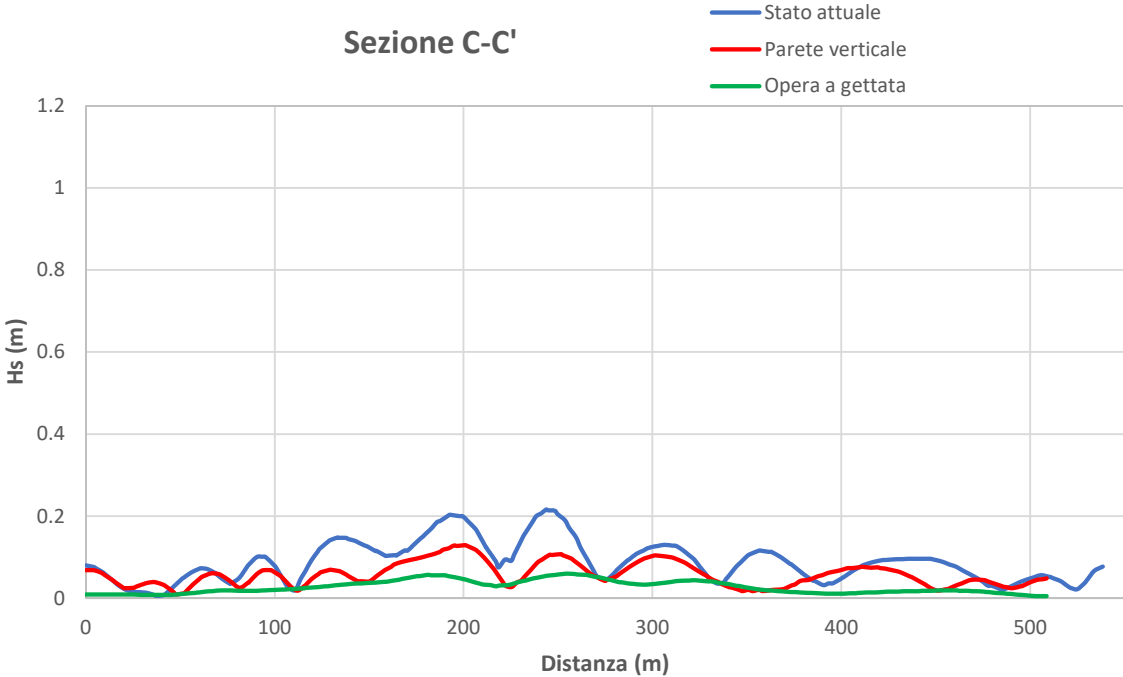
Sezione A-A'



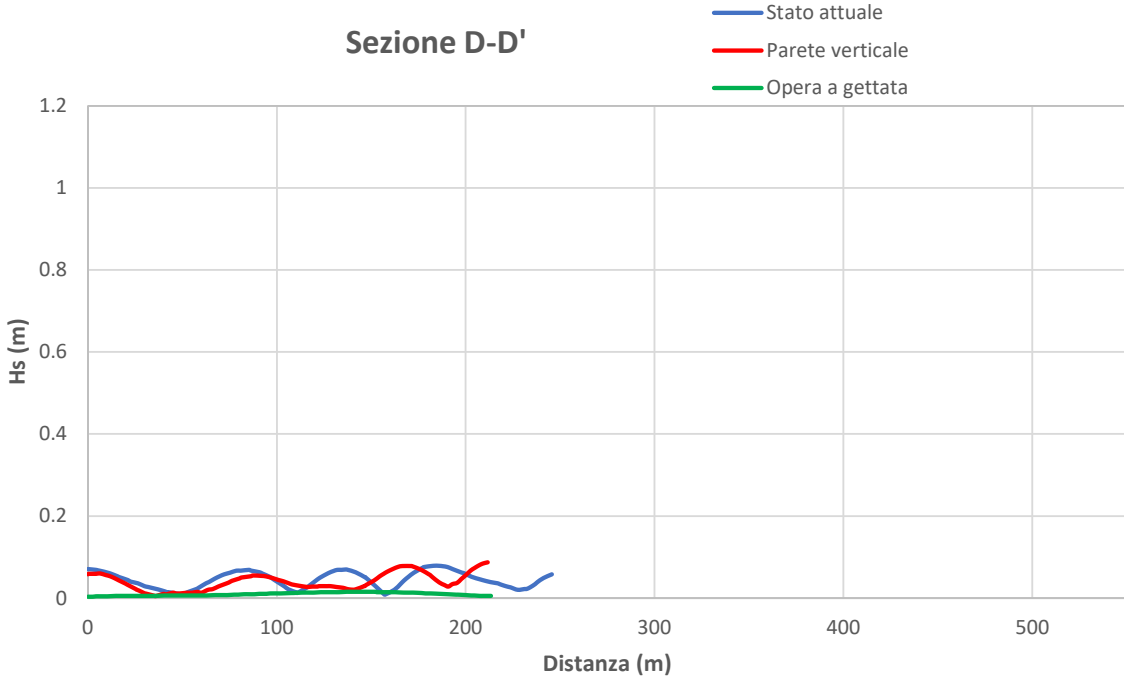
Sezione B-B'



Sezione C-C'

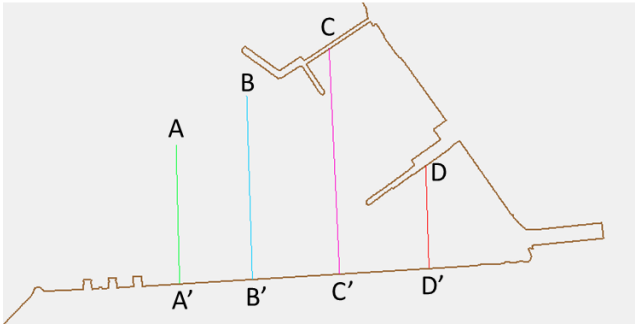


Sezione D-D'

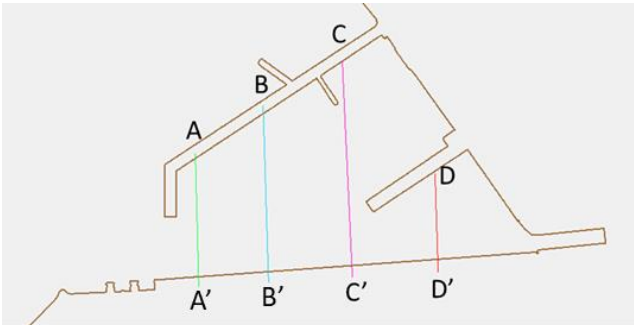


TAV_11: Confronto risultati sezioni interne al porto turistico
CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO 2:
TR= 20 anni
Dir=180°N Tp=9.0s Hs=4.2m

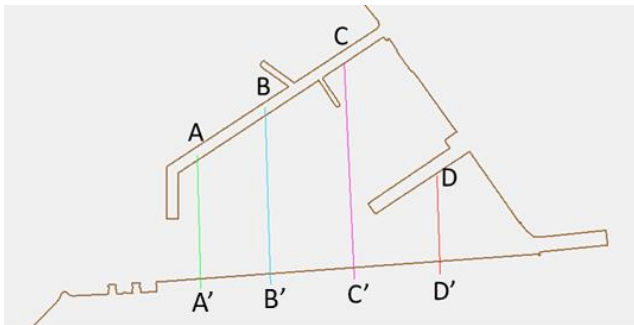
CONFIGURAZIONE A: STATO ATTUALE



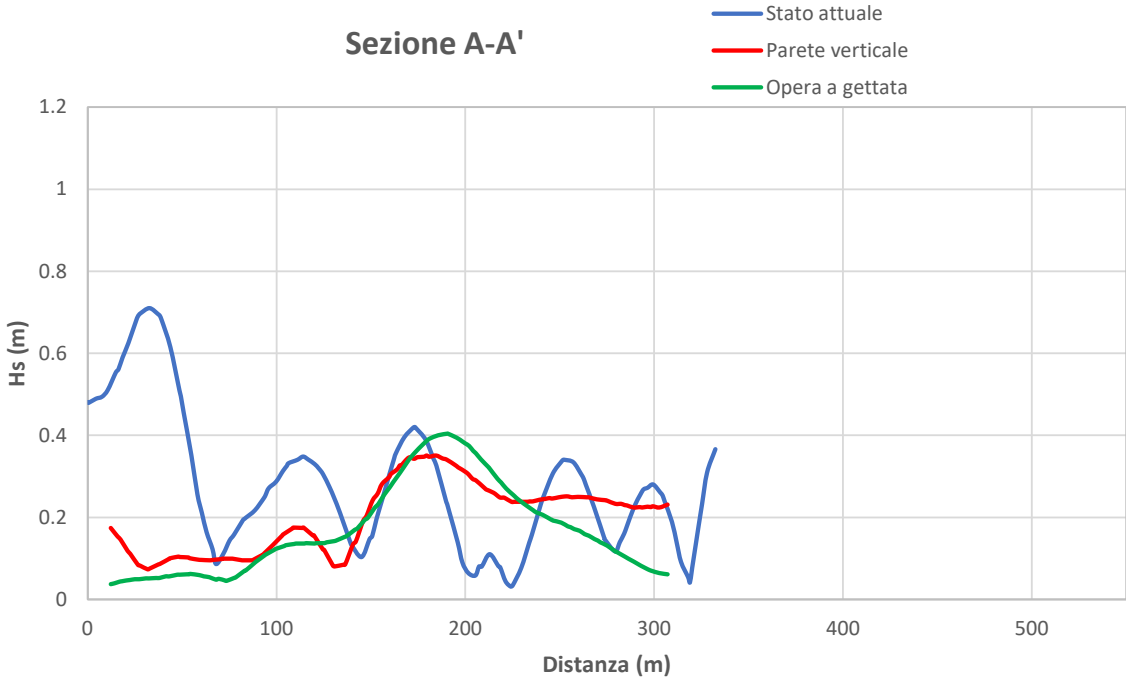
CONFIGURAZIONE B1: MOLO INTERNO RIFLETTENTE



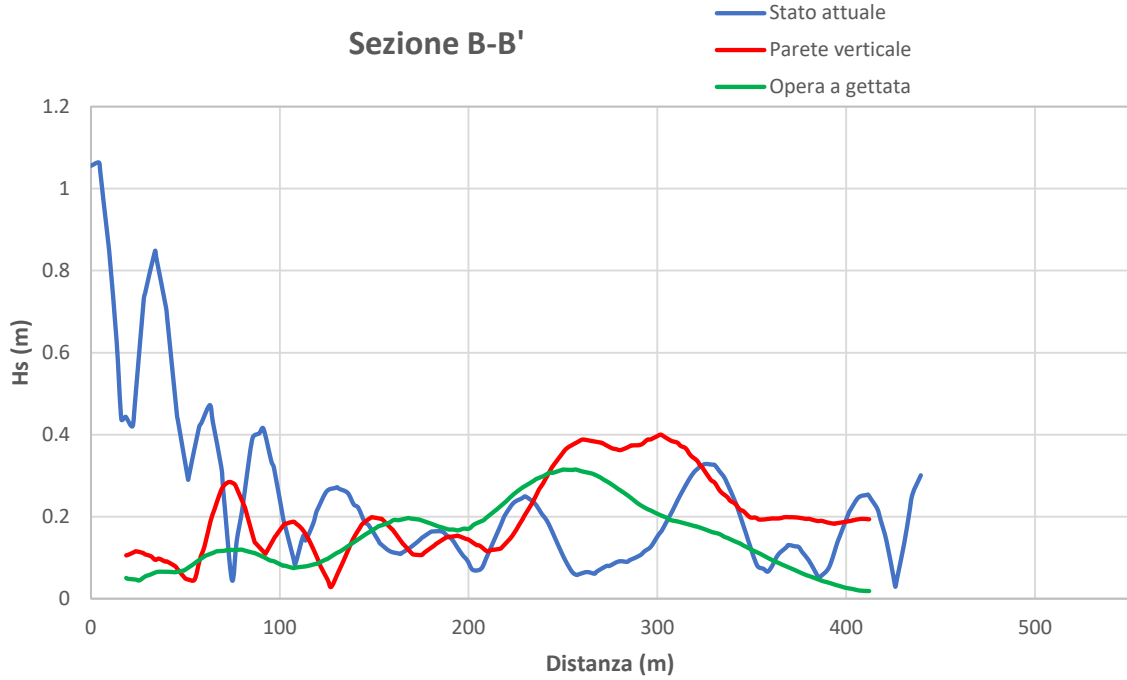
CONFIGURAZIONE B2: MOLO INTERNO ASSORBENTE



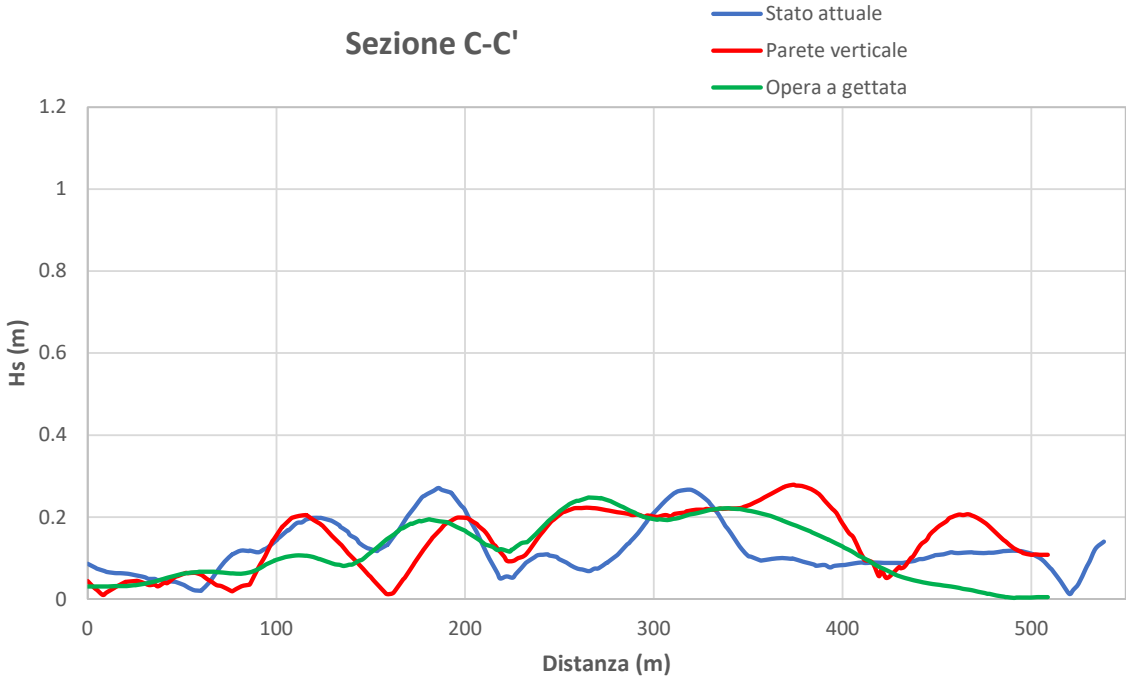
Sezione A-A'



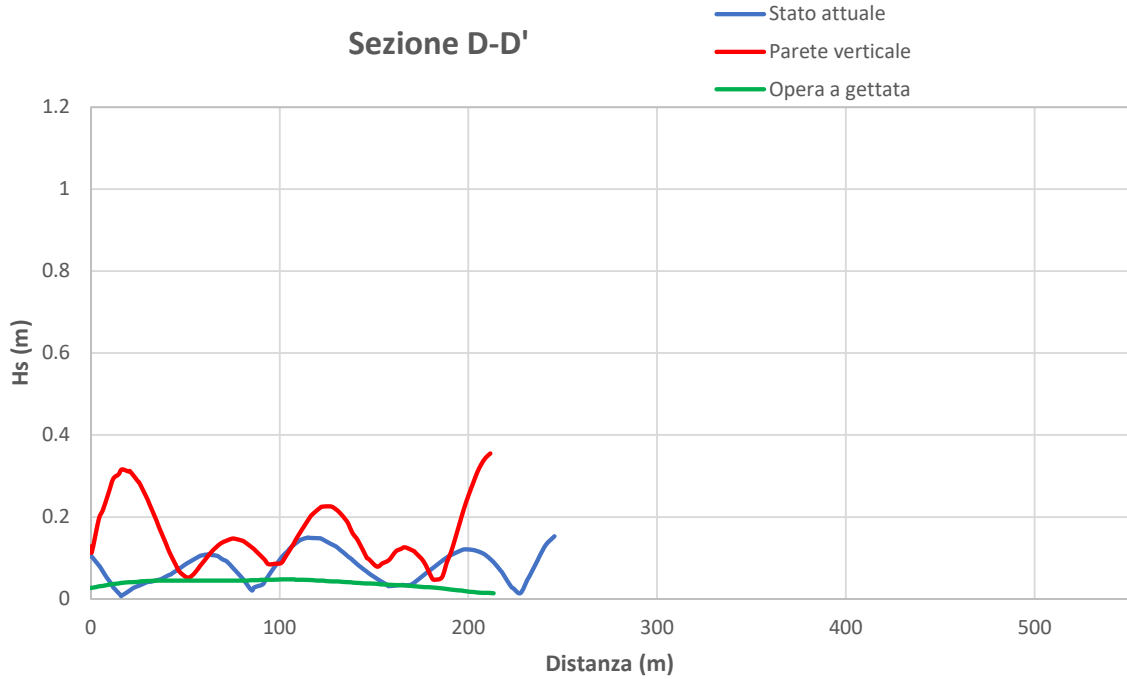
Sezione B-B'



Sezione C-C'

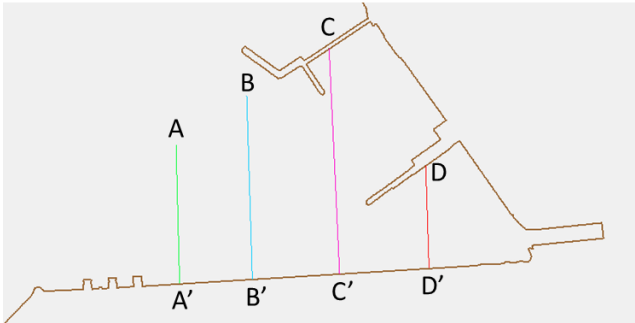


Sezione D-D'

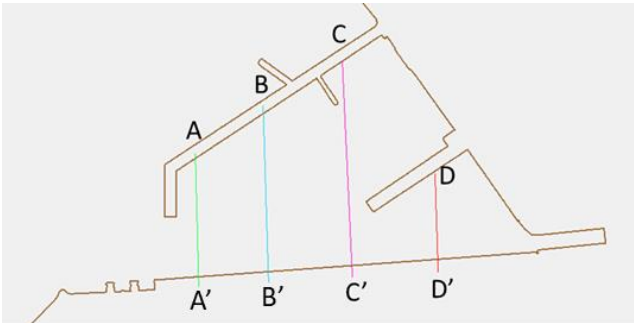


TAV_12: Confronto risultati sezioni interne al porto turistico
CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO 3:
TR= 50 anni
Dir=180°N Tp=9.5s Hs=4.8m

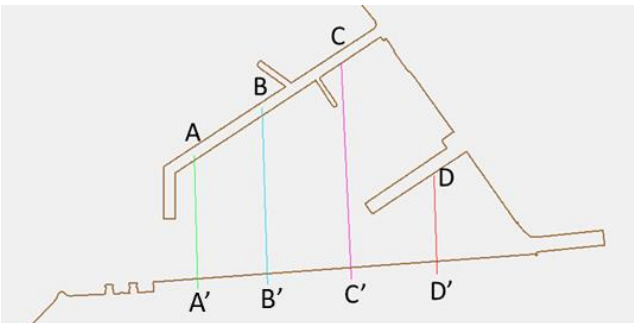
CONFIGURAZIONE A: STATO ATTUALE



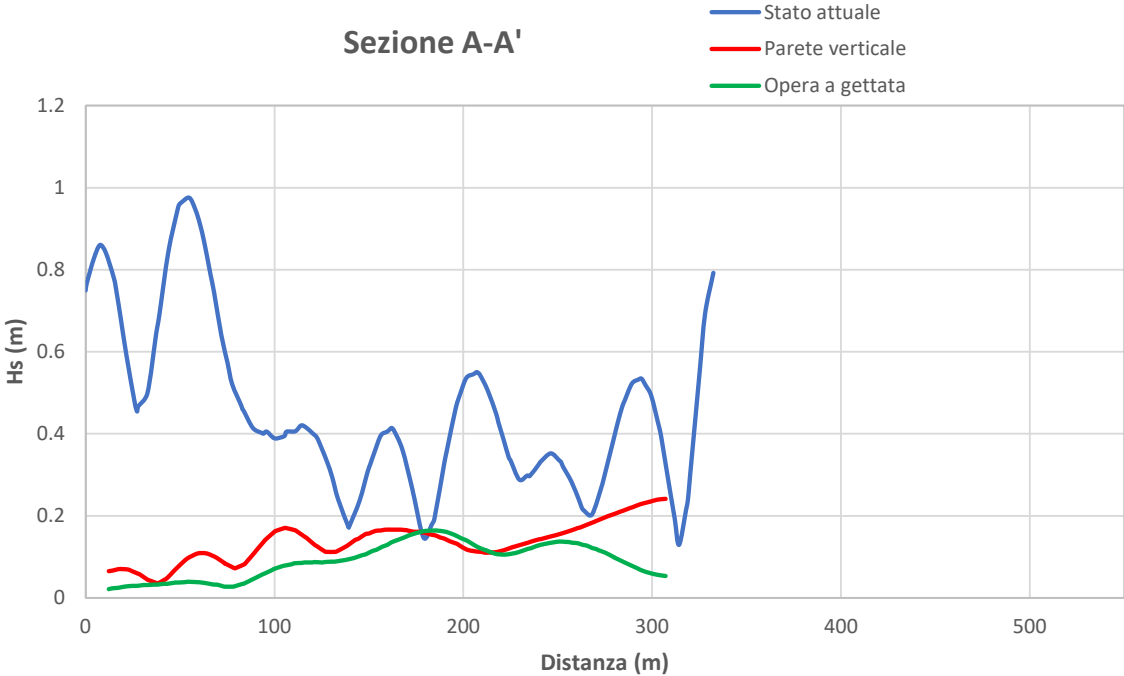
CONFIGURAZIONE B1: MOLO INTERNO RIFLETTENTE



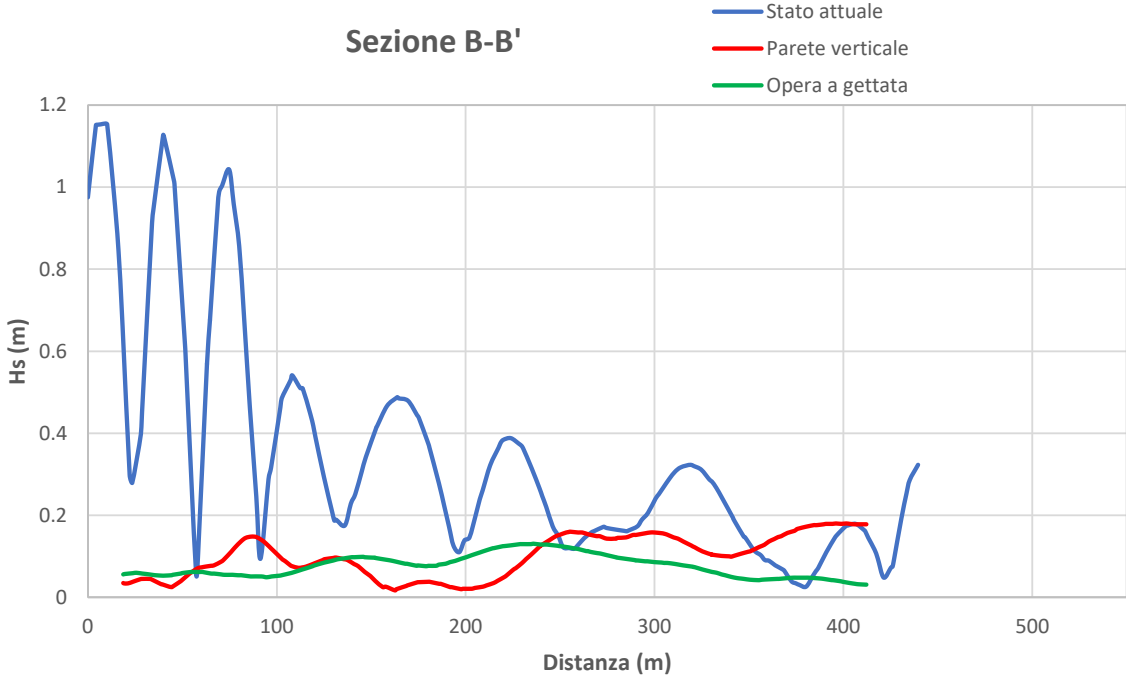
CONFIGURAZIONE B2: MOLO INTERNO ASSORBENTE



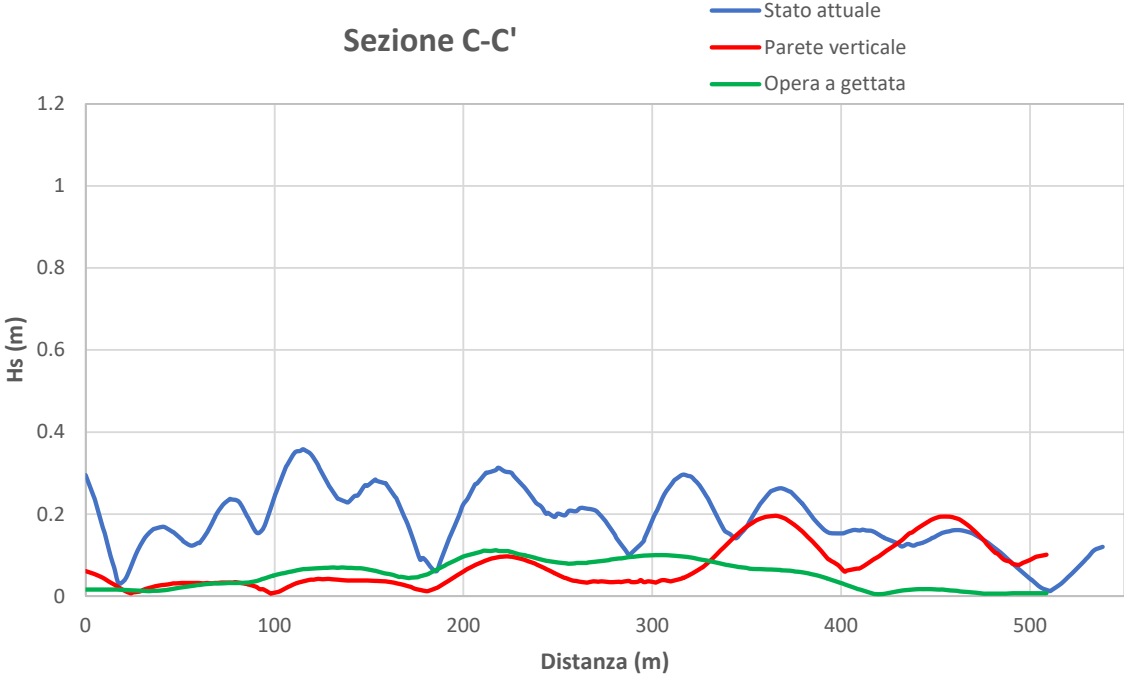
Sezione A-A'



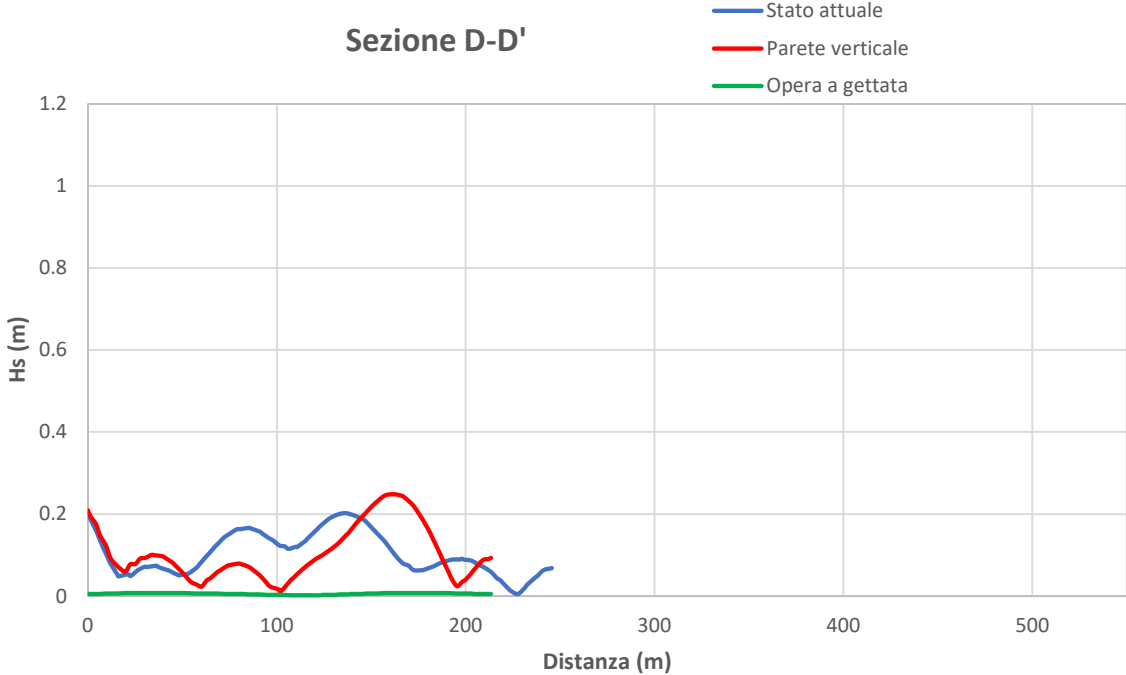
Sezione B-B'



Sezione C-C'

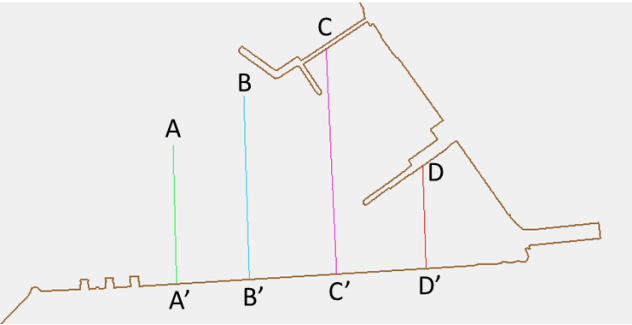


Sezione D-D'

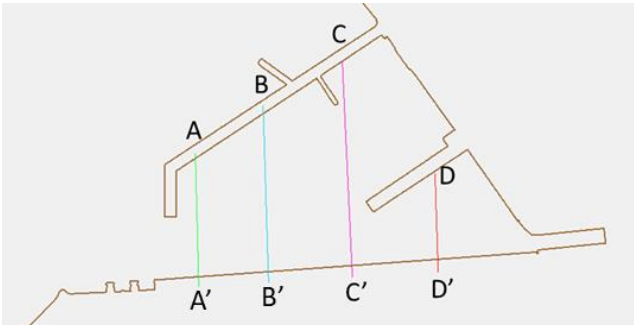


TAV_13: Confronto risultati sezioni interne al porto turistico
CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO 4:
TR= 2 anni
Dir=165°N Tp=8.0s Hs=3.0m

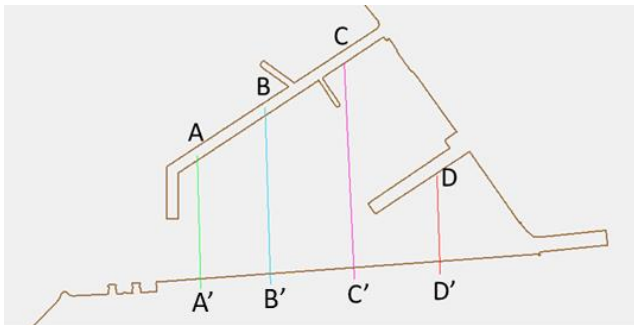
CONFIGURAZIONE A: STATO ATTUALE



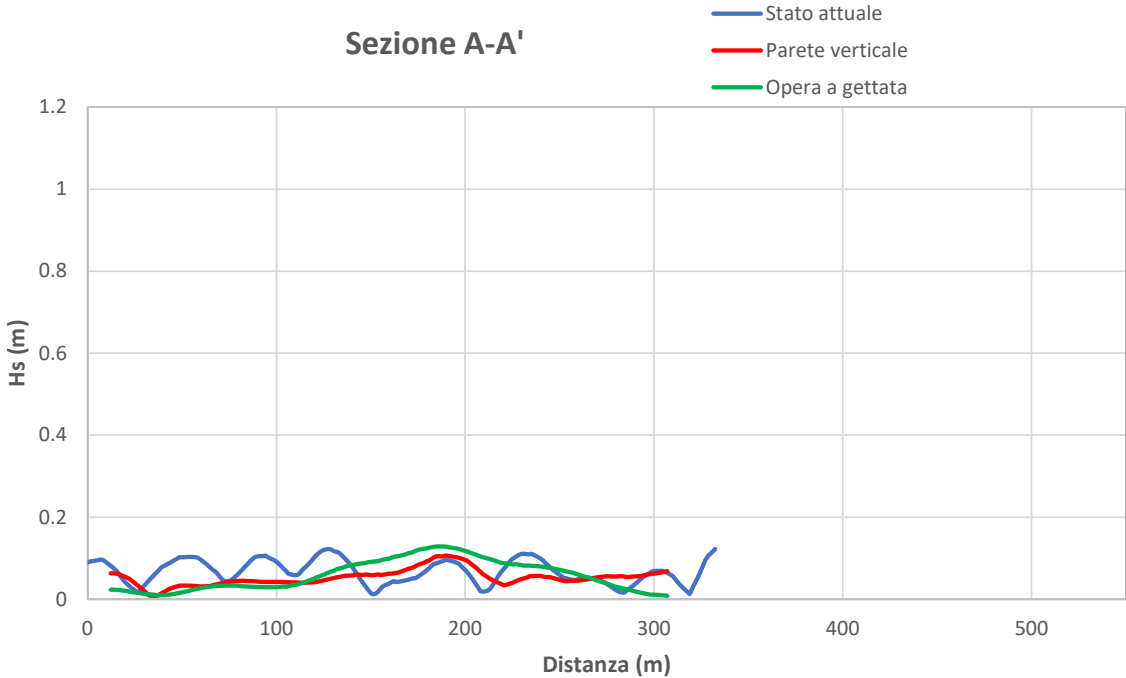
CONFIGURAZIONE B1: MOLO INTERNO RIFLETTENTE



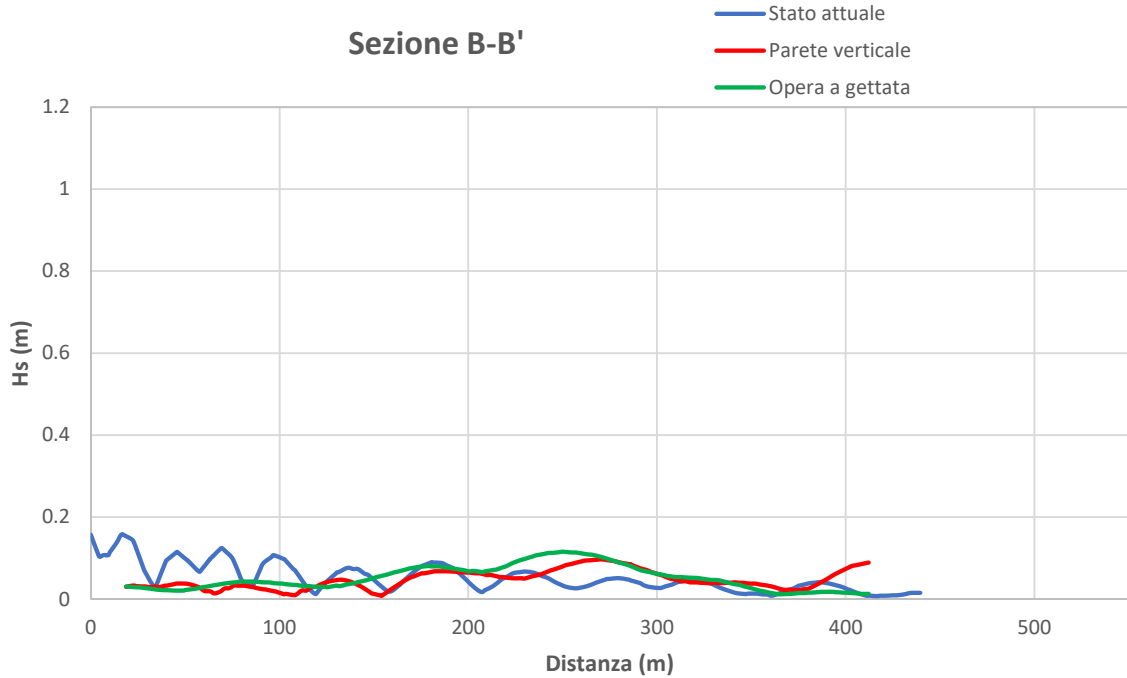
CONFIGURAZIONE B2: MOLO INTERNO ASSORBENTE



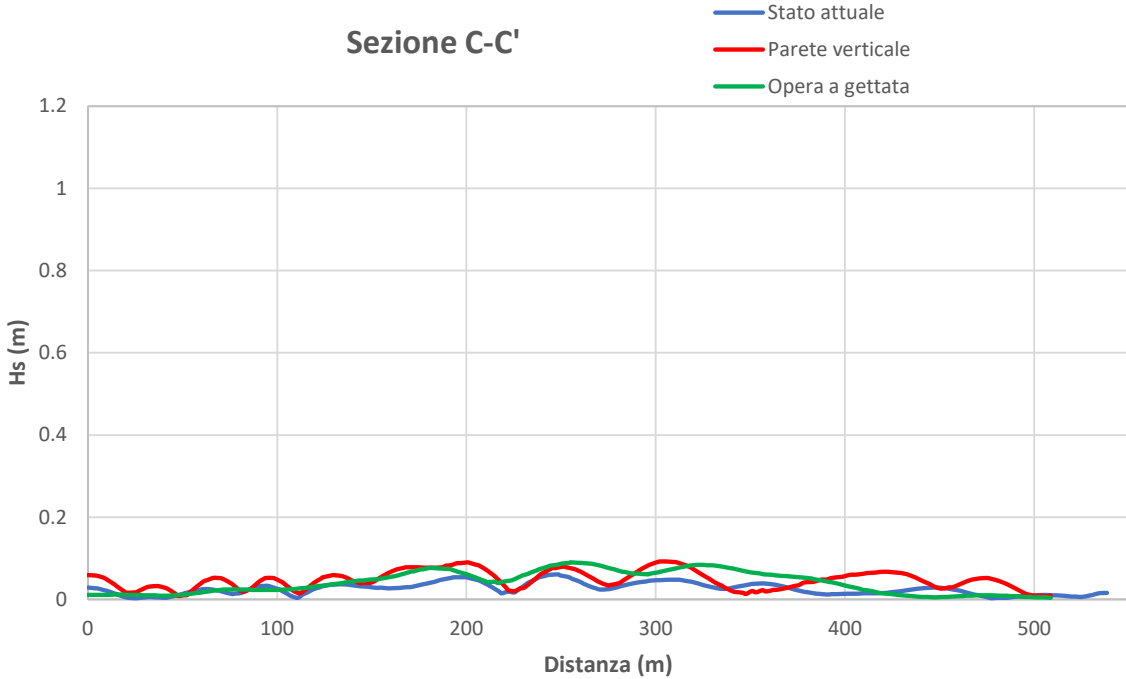
Sezione A-A'



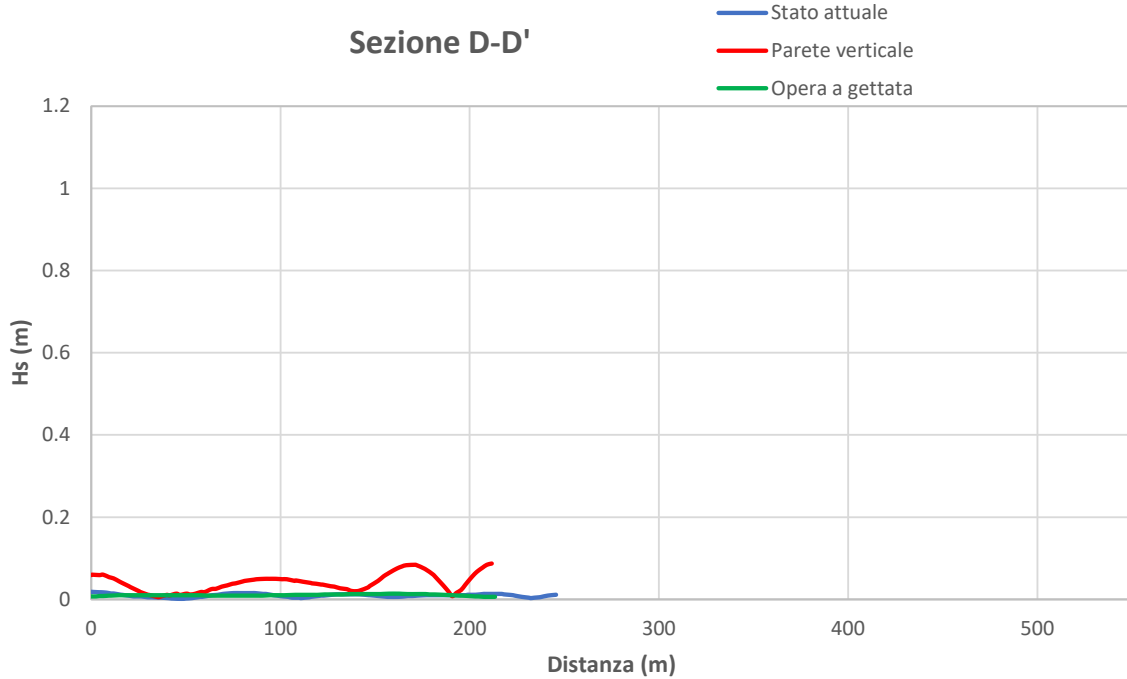
Sezione B-B'



Sezione C-C'

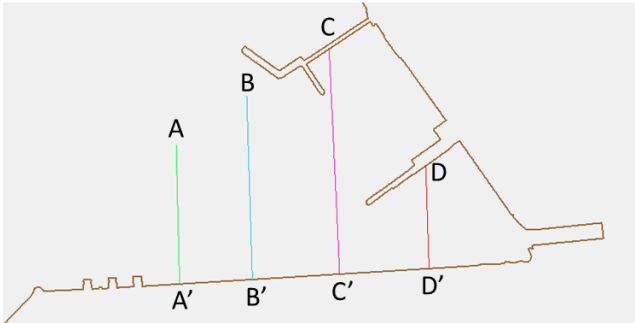


Sezione D-D'

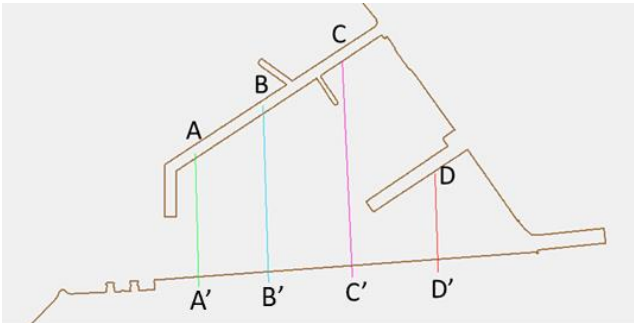


TAV_14: Confronto risultati sezioni interne al porto turistico
CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO 5:
TR= 20 anni
Dir=165°N Tp=9.0s Hs=4.2m

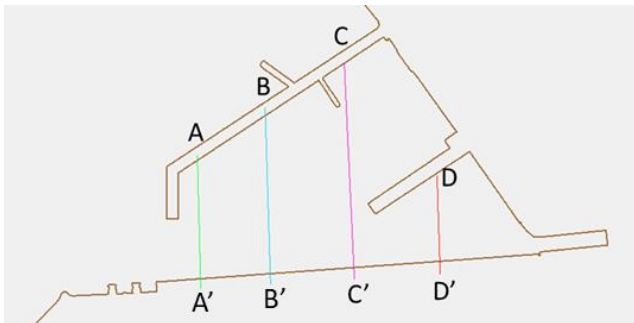
CONFIGURAZIONE A: STATO ATTUALE



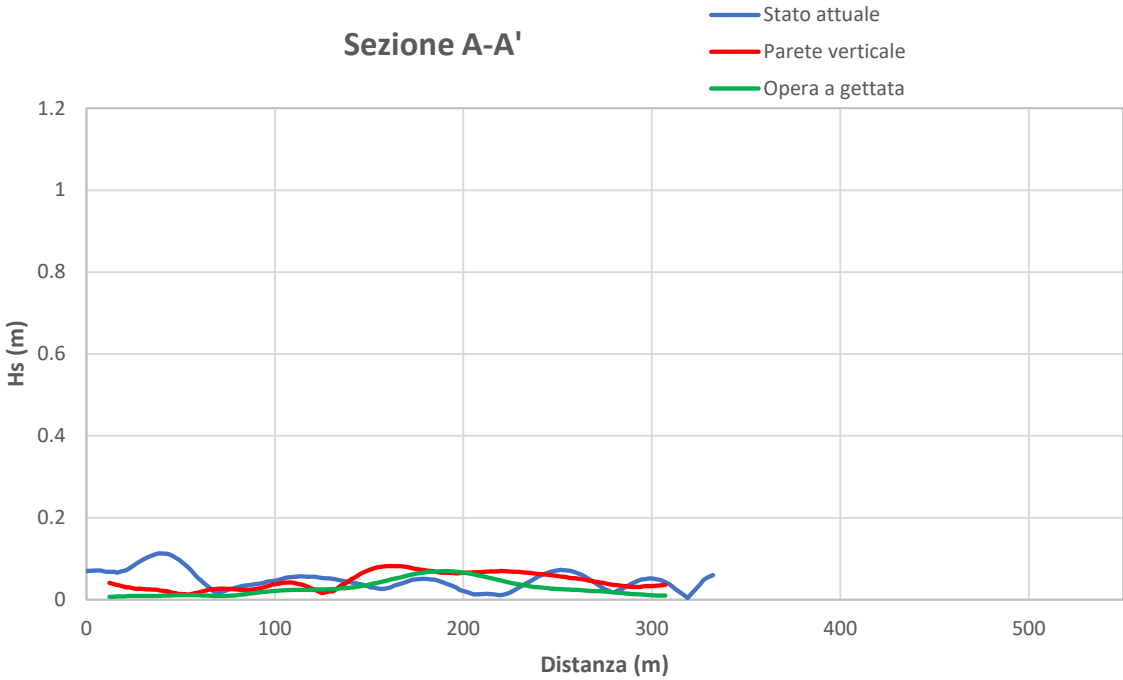
CONFIGURAZIONE B1: MOLO INTERNO RIFLETTENTE



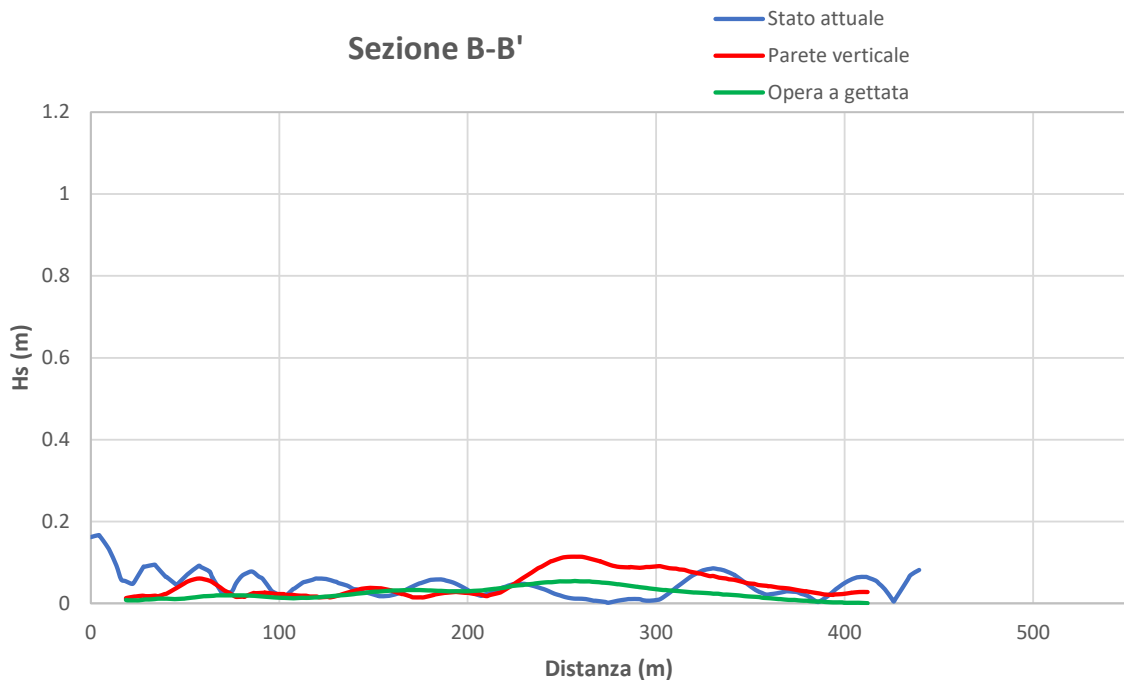
CONFIGURAZIONE B2: MOLO INTERNO ASSORBENTE



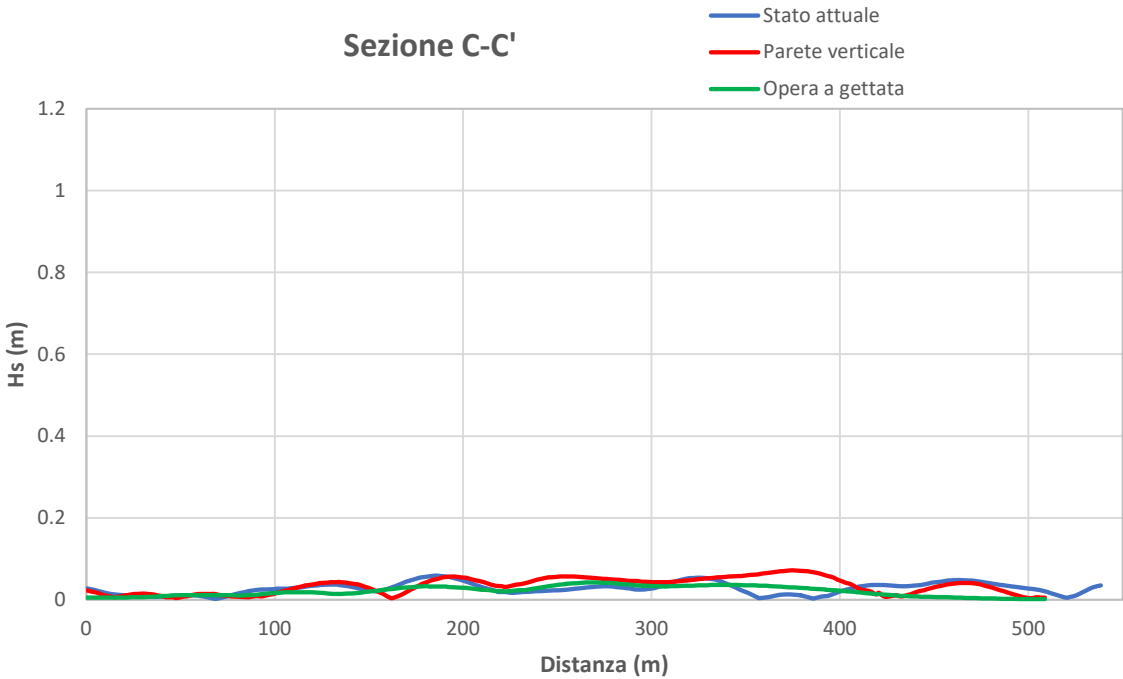
Sezione A-A'



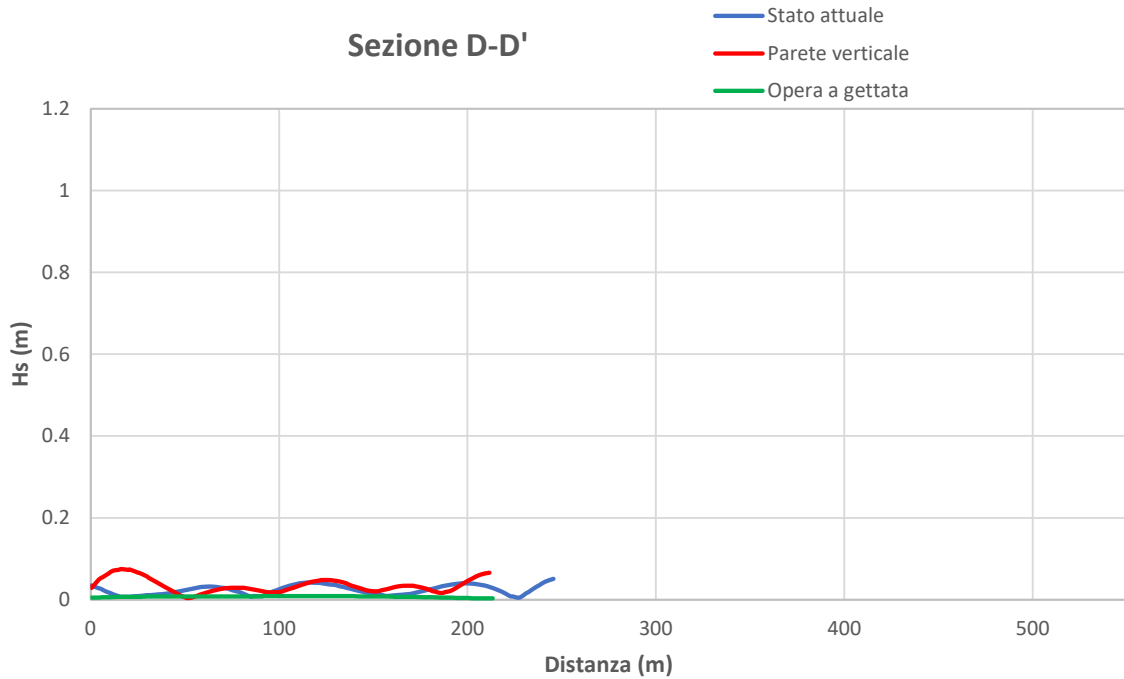
Sezione B-B'



Sezione C-C'

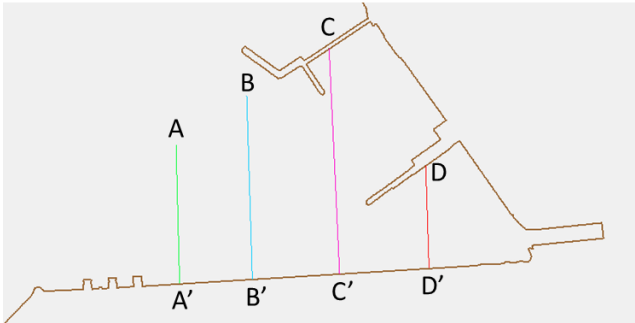


Sezione D-D'

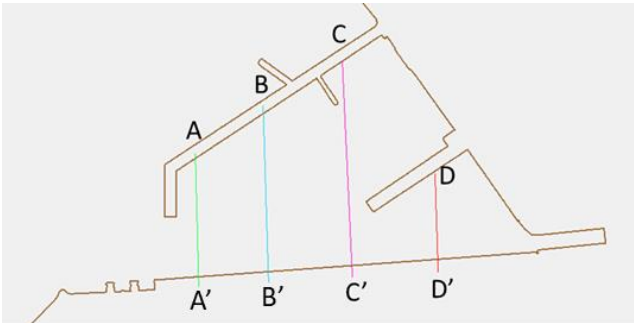


TAV_15: Confronto risultati sezioni interne al porto turistico
CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO 6:
TR= 50 anni
Dir=165°N Tp=9.5s Hs=4.8m

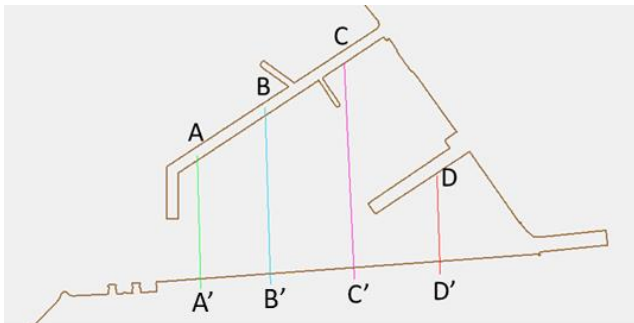
CONFIGURAZIONE A: STATO ATTUALE



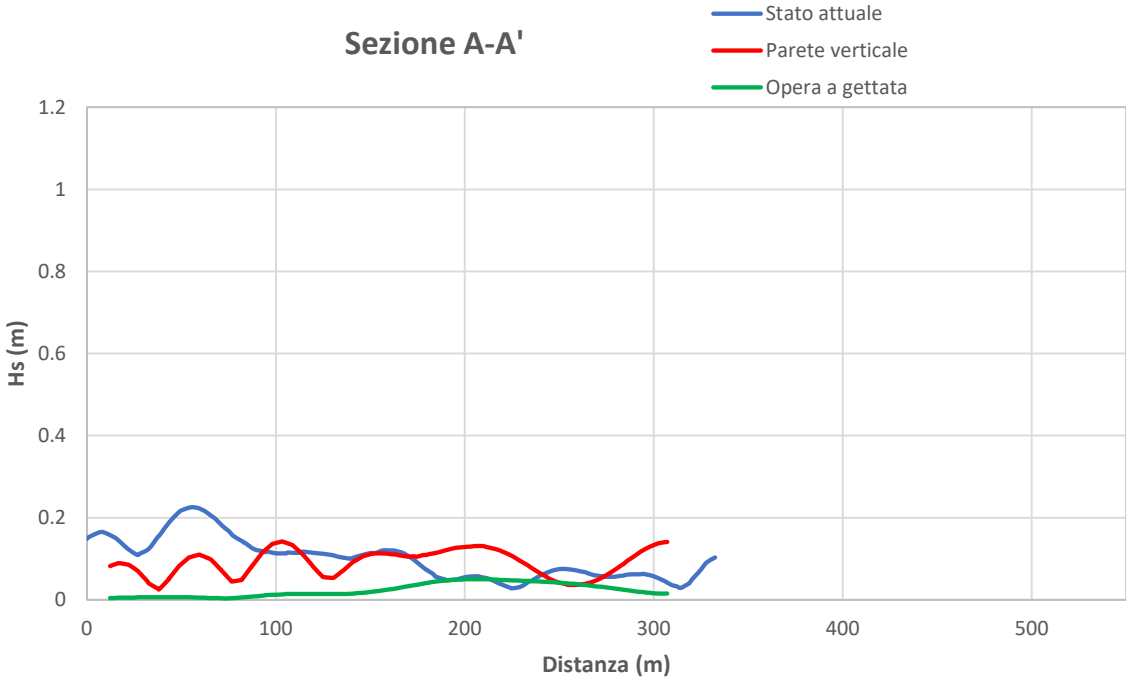
CONFIGURAZIONE B1: MOLO INTERNO RIFLETTENTE



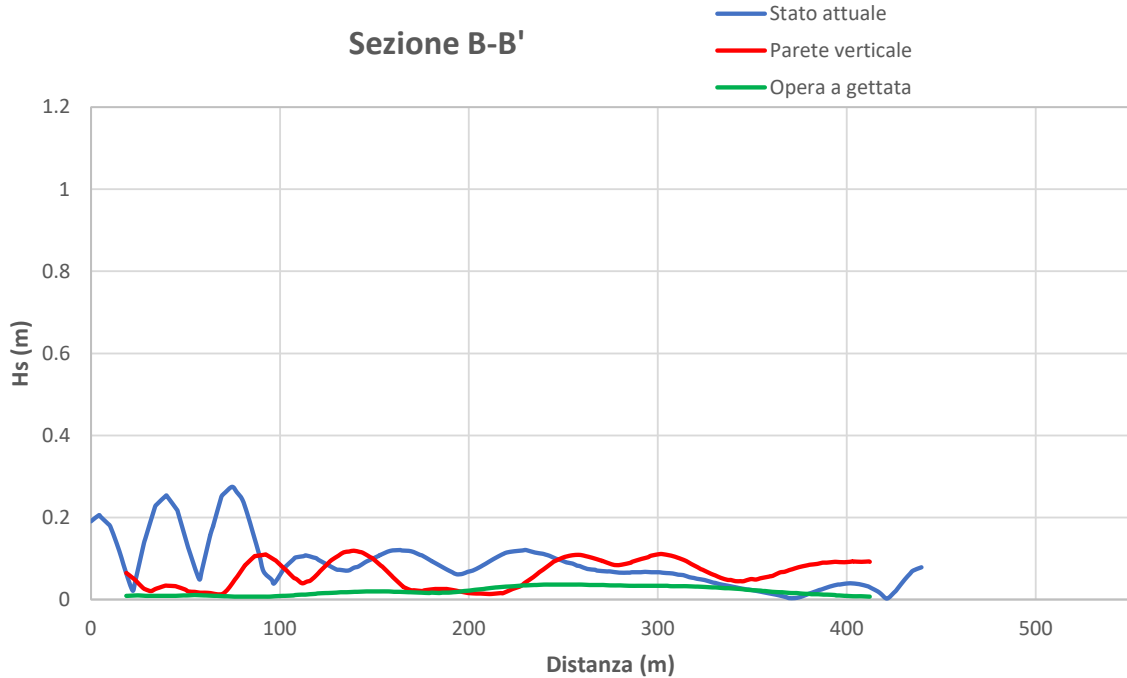
CONFIGURAZIONE B2: MOLO INTERNO ASSORBENTE



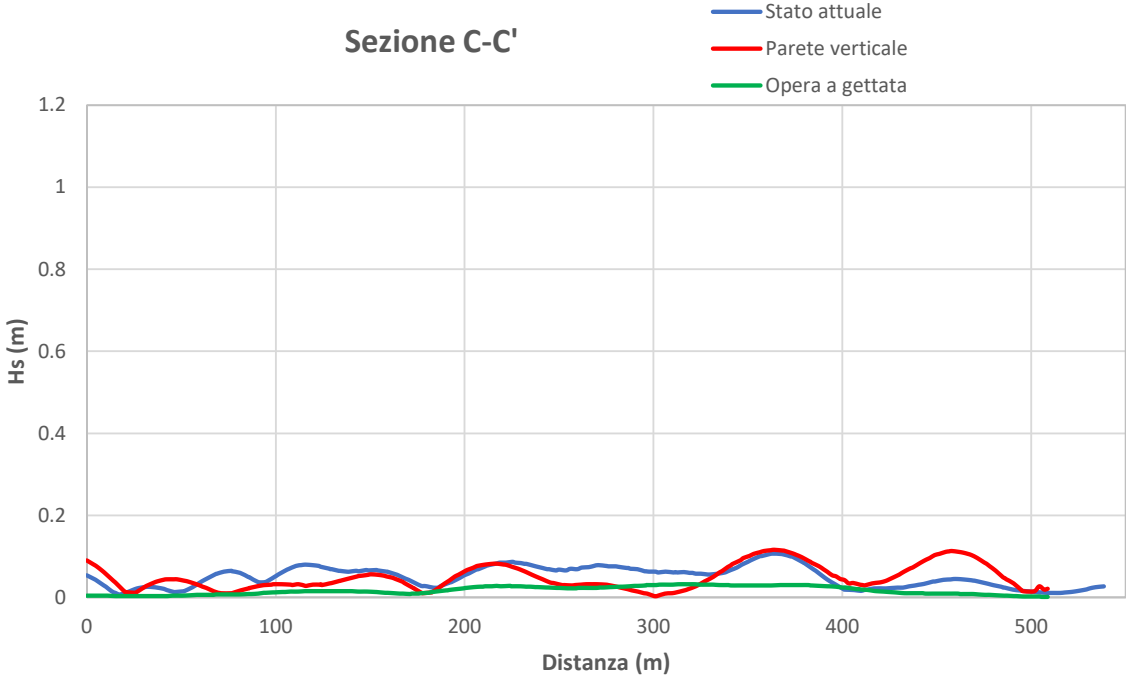
Sezione A-A'



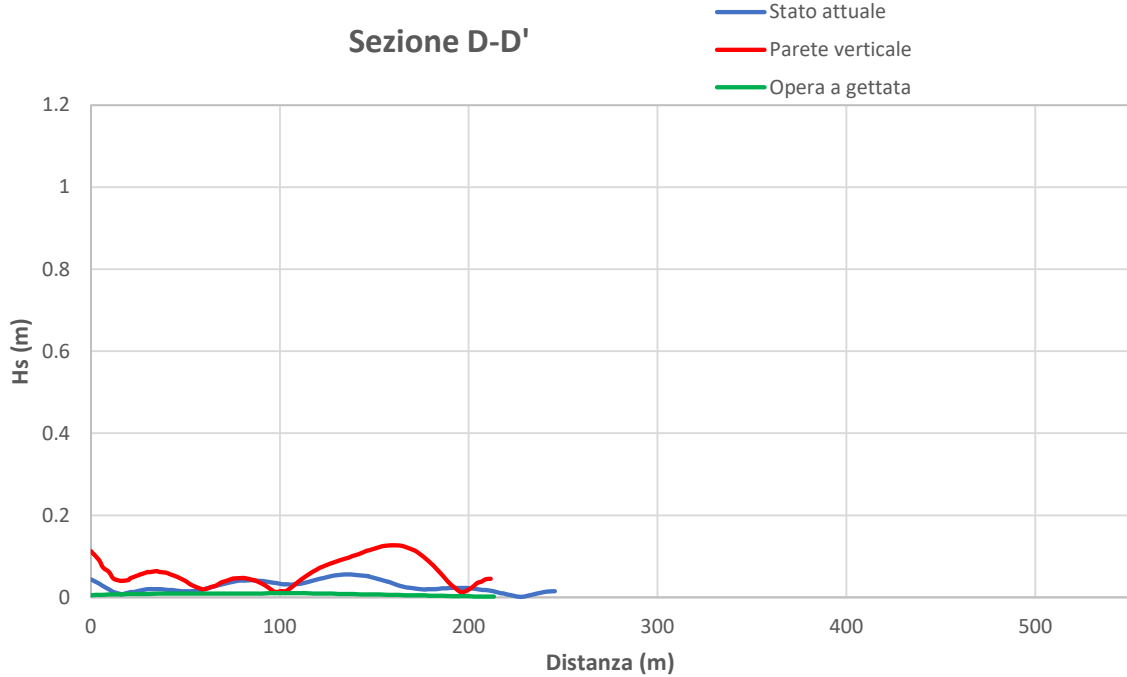
Sezione B-B'



Sezione C-C'

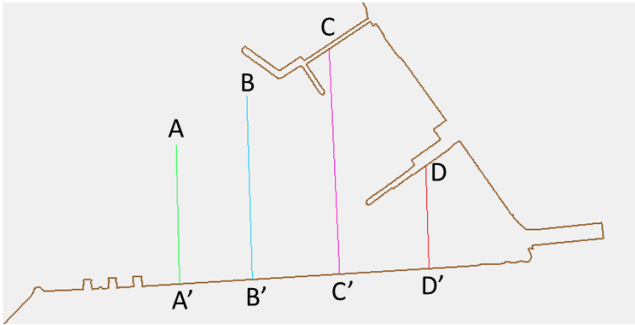


Sezione D-D'

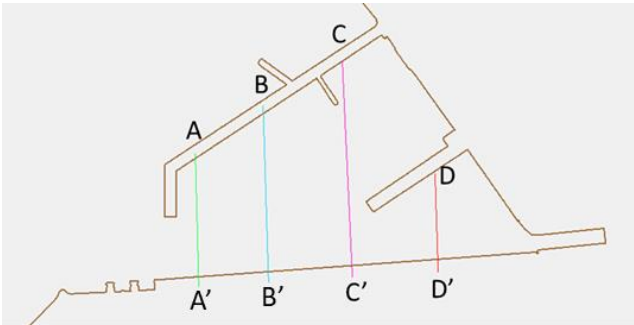


TAV_16: Confronto risultati sezioni interne al porto turistico
CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO 7:
TR= 2 anni
Dir=150°N Tp=8.0s Hs=3.0m

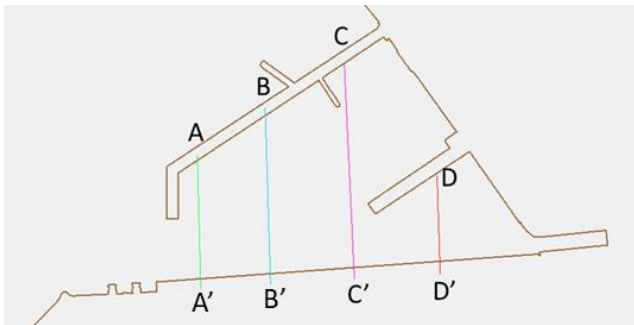
CONFIGURAZIONE A: STATO ATTUALE



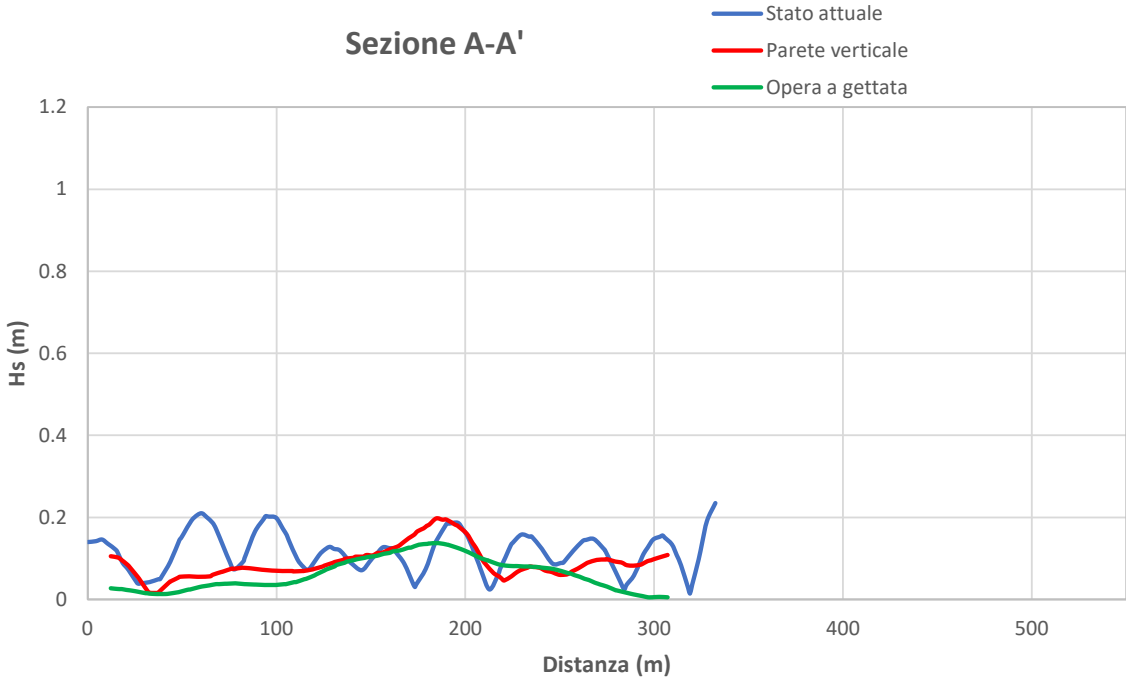
CONFIGURAZIONE B1: MOLO INTERNO RIFLETTENTE



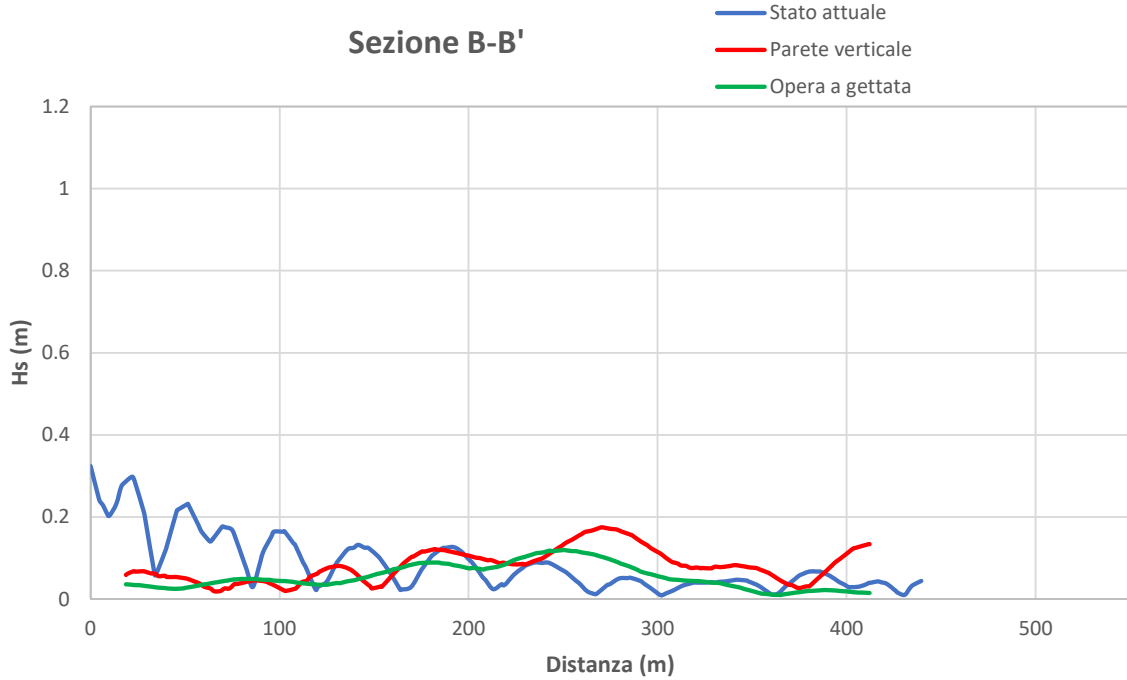
CONFIGURAZIONE B2: MOLO INTERNO ASSORBENTE



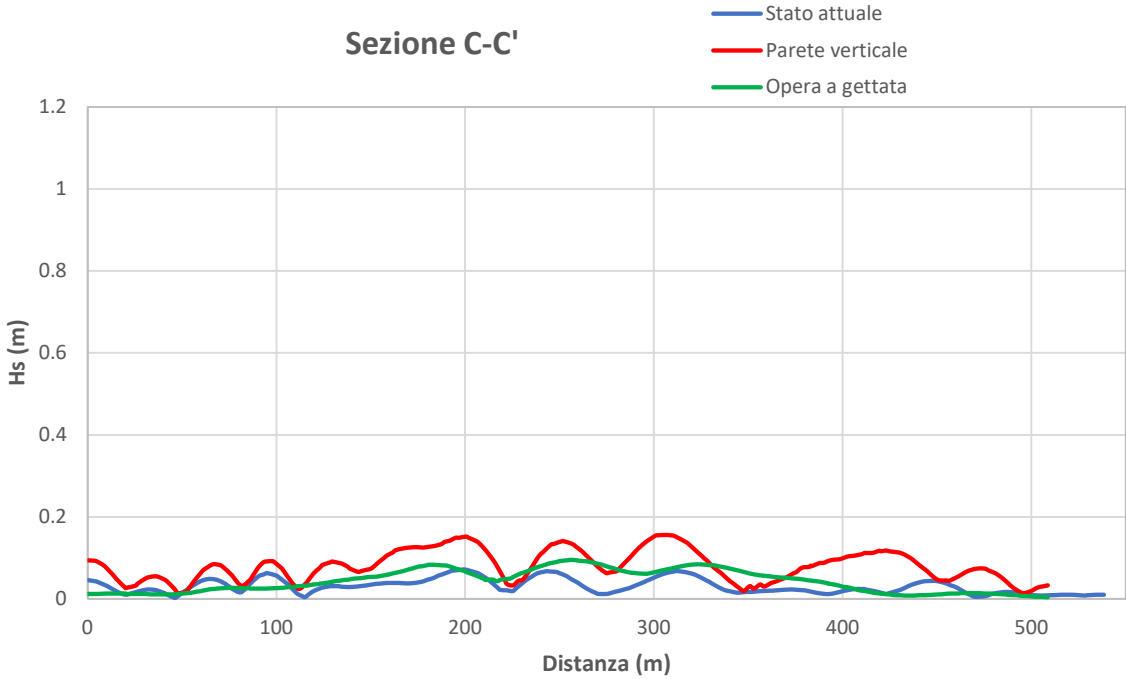
Sezione A-A'



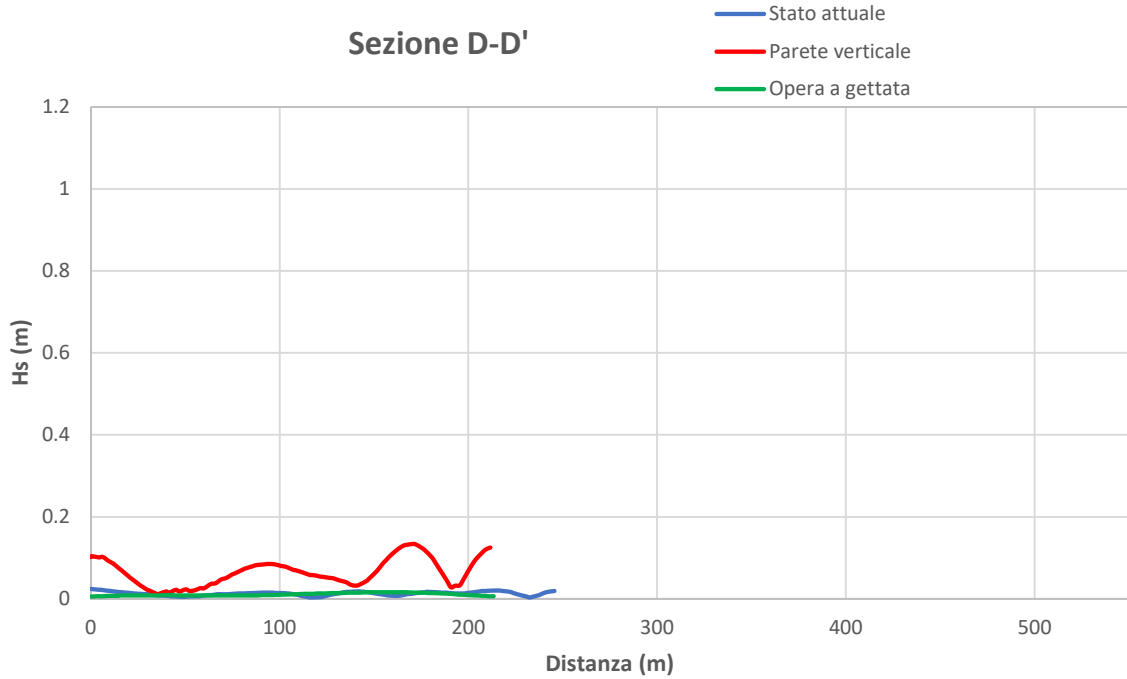
Sezione B-B'



Sezione C-C'

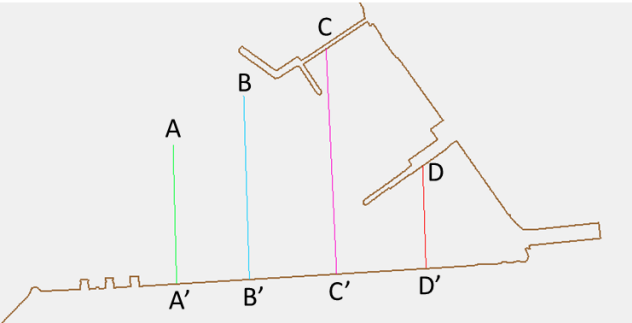


Sezione D-D'

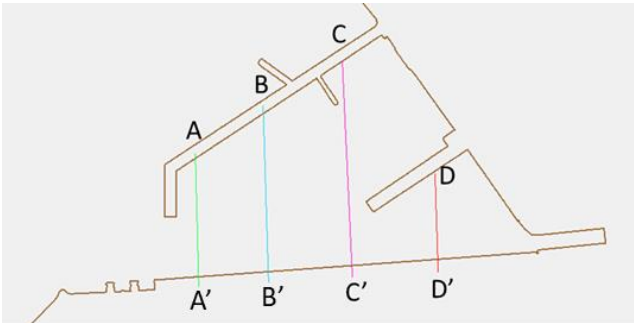


TAV_17: Confronto risultati sezioni interne al porto turistico
CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO 8:
TR= 20 anni
Dir=150°N Tp=9.0s Hs=4.2m

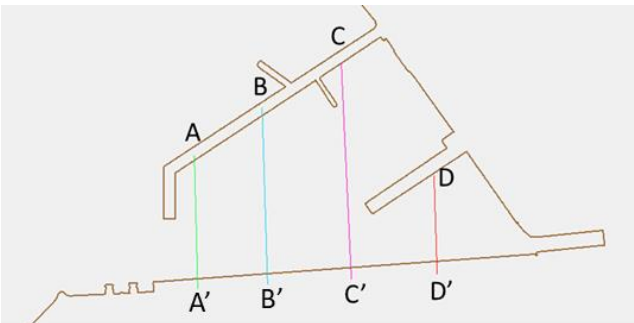
CONFIGURAZIONE A: STATO ATTUALE



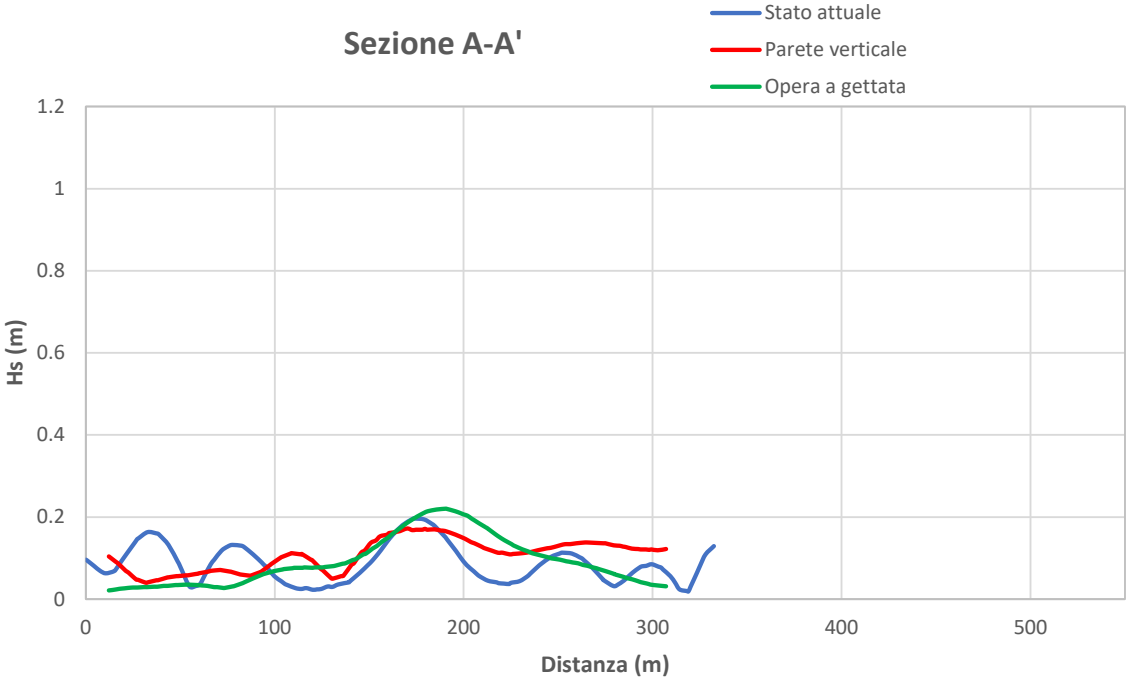
CONFIGURAZIONE B1: MOLO INTERNO RIFLETTENTE



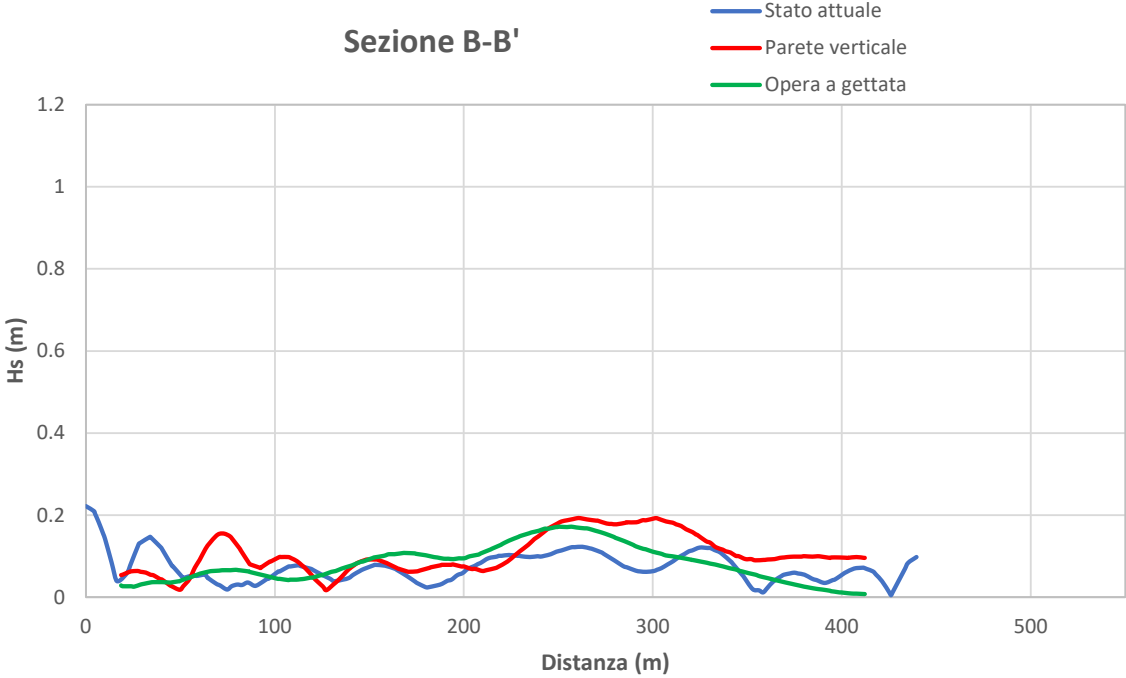
CONFIGURAZIONE B2: MOLO INTERNO ASSORBENTE



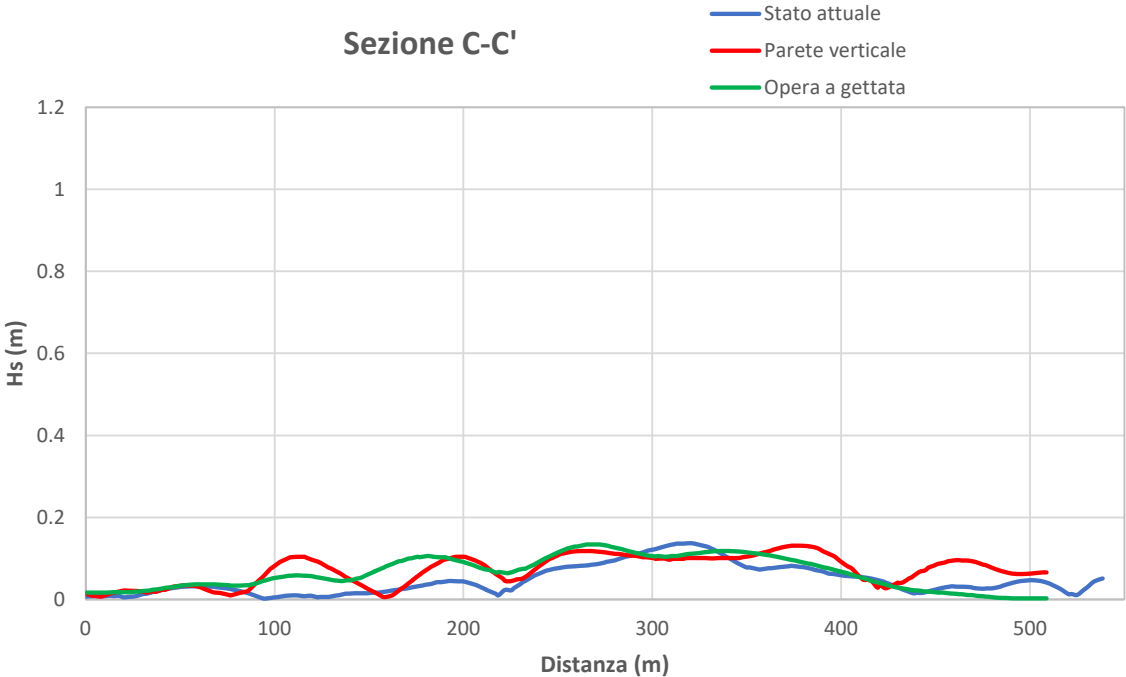
Sezione A-A'



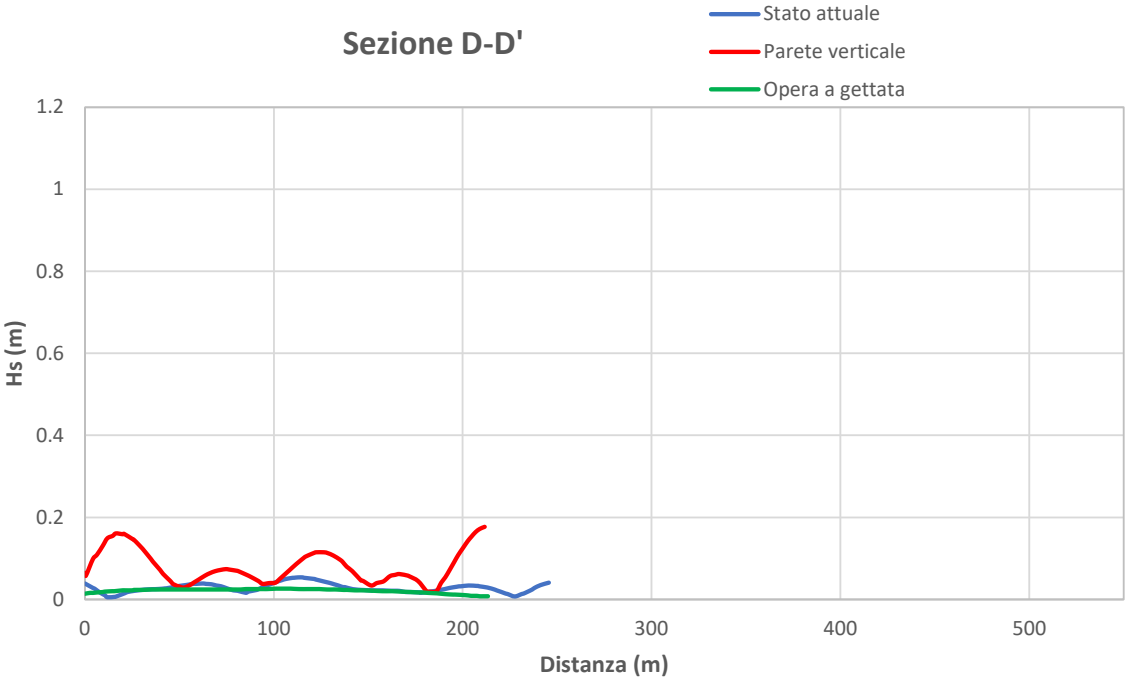
Sezione B-B'



Sezione C-C'

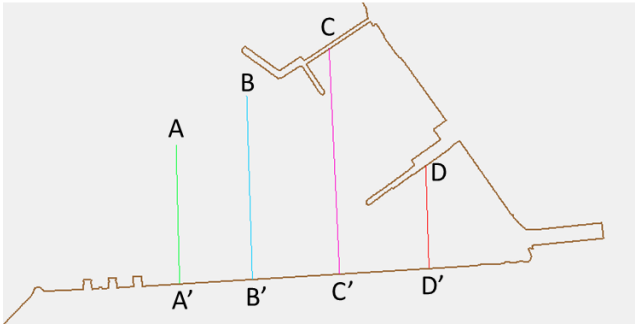


Sezione D-D'

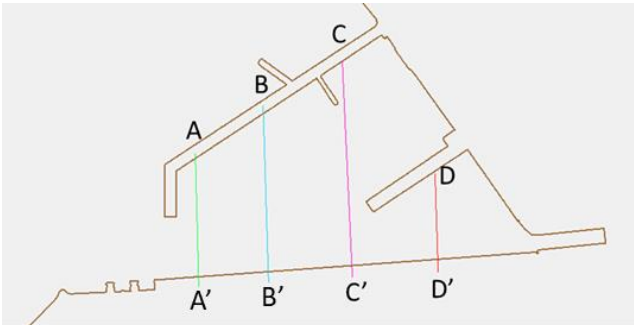


TAV_18: Confronto risultati sezioni interne al porto turistico
CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO 9:
TR= 50 anni
Dir=150°N Tp=9.5s Hs=4.8m

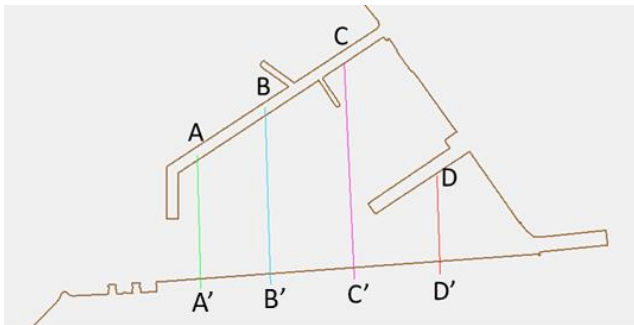
CONFIGURAZIONE A: STATO ATTUALE



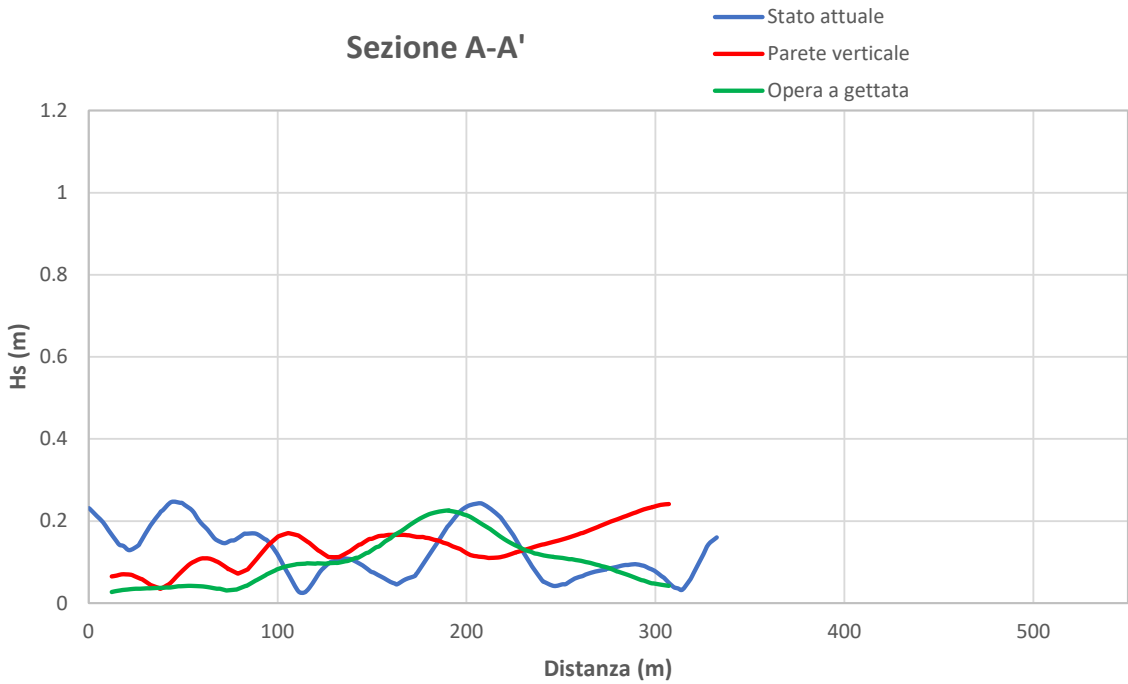
CONFIGURAZIONE B1: MOLO INTERNO RIFLETTENTE



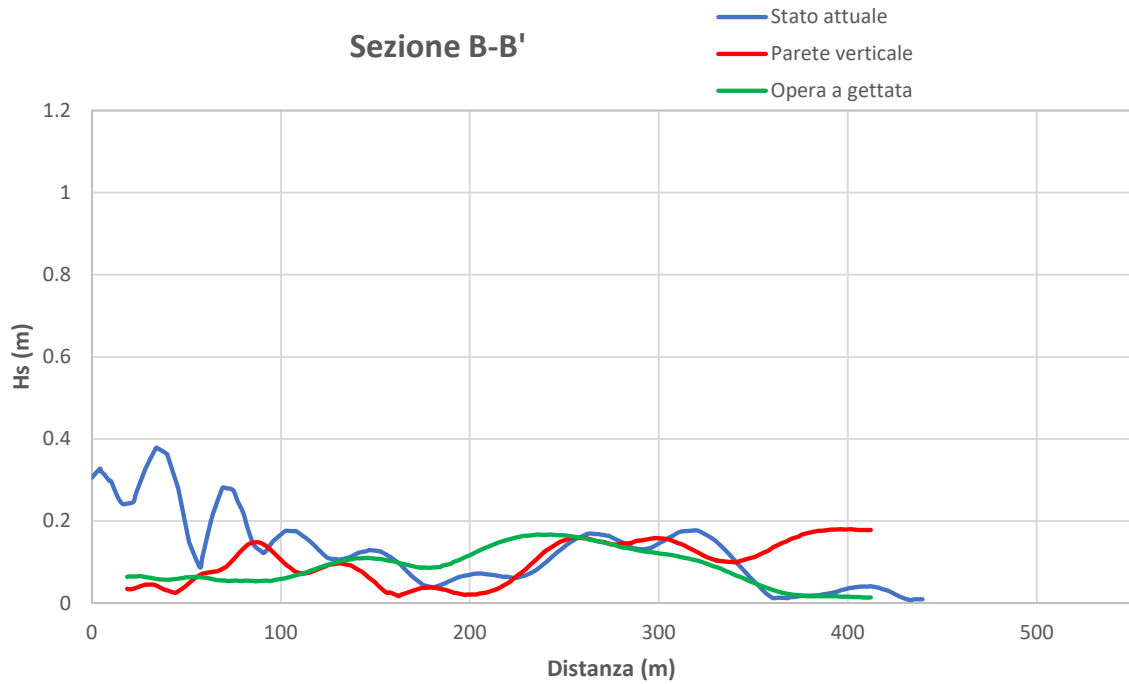
CONFIGURAZIONE B2: MOLO INTERNO ASSORBENTE



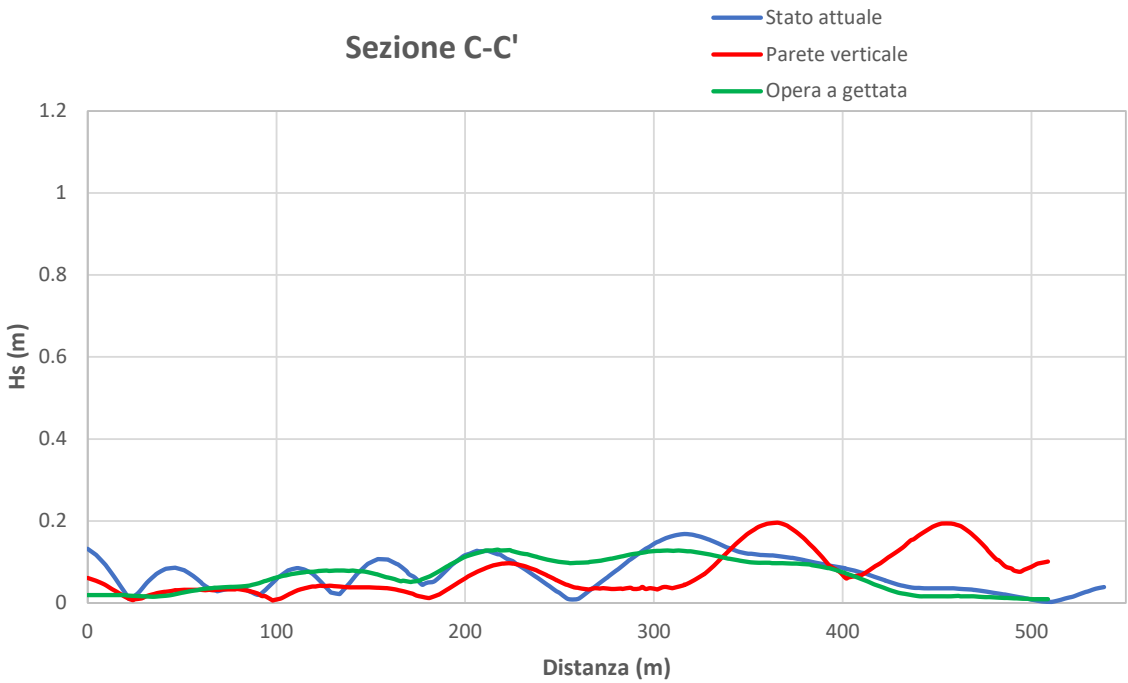
Sezione A-A'



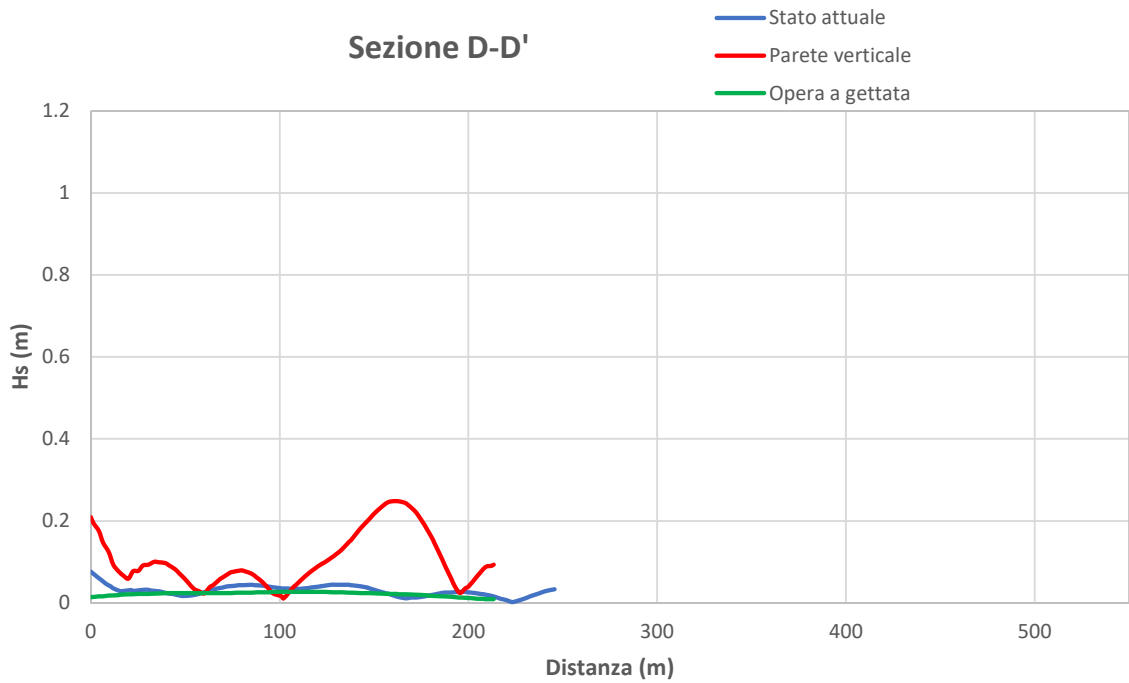
Sezione B-B'



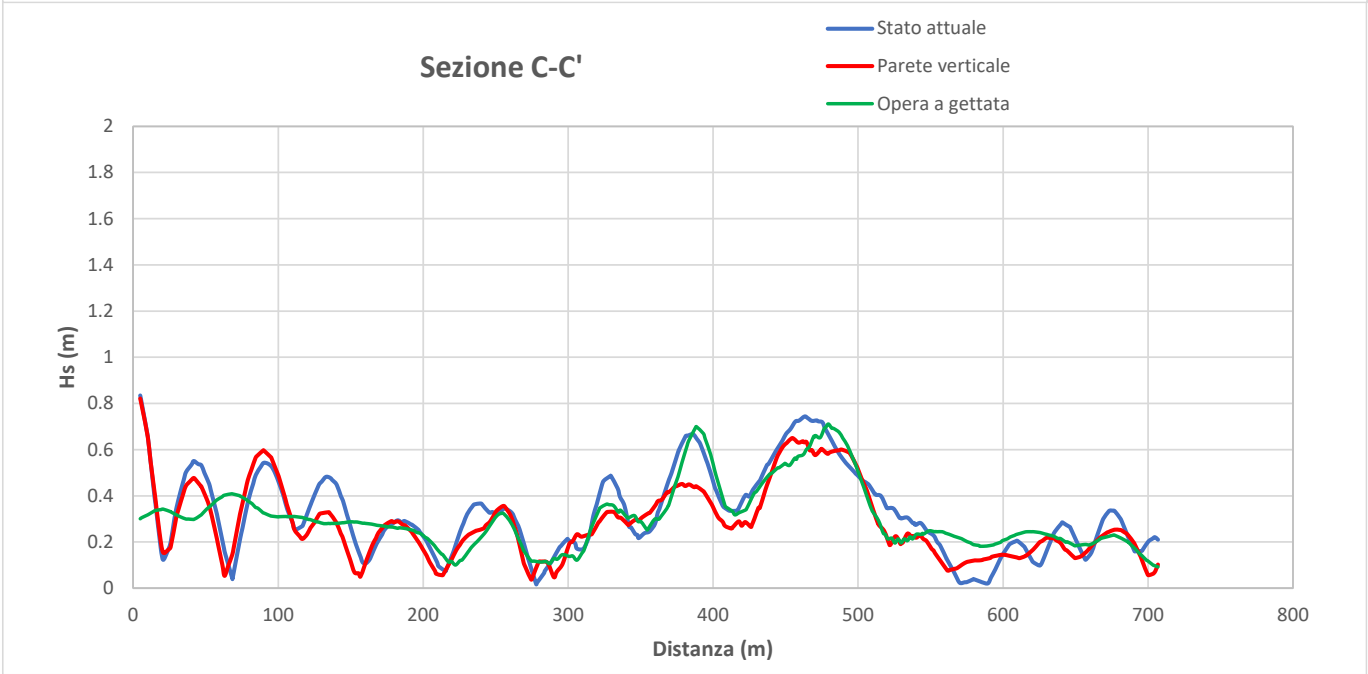
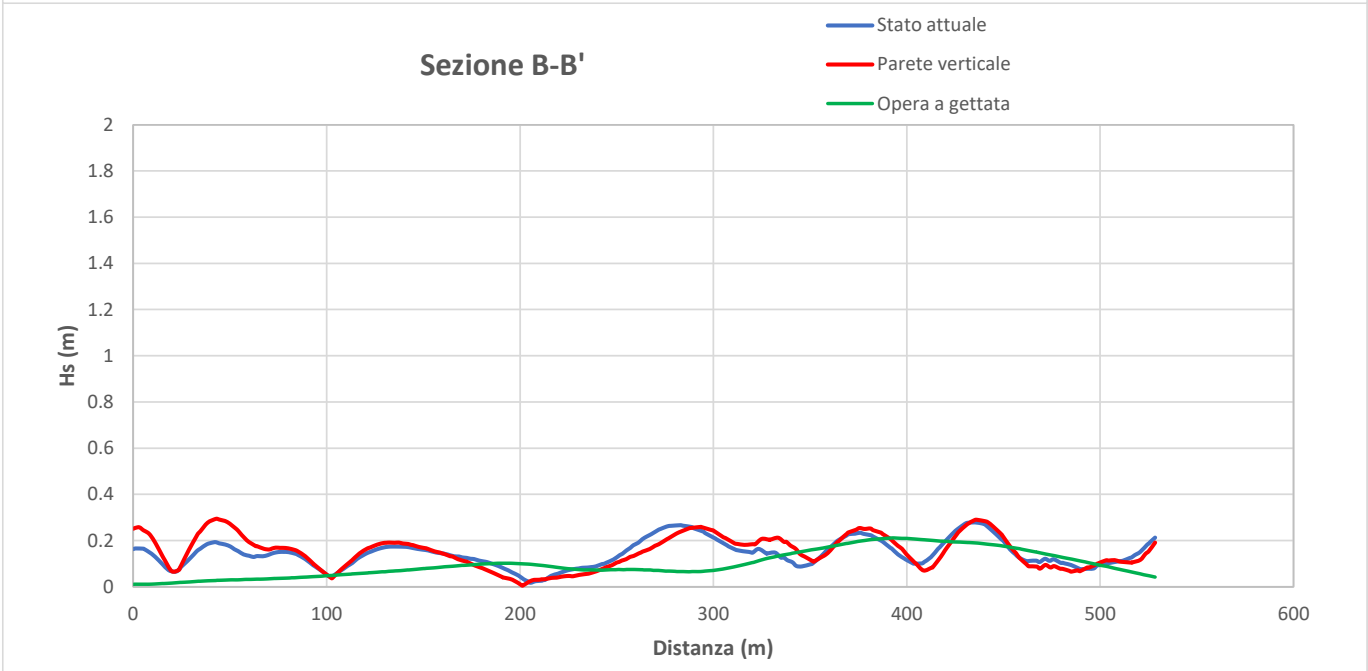
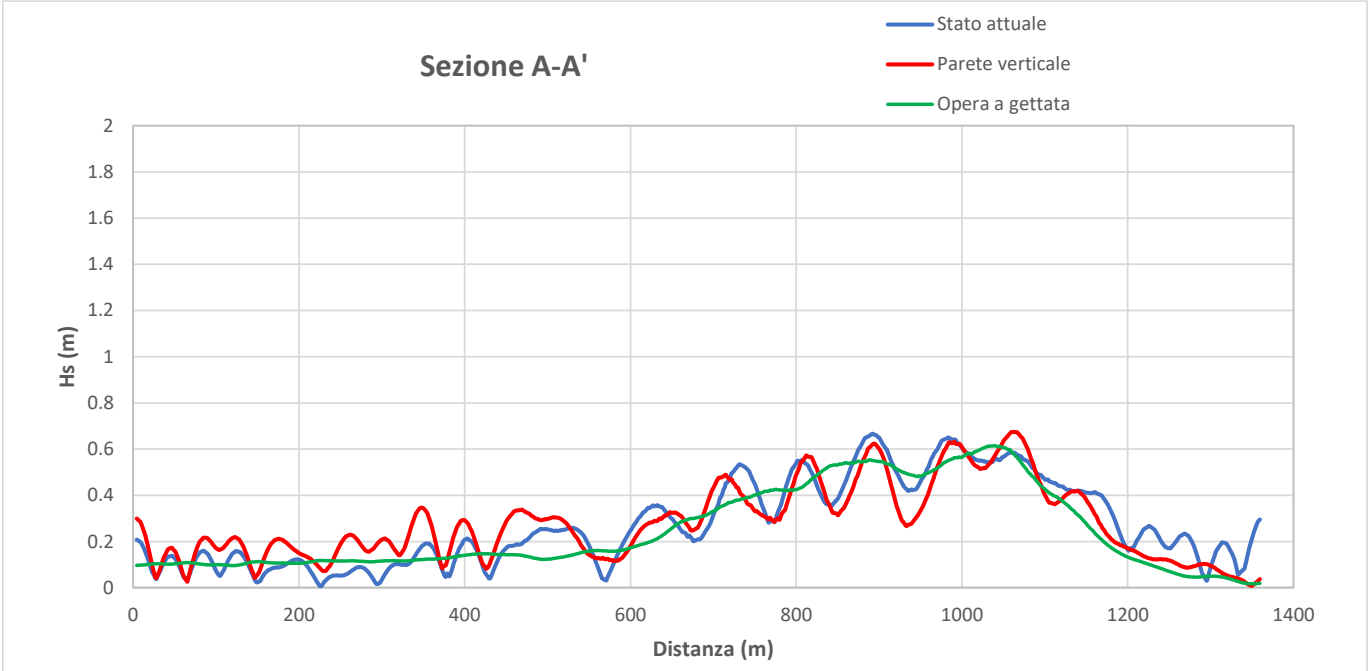
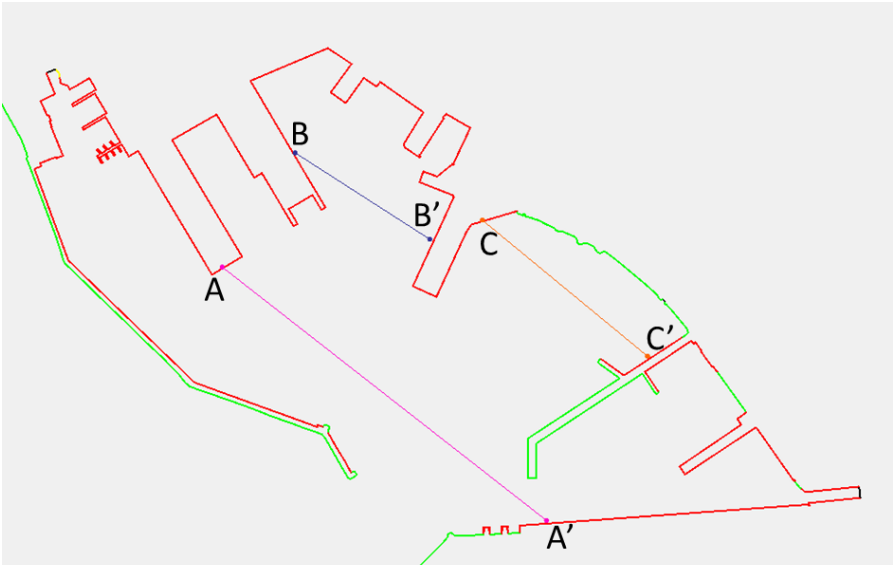
Sezione C-C'



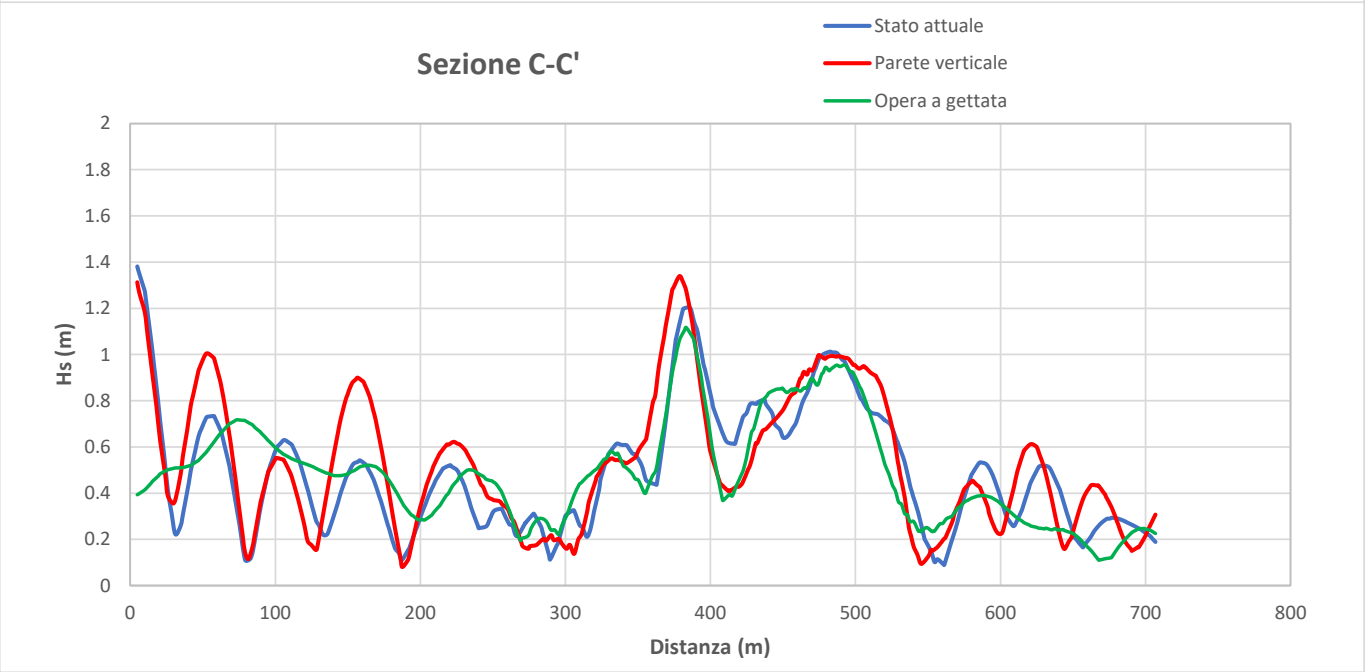
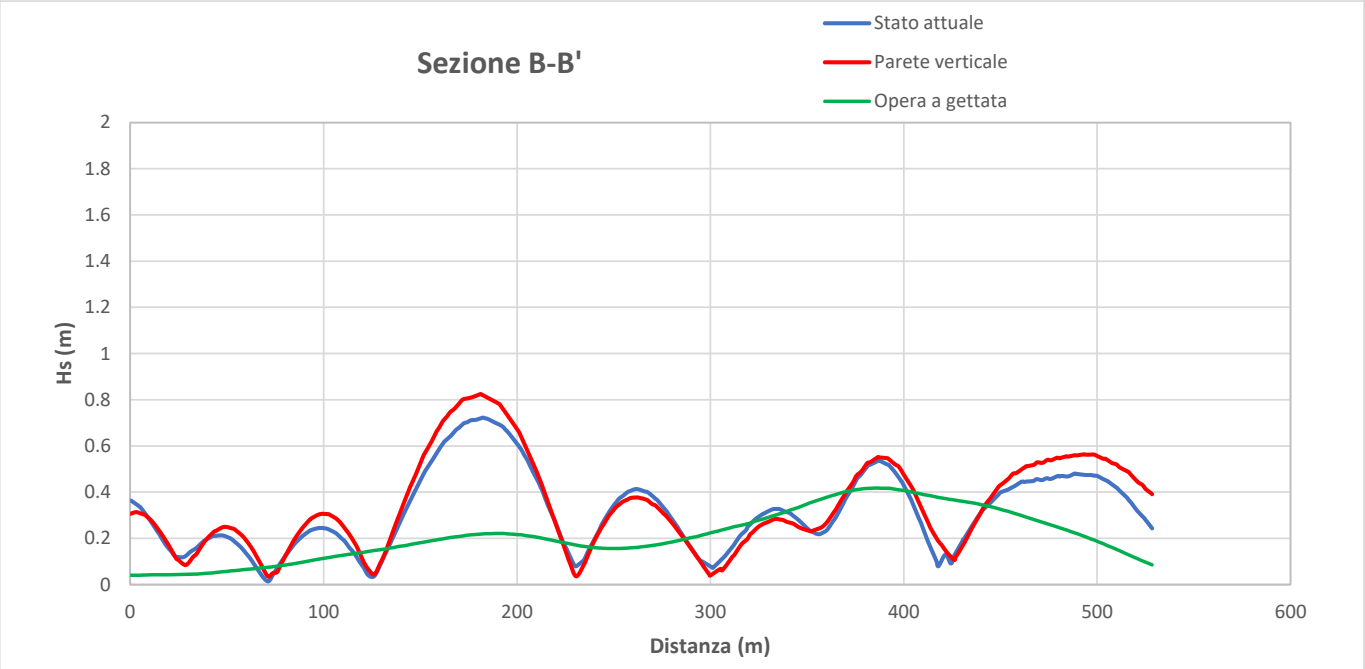
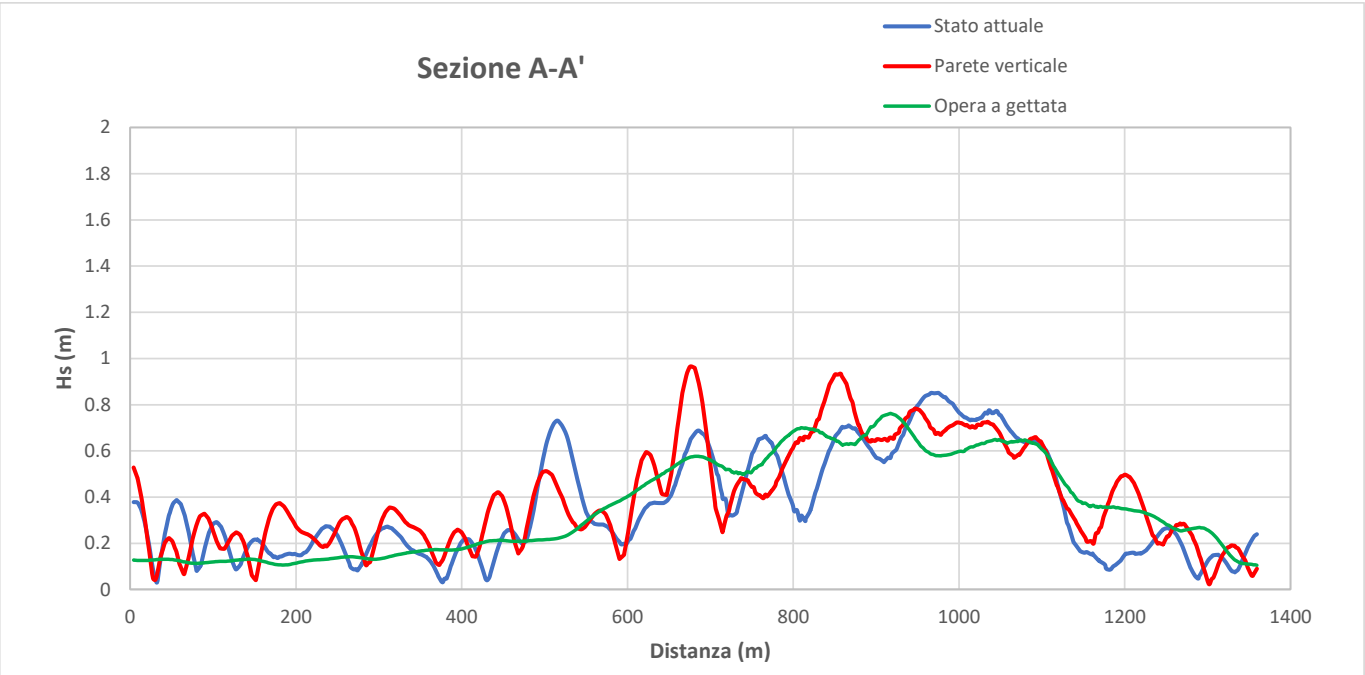
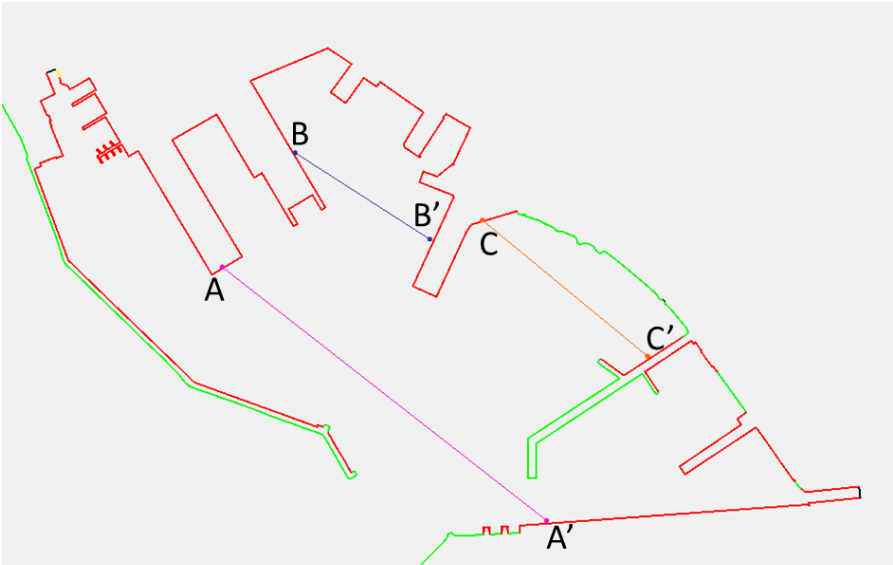
Sezione D-D'



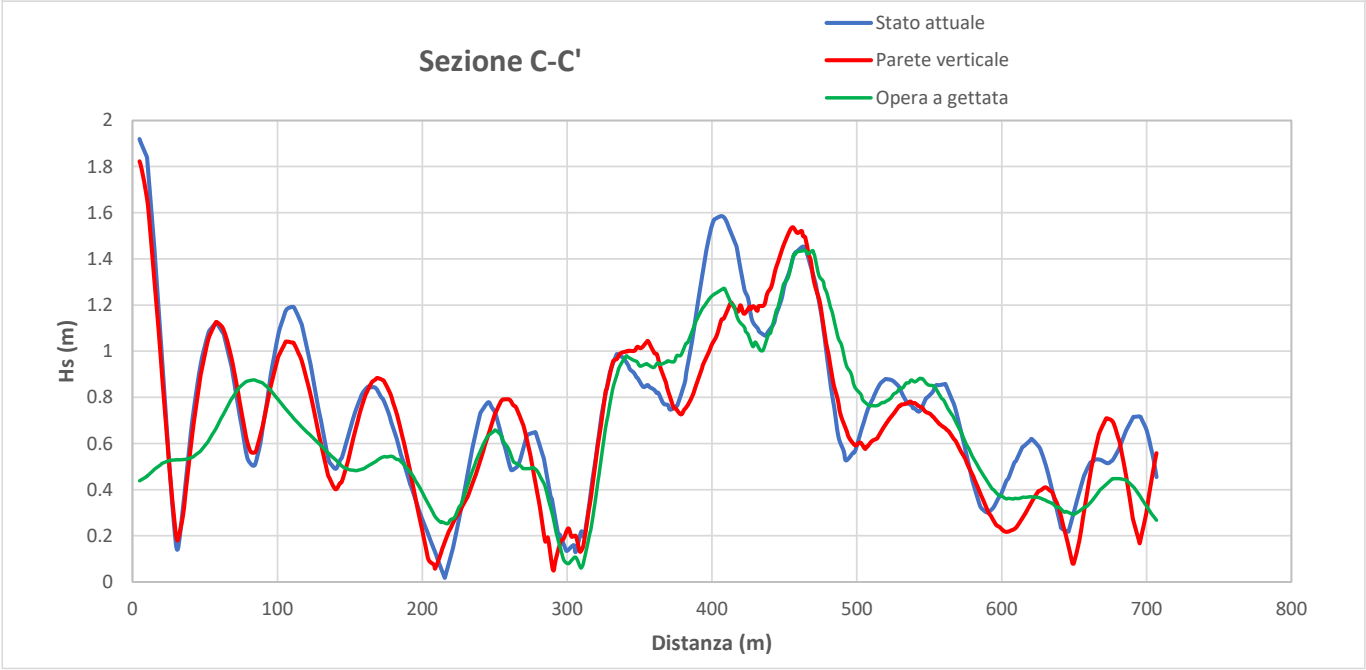
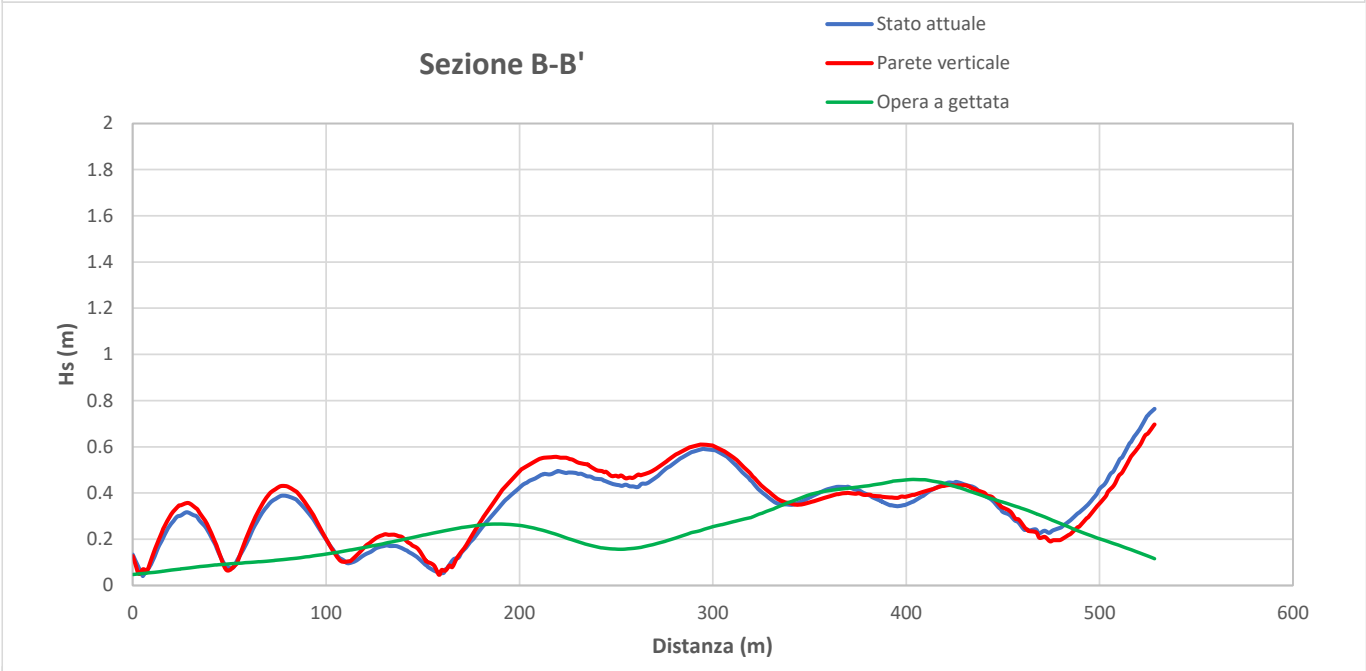
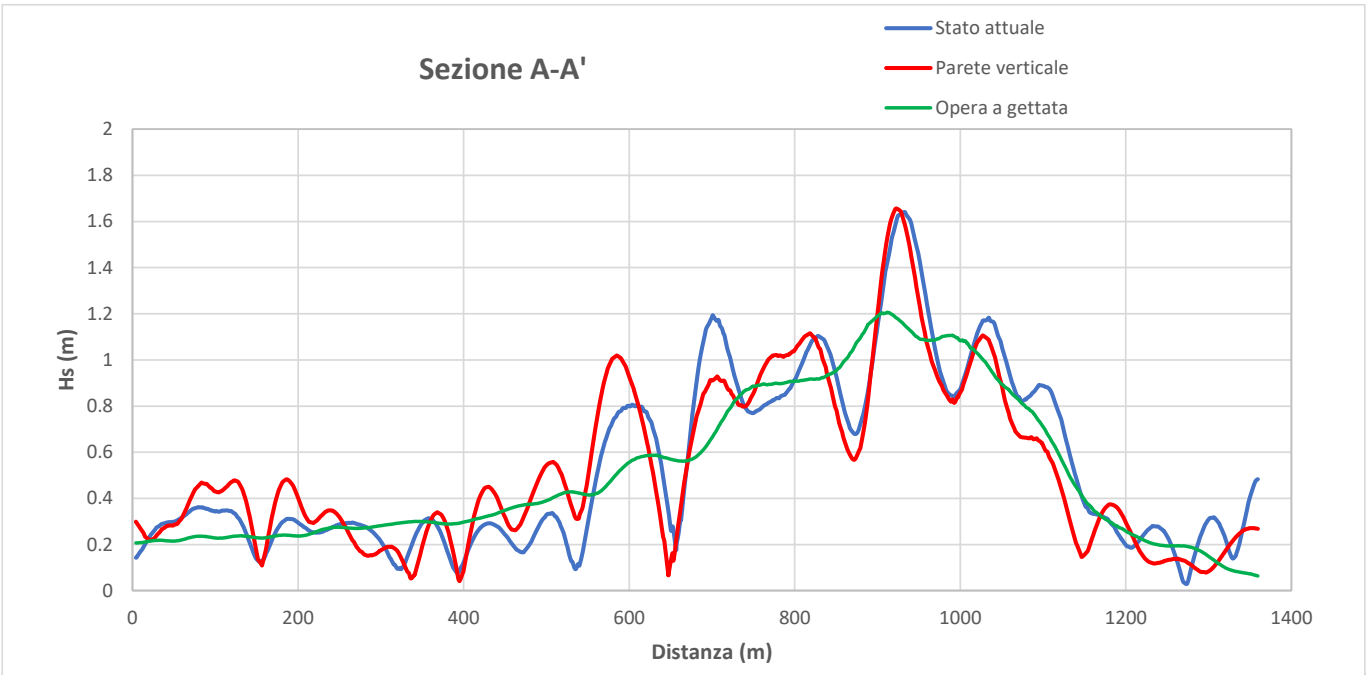
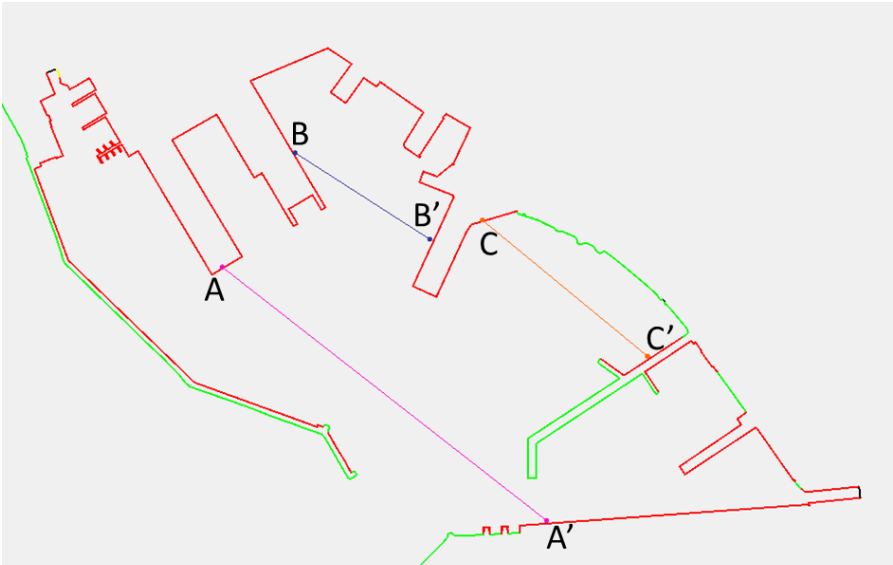
TAV_19: Confronto risultati sezioni esterne al porto turistico
CONDIZIONI DI MOTO ONDOSI 1:
TR= 2 anni
Dir=180°N Tp=8.0s Hs=3.0m



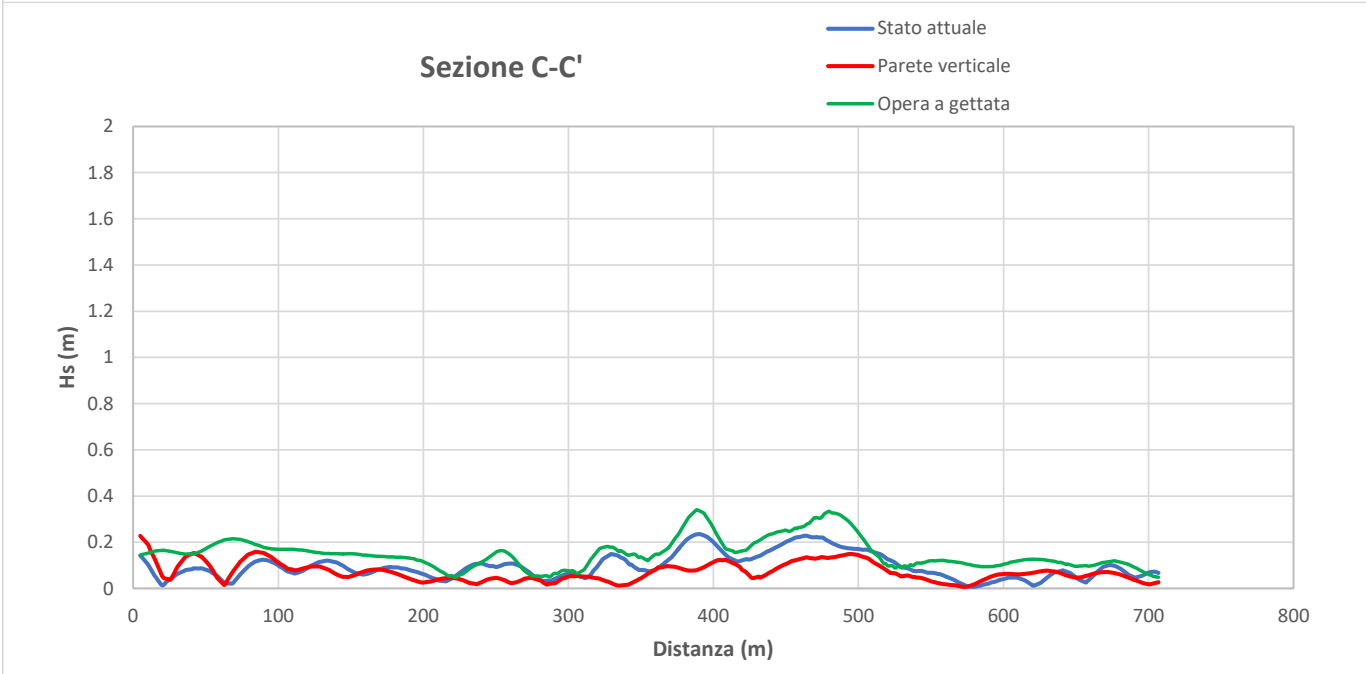
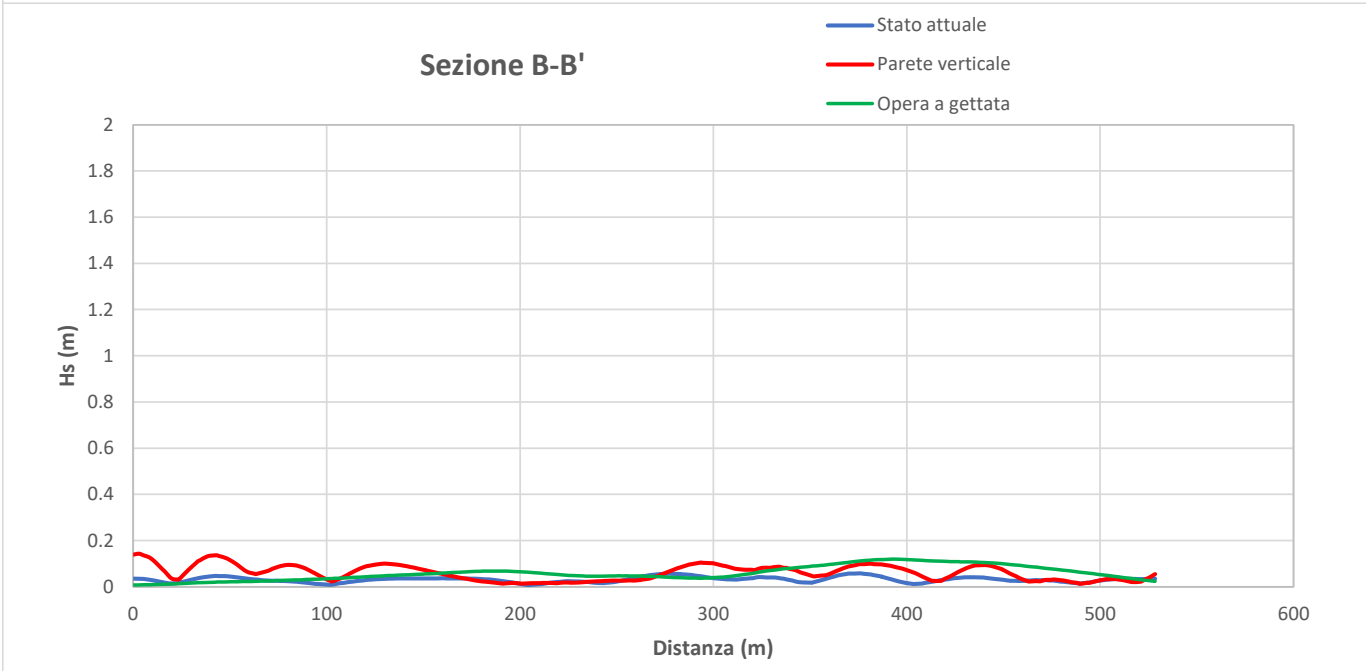
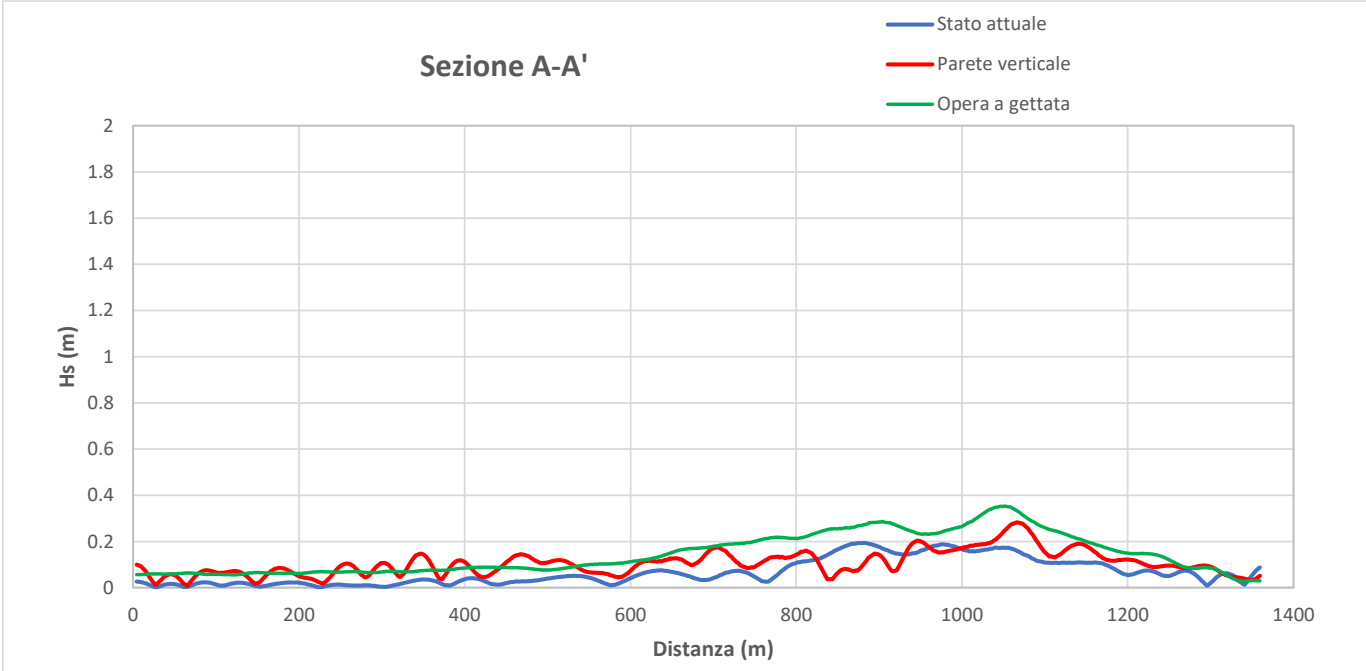
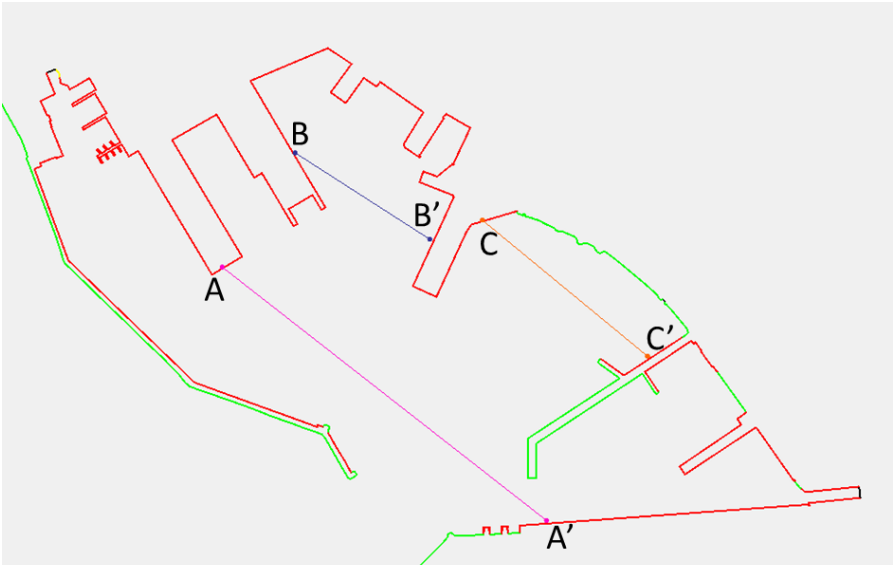
TAV_20: Confronto risultati sezioni esterne al porto turistico
CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO 2:
TR= 20 anni
Dir=180°N Tp=9.0s Hs=4.2m



TAV_21: Confronto risultati sezioni esterne al porto turistico
CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO 3:
TR= 50 anni
Dir=180°N Tp=9.5s Hs=4.8m



TAV_22: Confronto risultati sezioni esterne al porto turistico
CONDIZIONI DI MOTO ONDOSI 4:
TR= 2 anni
Dir=165°N Tp=8.0s Hs=3.0m

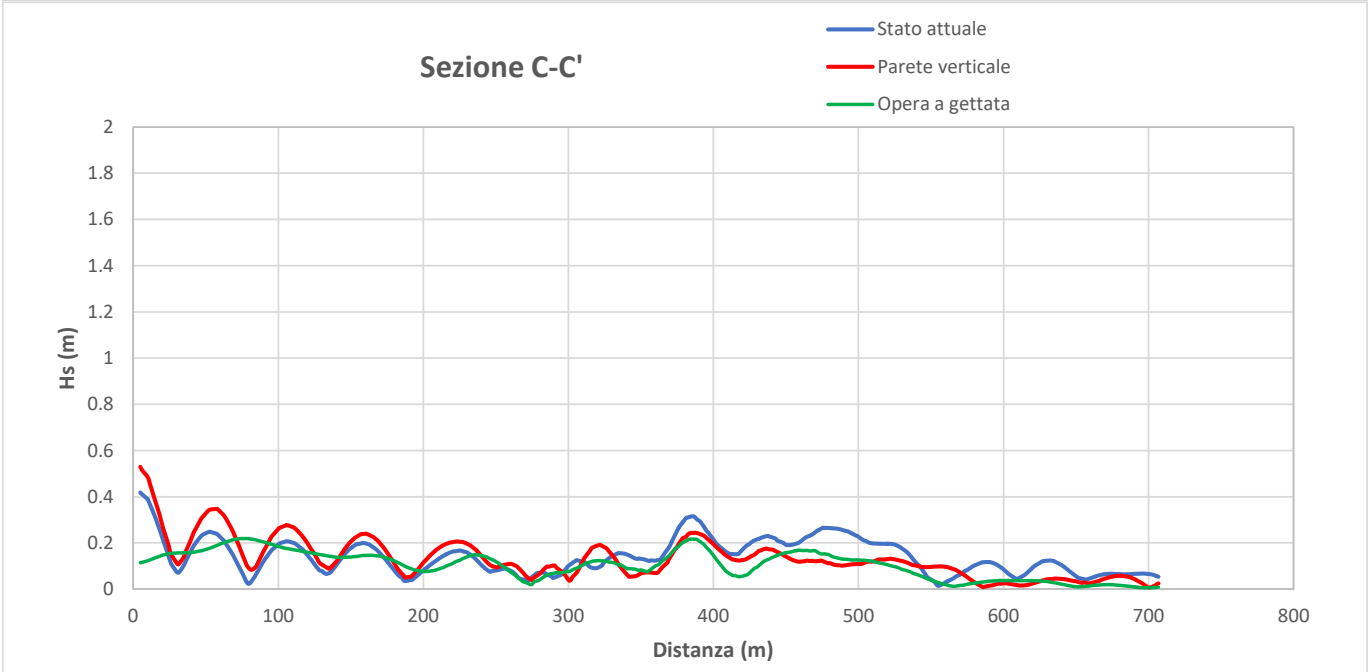
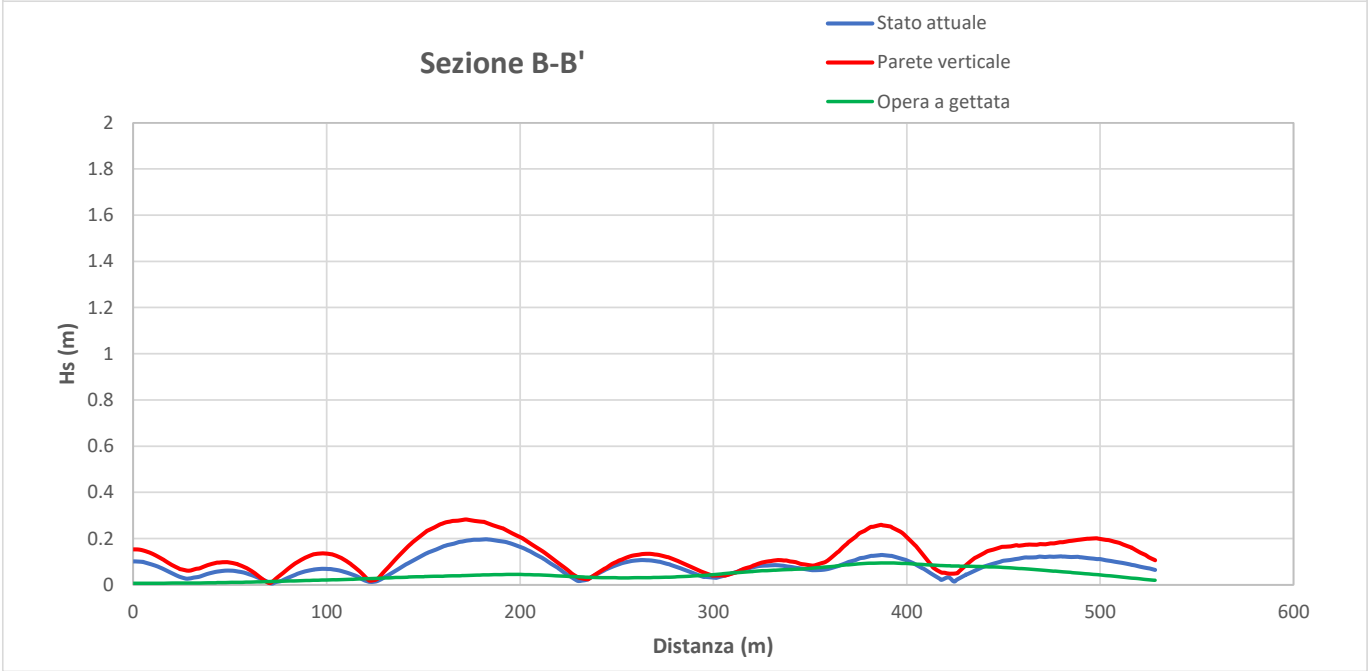
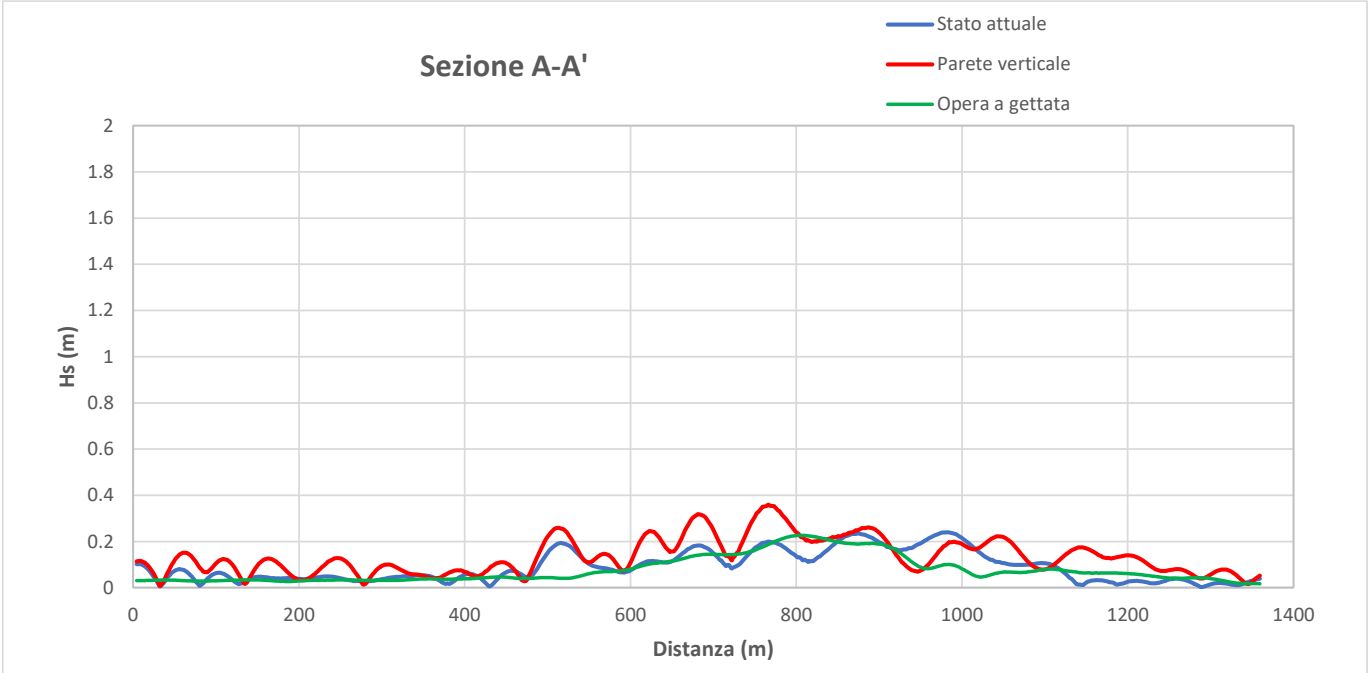
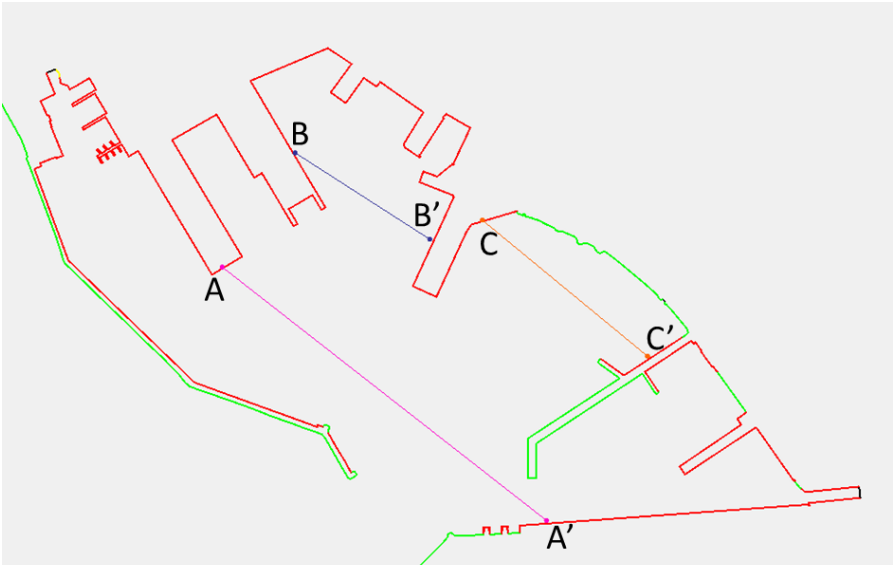


TAV_23: Confronto risultati sezioni esterne al porto turistico

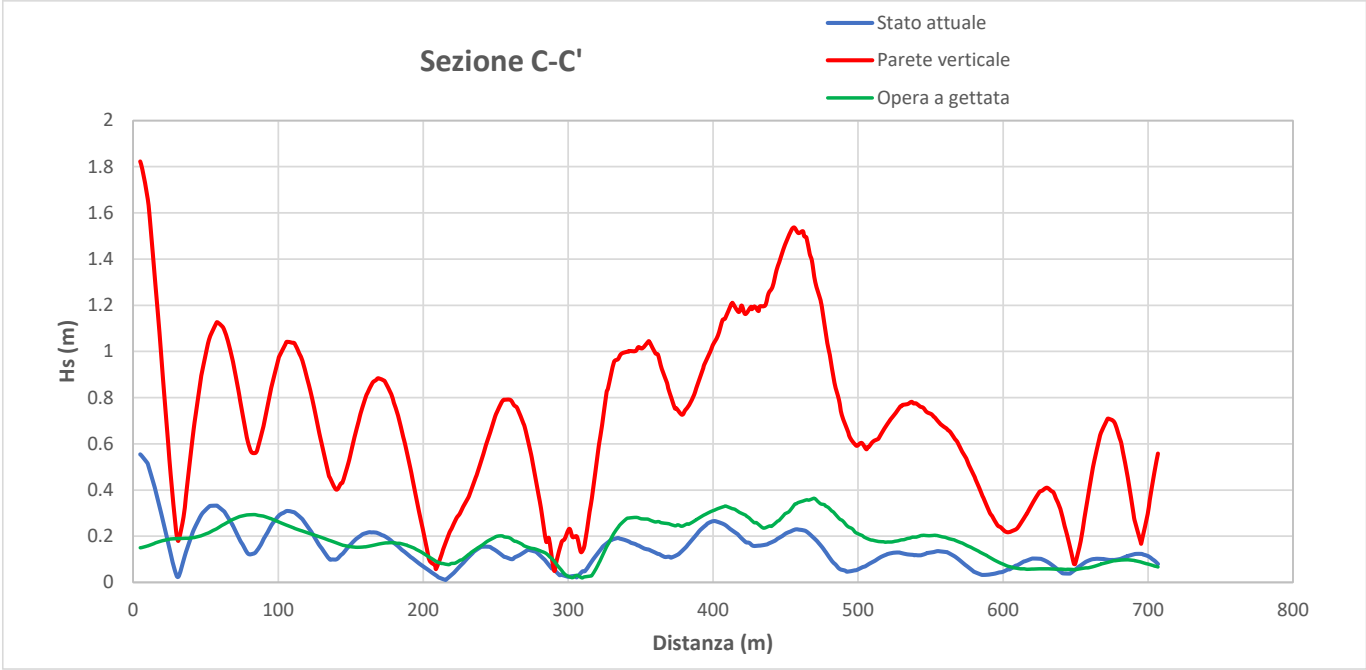
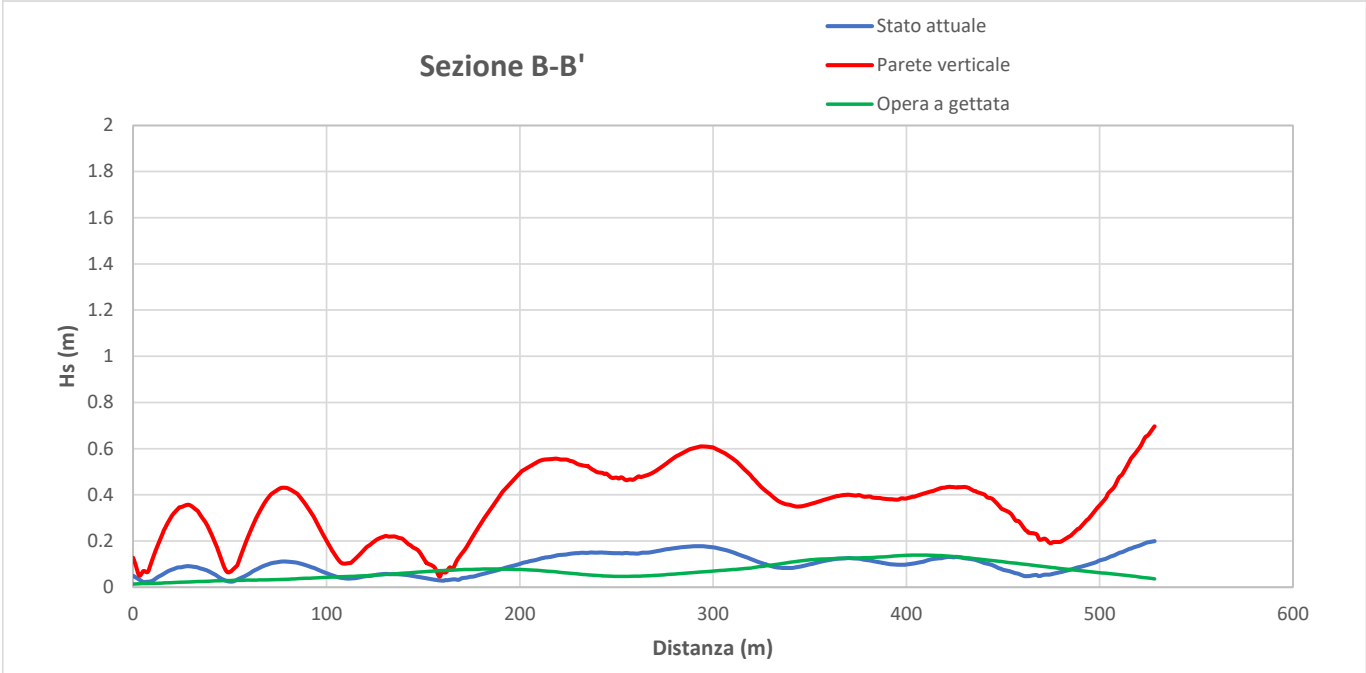
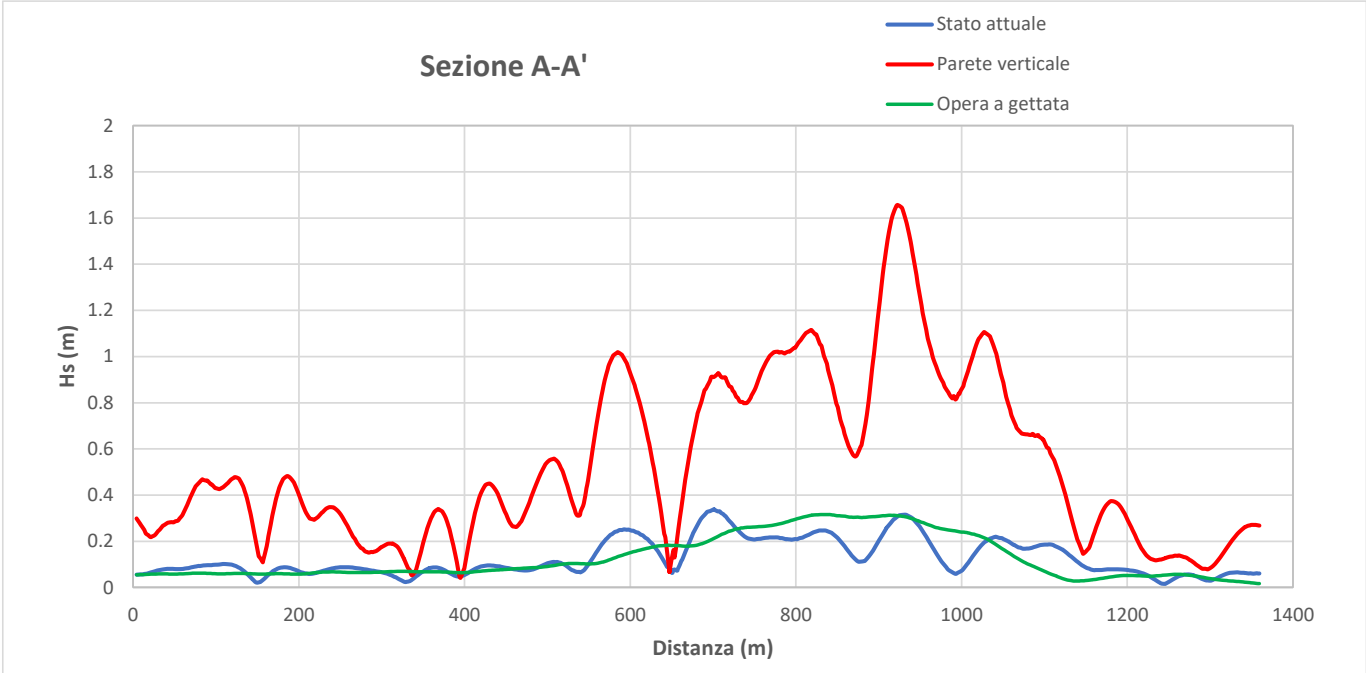
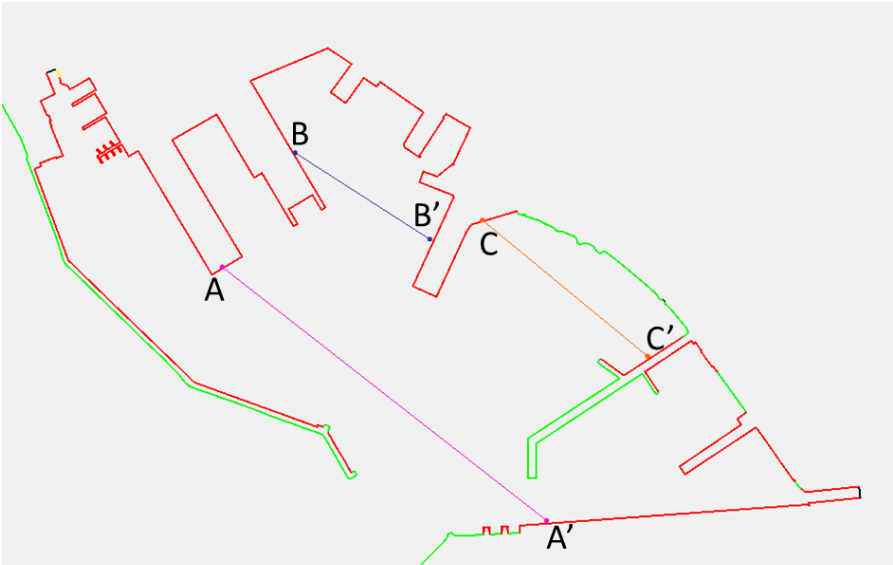
CONDIZIONI DI MOTO ONDOSI 5:

TR= 20 anni

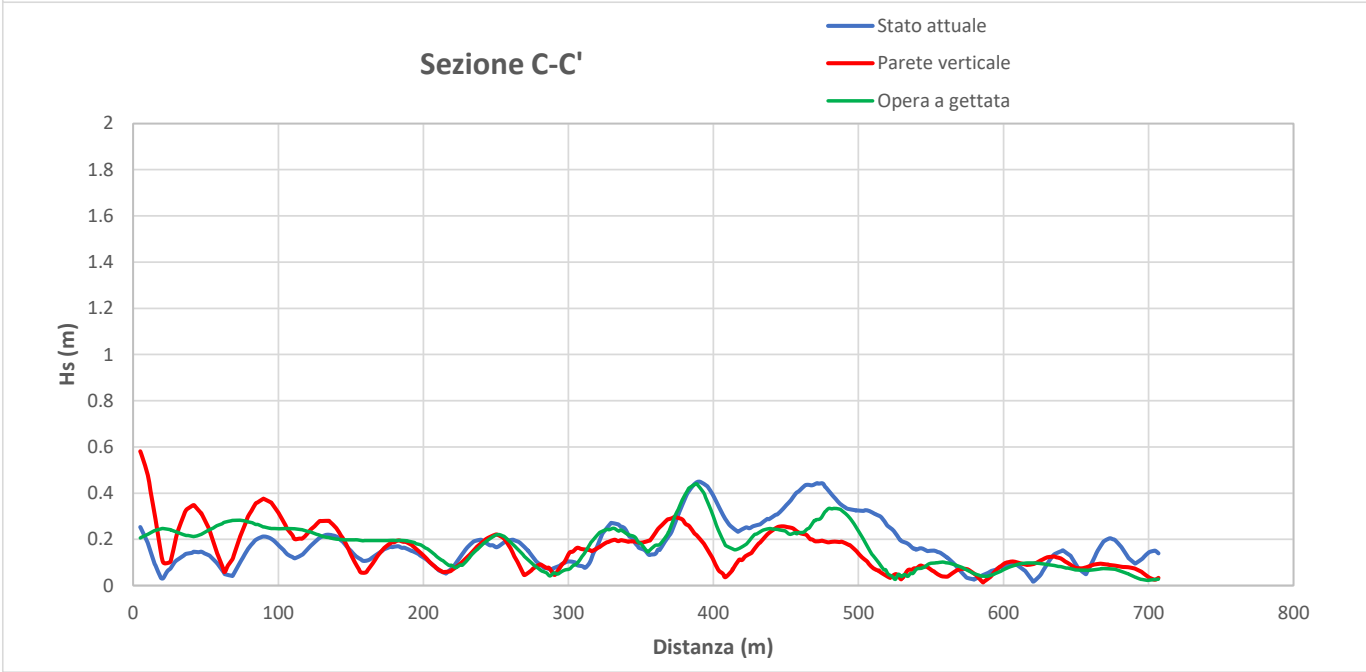
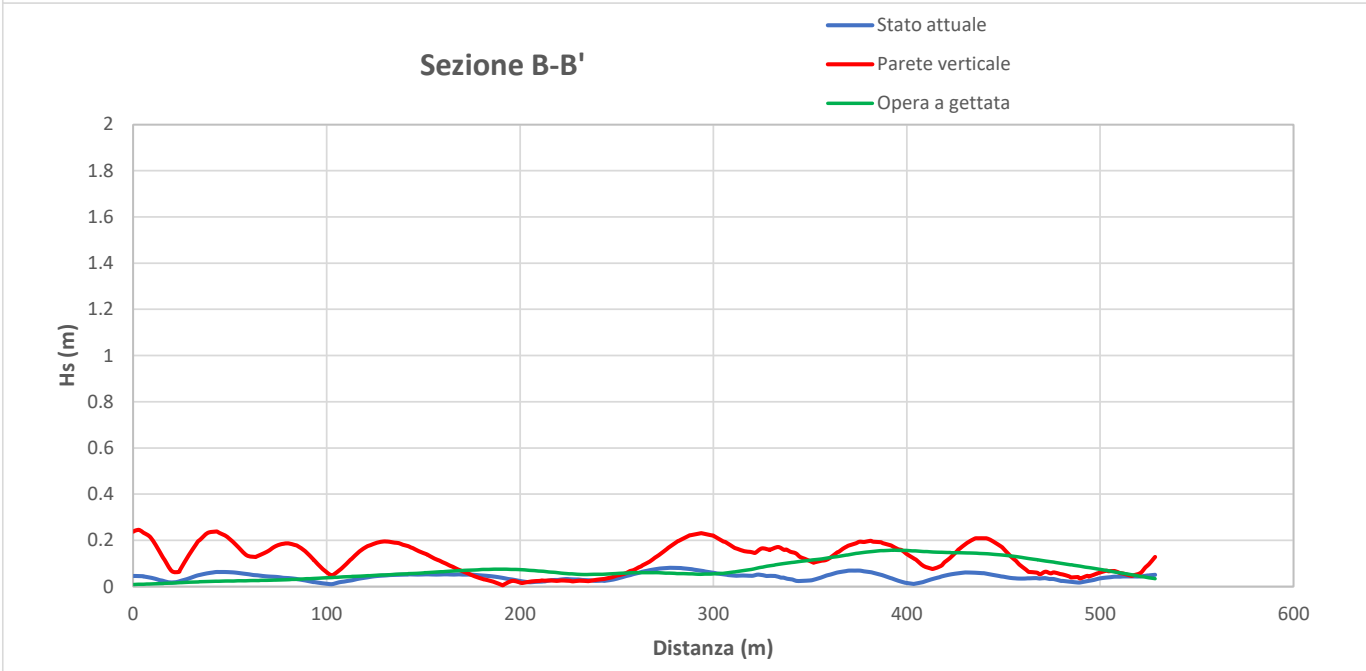
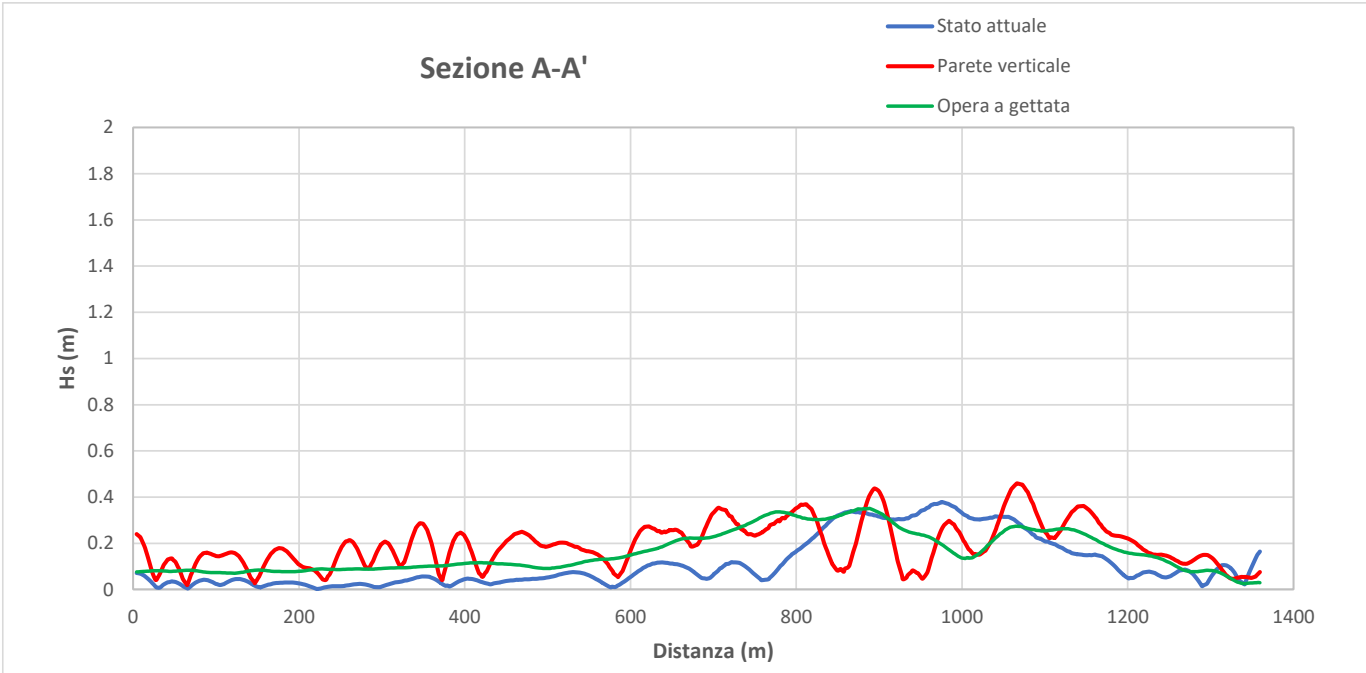
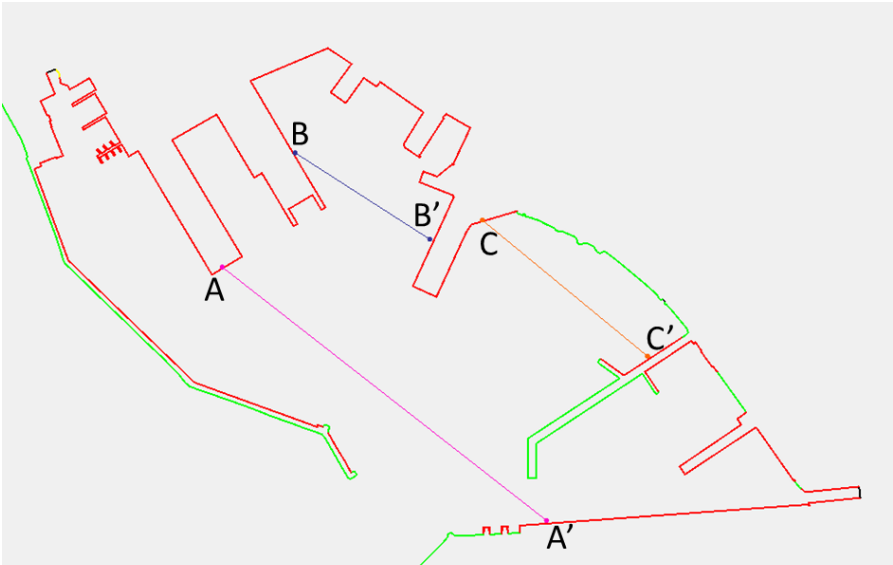
Dir=165°N Tp=9.0s Hs=4.2m



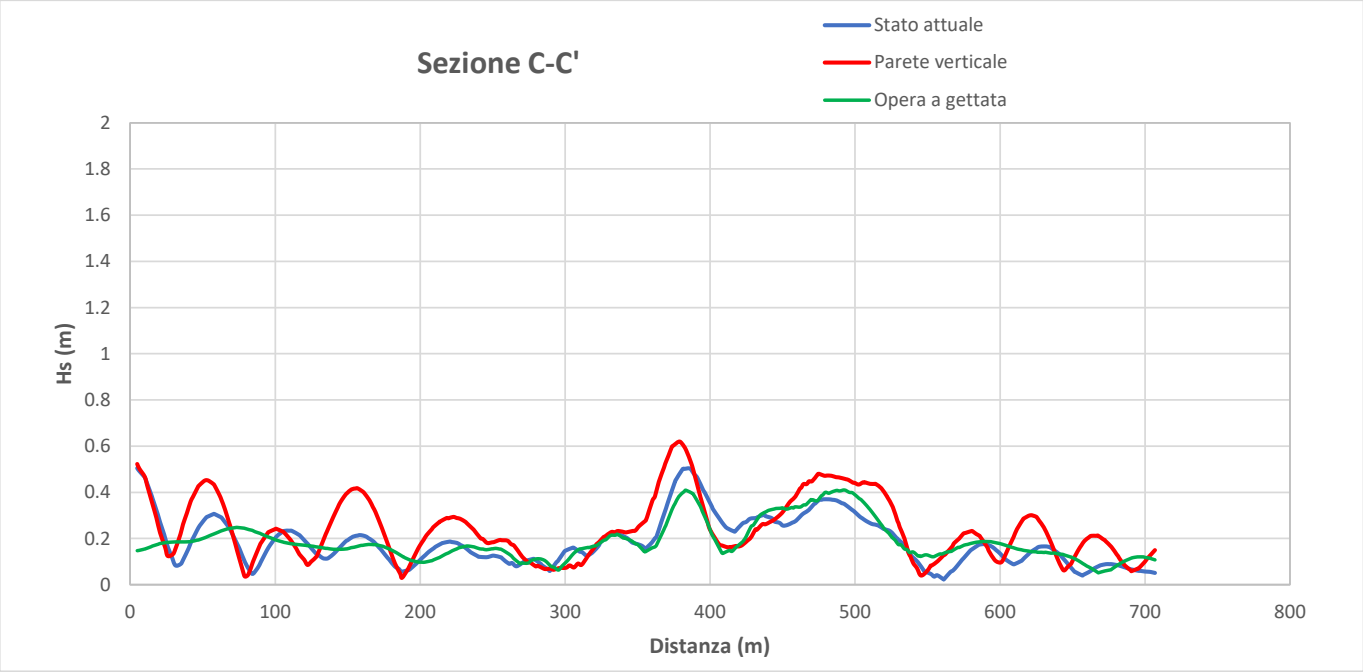
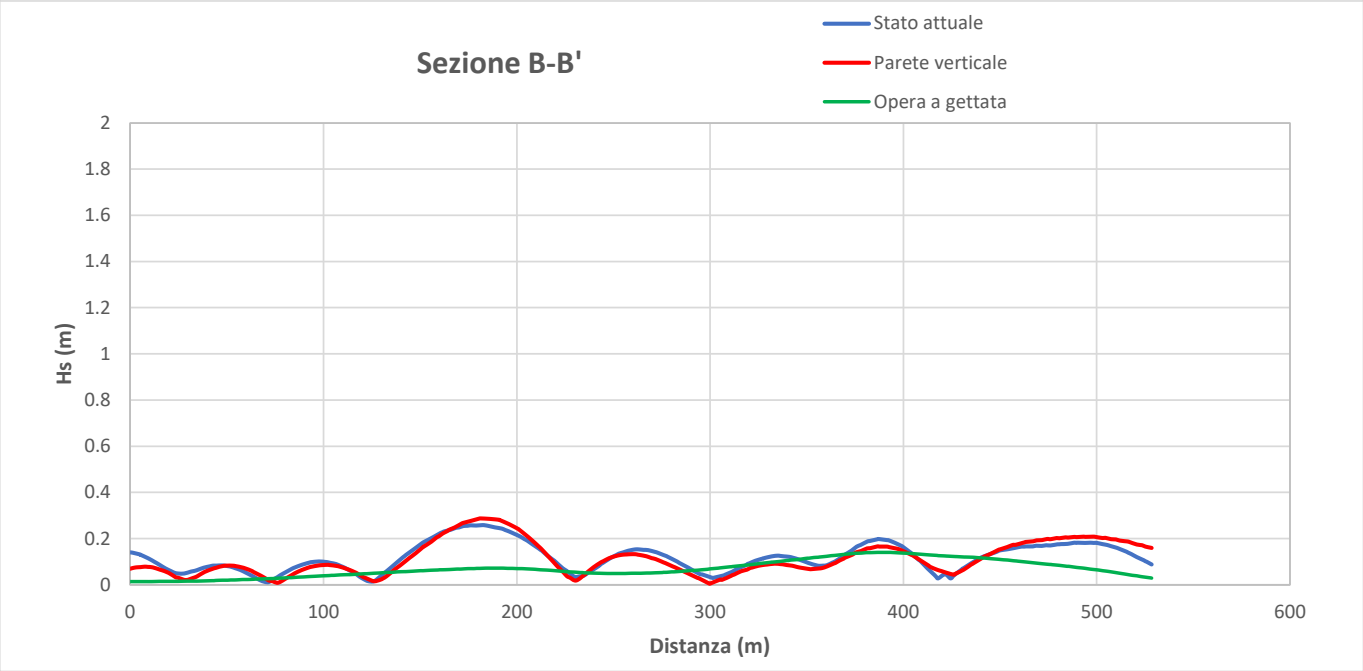
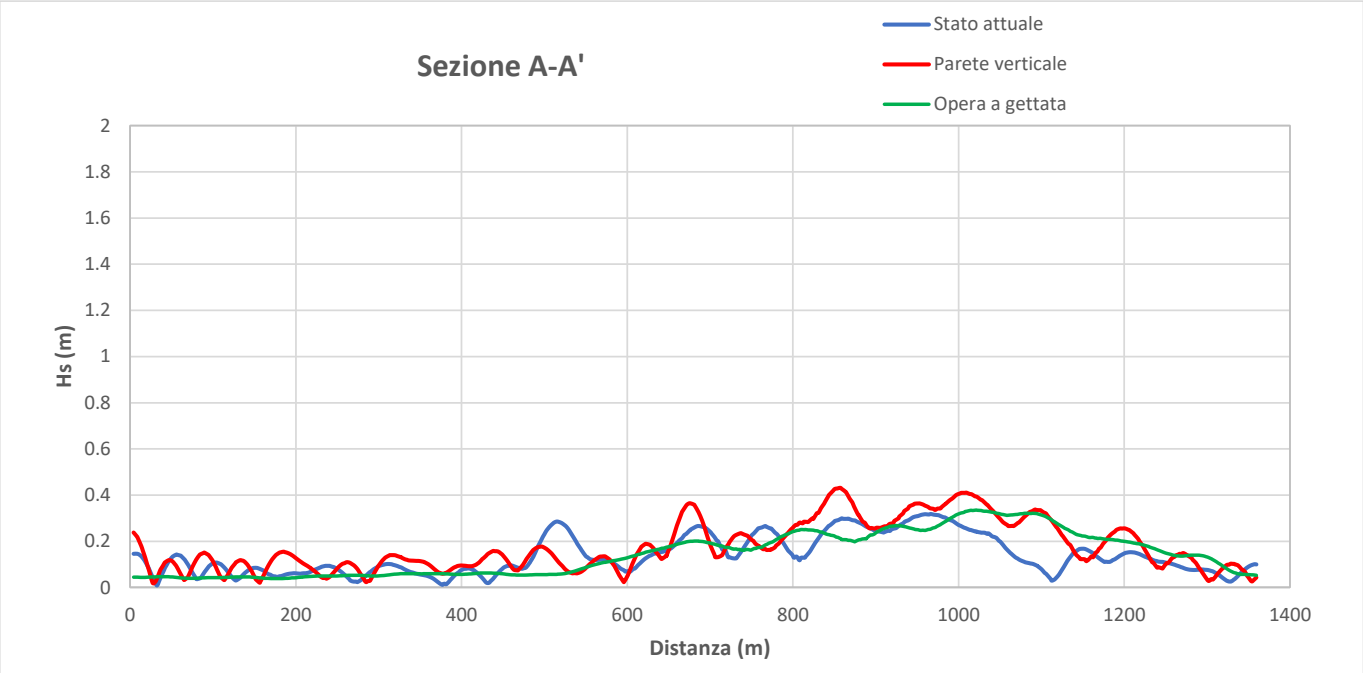
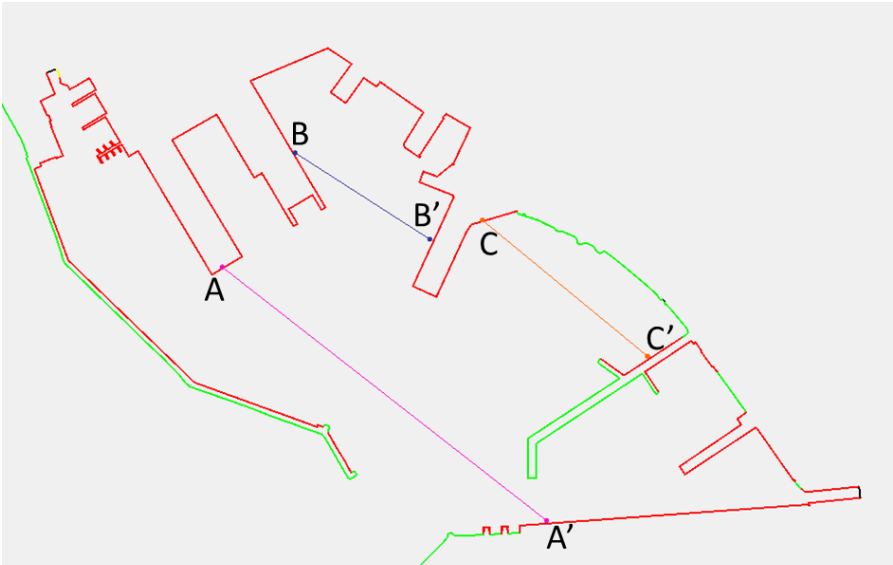
TAV_24: Confronto risultati sezioni esterne al porto turistico
CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO 6:
TR= 50 anni
Dir=165°N Tp=9.5s Hs=4.8m



TAV_25: Confronto risultati sezioni esterne al porto turistico
CONDIZIONI DI MOTO ONDOSI 7:
TR= 2 anni
Dir=150°N Tp=8.0s Hs=3.0m



TAV_26: Confronto risultati sezioni esterne al porto turistico
CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO 8:
TR= 20 anni
Dir=150°N Tp=9.0s Hs=4.2m



TAV_27: Confronto risultati sezioni esterne al porto turistico
CONDIZIONI DI MOTO ONDOSO 9:
TR= 50 anni
Dir=150°N Tp=9.5s Hs=4.8m

