

## PROGETTO DEFINITIVO

CUP C39B18000060006

CIG 9432266822

RIF. PERIZIA

P.3062

### TITOLO PROGETTO

## NUOVA DIGA FORANEA DEL PORTO DI GENOVA AMBITO BACINO SAMPIERDARENA

DISCIPLINA	DESCRIZIONE
GL	IDRAULICA MARITTIMA

ELAB. N°	TITOLO ELABORATO	SCALA
G-0006	STUDIO DEGLI EFFETTI SULLE COSTE ADIACENTI	-

REVISIONE	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VISTO	APPROVATO
00	30/12/2022	PRIMA EMISSIONE	L. De Benetti/A. Calzavara	L. Masiero	T. Tassi
01	23/02/2024	EMISSIONE PER CDS	L. De Benetti/A. Calzavara	L. Masiero	T. Tassi

CODICE PROGETTO	CODICE ELABORATO	NOME FILE
P3062	ID-G-0006	P3062_E-ID-G-0006_01.pdf

CONSORZIO IMPRESE	PROGETTISTI	PROGETTAZIONE	
 (Mandataria)   (Mandante)	 (Mandante)   (Mandante)	 (Mandataria)   (Mandante)	 ingegneria ing. Tommaso Tassi

D.E.C.	VERIFICATORE	PMC	R.U.P.
Ing. Alessandra Mariotti	ITS Controlli Tecnici SpA	RINA Consulting S.p.A.	Ing. Marco Vaccari
.....	.....	.....	.....

## Sommario

<b>1</b>	<b>PREMESSA .....</b>	<b>2</b>
1.1	<b>Aggiornamento documento .....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>APPROFONDIMENTO RELATIVO ALLE MODIFICHE INTRODOTTE NELLA CONFIGURAZIONE DI FASE A+B .....</b>	<b>3</b>

### **ALLEGATO:**

PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA

NUOVA DIGA FORANEA DEL PORTO DI GENOVA AMBITO BACINO DI SAMPIERDARENA

ELABORATO MI046R-PF-D-I-R-024-01

“STUDIO DEGLI EFFETTI SULLE COSTE ADIACENTI”

## 1 PREMESSA

Le attività oggetto del presente elaborato sono state interamente sviluppate in fase di redazione del Progetto di Fattibilità Tecnico Economica da parte dell'R.T.P. con mandataria Technital S.p.A.; più precisamente, lo studio specialistico è stato condotto da Modimar S.r.l.

Lo scopo delle attività descritte è propedeutico alla Valutazione di Impatto Ambientale, che per il presente progetto è stata condotta sulla base dei documenti del PFTE ed ha portato alle prescrizioni di cui al Parere MITE n° 233 del 28 Marzo 2022. Tali prescrizioni, tuttavia, non richiedono aggiornamenti o integrazioni del presente elaborato. Valutando quindi corretti ed esaustivi i contenuti dello studio a corredo il PFTE, si è ritenuto di allegare integralmente al Progetto Definitivo l'elaborato redatto in fase di PFTE.

### 1.1 Aggiornamento documento

Il presente documento viene integrato:

- Rev1: a seguito dell'ODS n. 13 del 11/12/2023 e n. 15 del 22/12/2023 il layout delle opere è stato aggiornato alla configurazione di FASE A+B, mantenendo le modifiche introdotte con l'ODS n. 10 del 10/11/2023 e modificando le opere in corrispondenza dell'imboccatura di Ponente. Il presente elaborato è stato quindi aggiornato inserendo il nuovo Capitolo 2 che riporta gli approfondimenti dei risultati dello studio in relazione alle modifiche introdotte dalla configurazione di FASE A+B.

## 2 APPROFONDIMENTO RELATIVO ALLE MODIFICHE INTRODOTTE NELLA CONFIGURAZIONE DI FASE A+B

Lo studio su modello del possibile impatto della realizzazione della nuova diga foranea sulle coste adiacenti al Porto di Genova svolto in fase di PFTE, ha evidenziato come le variazioni attese in configurazione di progetto, oltre ad essere contenute, risultano limitate alla zona di foce del Torrente Bisagno.

Anche se è possibile che, nel lungo termine, la spiaggia possa trovare un nuovo assetto planimetrico ruotando di qualche grado in senso antiorario, considerata la natura prettamente grossolana dei sedimenti che costituiscono la spiaggia e gli scarsi apporti solidi al litorale in esame, nonché la presenza delle opere di difesa radente esistenti, tali variazioni saranno comunque contenute.

Lo studio è stato svolto analizzando il possibile impatto delle nuove opere sulle correnti litoranee indotte dal moto ondoso, e di conseguenza sul trasporto solido “potenziale”, con riferimento allo stato di mare equivalente, rappresentativo dell'intero clima di moto ondoso. Tale stato di mare è infatti in grado di rappresentare l'azione che svolge mediamente il moto ondoso sul litorale in esame.

Lo studio su modello è stato svolto con riferimento allo stato di fatto e alla configurazione di progetto.

La configurazione di progetto di FASE A+B risulta caratterizzata da alcune variazioni del layout rispetto alla configurazione di progetto analizzata nello studio (FASE B) del PFTE. Le modifiche principali riguardano la variazione della lunghezza delle nuove opere in corrispondenza delle due imboccature.

La modifica più rilevante per quanto riguarda l'impatto sulle spiagge adiacenti, risulta essere l'accorciamento della Nuova Diga in corrispondenza dell'imboccatura di Levante. La nuova configurazione riduce sostanzialmente la protezione dalle mareggiate di Libeccio-Ponente, lasciando completamente esposta al moto ondoso gran parte della diga esistente.

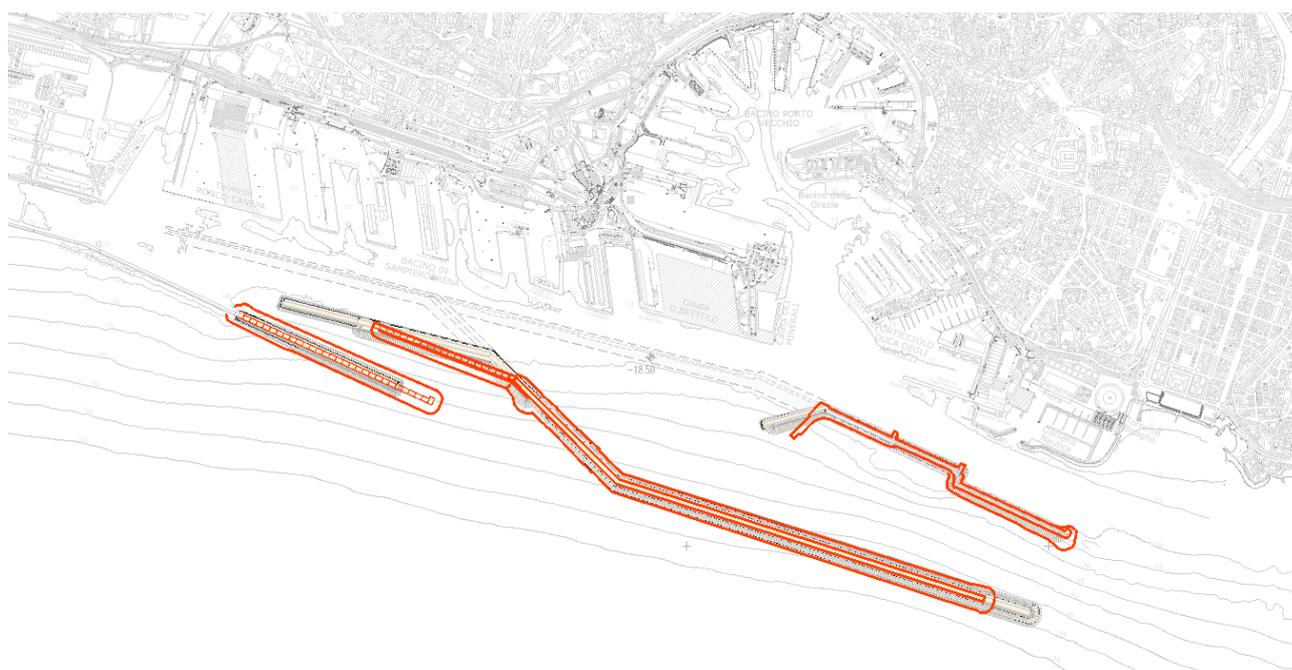
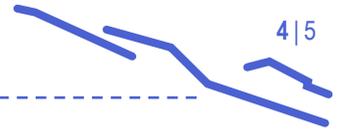


Figura 2-1: Confronto tra la configurazione di progetto analizzata e la nuova configurazione (in rosso)



Sulla base dei risultati dello studio svolto in fase di PFTE è possibile stimare che la nuova Diga, nella sua configurazione accorciata, non modificherà in modo sostanziale il campo di moto ondoso rispetto allo stato attuale; conseguentemente, è lecito prevedere un impatto molto limitato sulle spiagge adiacenti, inferiore a quello, comunque già limitato, valutato dallo studio per la configurazione di FASE B.

Nella figura sottostante (Figura 2-2/Figura 2-1) si riporta il campo di moto ondoso della mareggiata equivalente in configurazione attuale (tipica mareggiata di Libeccio), a cui è stato sovrapposto il layout della Nuova Diga nella più recente configurazione. Dalla sovrapposizione si può intuire come la presenza dell'opera non possa modificare in modo significativo il campo di moto ondoso nella zona del Torrente Bisagno.

Nella successiva Figura 2-3 sono riportati inoltre i piani d'onda di una mareggiata estrema di Libeccio propagata, nell'ambito del presente approfondimento mediante il codice di calcolo SWAN, in configurazione attuale e per la configurazione di FASE A+B.

Si può osservare come, in accordo con quanto previsto sulla base della Figura 2-2, non si evidenzia alcuna variazione del moto ondoso di fronte alla spiaggia di foce Bisagno.

Conseguentemente, anche la circolazione litoranea, il trasporto di sedimenti e la morfodinamica costiera, che risultano determinati in prevalenza dall'azione del moto ondoso incidente, non subiranno variazioni significative rispetto allo stato attuale.

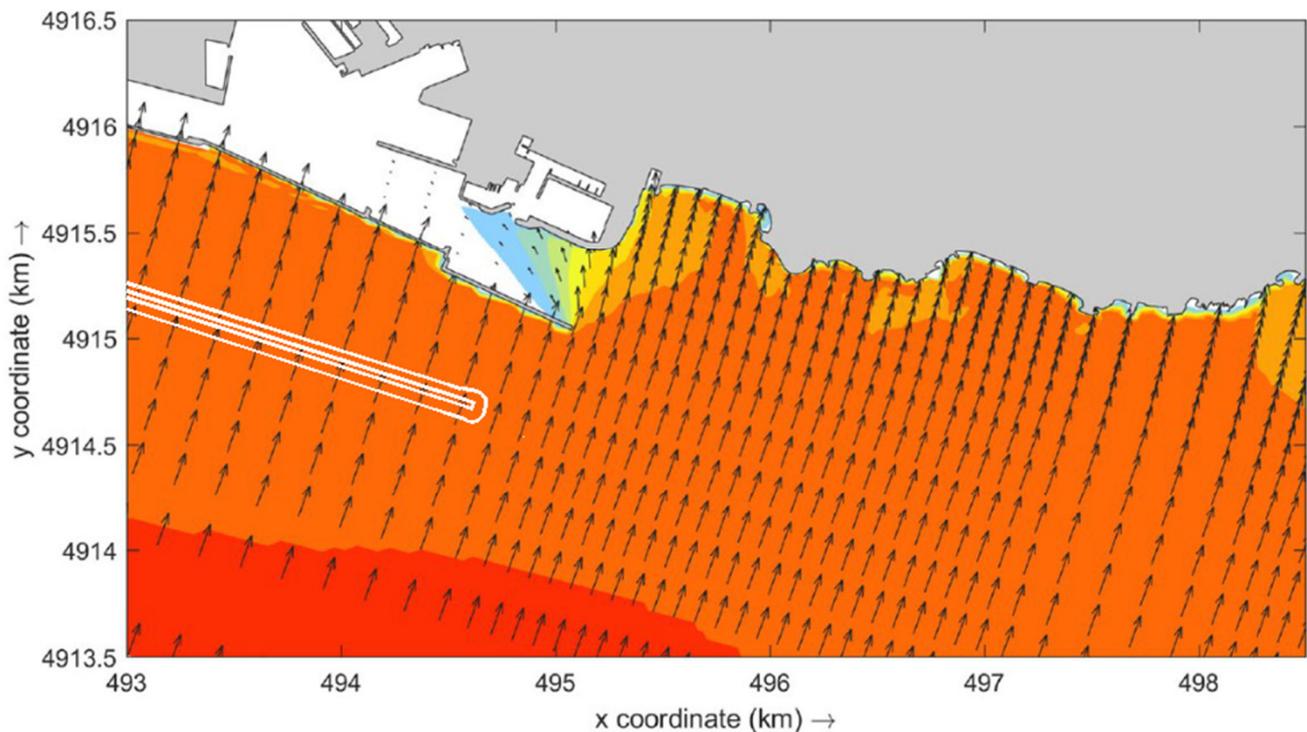


Figura 2-2: Sovrapposizione del layout della nuova Diga nella nuova configurazione, sovrapposto al campo di moto ondoso della mareggiata equivalente in configurazione attuale

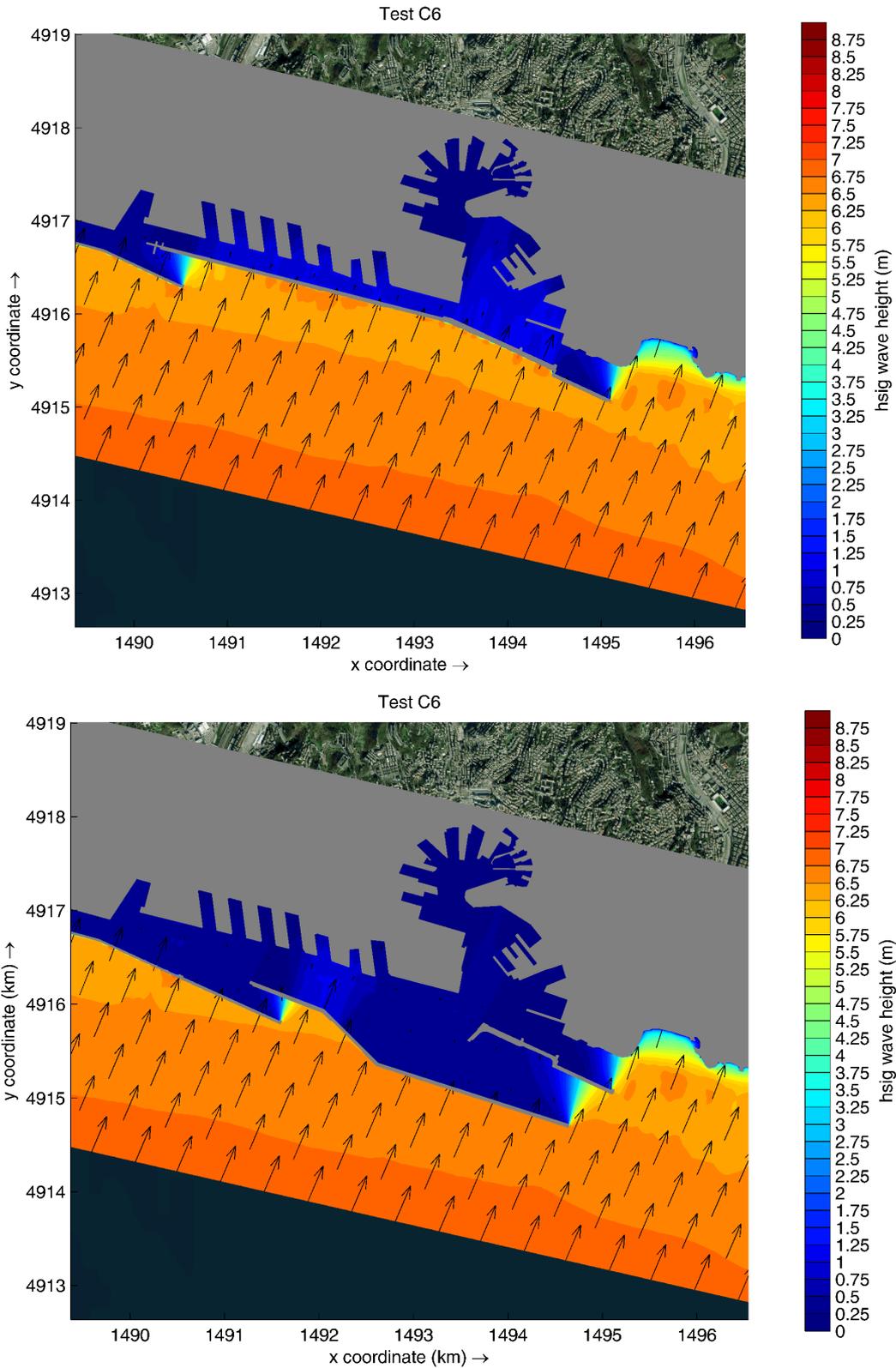


Figura 2-3: Confronto dei risultati della propagazione di una mareggiata estrema di Libeccio  $T_R=50$  anni (Caratteristiche al largo  $H_s=7.5$  m,  $T_p=11$  s,  $Dir=210^\circ N$ ) in configurazione attuale e in configurazione di FASE A+B

## PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA

CUP C39B18000060006

CIG 7690329440

RIF. PERIZIA

**P.3062**

TITOLO PROGETTO

### NUOVA DIGA FORANEA DEL PORTO DI GENOVA AMBITO BACINO SAMPIERDARENA

TITOLO ELABORATO:

STUDIO DEGLI EFFETTI SULLE COSTE ADIACENTI

ELABORATO N°:

MI046R-PF-D-I-R-024-01

NOME FILE:

MI046R-PF-D-I-R-024-01.docx

DATA	ELABORATO	CONTROLLATO	APPROVATO
4/6/2021	M.Del Bianco	P.De Girolamo	A.Lizzadro
REVISIONE	N°	DATA	DESCRIZIONE
	00	30/4/2021	EMISSIONE PER APPROVAZIONE
	01	4/6/2021	REVISIONE A SEGUITO VERIFICA RINA CHECK

PROGETTISTI	PROGETTAZIONE
Mandataria:  Responsabile dell'integrazione delle prestazioni specialistiche Dott. Ing. Antonio Lizzadro       <b>STUDIO BALLERINI            INGEGNERI ASSOCIATI</b>  <b>ALBERTO ALBERT            INGEGNERE</b>	  Dott. Ing. Antonio Lizzadro

D.E.C.	VERIFICATO	VALIDATO R.U.P.	IL RESP. DELL'ATTUAZIONE
Ing. Francesca Arena	RINA CHECK	Ing. Marco Vaccari	Dott. Umberto Benezzioli
.....	.....	.....	.....

## **AUTORITÀ DI SISTEMA PORTUALE DEL MAR LIGURE OCCIDENTALE**

### **REALIZZAZIONE DELLA NUOVA DIGA FORANEA DEL PORTO DI GENOVA AMBITO BACINO DI SAMPIERDARENA**

### **PROGETTAZIONE DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA**

#### **Studio degli effetti sulle coste adiacenti**

## INDICE

1.	PREMESSE	5
1.1.	Introduzione	5
1.2.	Obiettivi , metodologia di lavoro e sintesi dei risultati ottenuti	5
2.	ANALISI PRELIMINARE DEI PROCESSI DI DINAMICA COSTIERA	11
2.1.	Inquadramento del sito in esame	11
2.2.	Analisi diacronica delle linee di riva storiche	12
2.3.	Interazione delle opere foranee del porto di Genova con la dinamica costiera	13
3.	ANALISI DEL FLUSSO DI ENERGIA ASSOCIATO AL MOTO ONDOSO SOTTOCOSTA	16
4.	SIMULAZIONI NUMERICHE	20
4.1.	Introduzione	20
4.2.	Implementazione del modello di calcolo idrodinamico integrato	21
4.3.	Risultati delle simulazioni con il modello idrodinamico integrato	24
4.4.	Applicazione del modello di spiaggia di Silvester e Hsu	28

## INDICE FIGURE

Figura 1-1. Configurazione planimetrica della Soluzione 3 - Fase a) e Fase b).	6
Figura 1-2 - Inquadramento del Porto di Genova.	7
Figura 1-3 – Classificazione delle spiagge a levante di Genova fornita dal portale cartografico della regione Liguria ( <a href="http://www.geoportal.regione.liguria.it">www.geoportal.regione.liguria.it</a> ).	7
Figura 2-1 - “Sistema” Portuale di Genova.	11
Figura 2-2 - Litorale a Levante del sistema portuale di Genova: coste in avanzamento e in arretramento nei periodi 1960-1994 e 1994-2012. Immagine tratta dal “Progetto Coste (edizione 2017) Portale Cartografico Nazionale del MATTM”.	12
Figura 2-3 - Litorale a Ponente del sistema portuale di Genova: coste in avanzamento e in arretramento nei periodi 1960-1994 e 1994-2012. Immagine tratta dal “Progetto Coste (edizione 2017) Portale Cartografico Nazionale del MATTM”.	13
Figura 2-4 - Situazione attuale: clima ondometrico e area costiera schermata dal moto ondoso incidente ad opera delle dighe foranee (area campita in rosa).	14
Figura 2-5 Soluzione 3: clima ondometrico e area costiera schermata dal moto ondoso incidente ad opera delle dighe foranee (area campita in rosa).	15
Figura 3-1 – Rappresentazione del flusso di energia associato al moto ondoso sottocosta in relazione all’orientamento delle spiagge poste a levante del porto di Genova.	19
Figura 4-1 – Griglia di calcolo utilizzata per la propagazione del moto ondoso con il modello d-waves (swan) con indicazione del dominio di calcolo utilizzato del modello d-flow.	22
Figura 4-2 – Profondità all’interno del dominio di calcolo del modello d-waves per la propagazione del moto ondoso.	22
Figura 4-3-Griglia di calcolo utilizzata per le simulazioni idrodinamiche con il modello d-flow-fm.	23
Figura 4-4 - Profondità all’interno del dominio di calcolo del modello idrodinamico d-flow-fm.	23
Figura 4-5 - Risultato della propagazione dell’onda climatica equivalente per lo stato attuale.	25
Figura 4-6 – Risultato della propagazione dell’onda climatica equivalente per la soluzione di progetto S3.	25
Figura 4-7 - Stato attuale – circolazione idrodinamica indotta dallo stato di mare rappresentativo dell’onda climatica equivalente	26
Figura 4-8 – soluzione di progetto S3 - circolazione idrodinamica indotta dallo stato di mare rappresentativo dell’onda climatica equivalente	26
Figura 4-9 – Variazione del campo di altezza d’onda significativa ottenuto per lo stato di mare rappresentativo dell’onda climatica equivalente sottoflutto all’imboccatura di levante in presenza della nuova diga foranea prevista dalla soluzione di progetto S3.	27
Figura 4-10 – Variazione della circolazione idrodinamica indotta dallo stato di mare rappresentativo dell’onda climatica equivalente in presenza della nuova diga foranea prevista dalla soluzione di progetto S3.	27

Figura 4-11. Ortofoto 2000– Fonte: Portale cartografico regione Liguria	28
Figura 4-12. Ortofoto 2010 – Fonte: Portale cartografico regione Liguria	28
Figura 4-13. Ortofoto 2019 – Fonte: Portale cartografico regione Liguria.	29
Figura 4-14. Litorale in equilibrio statico secondo la teoria di Silvester e Hsu	30
Figura 4-15. valore dei coefficienti C0,C1 e C2 proposti da Hsu e Evans (1989)	31
Figura 4-16 - Schematizzazione del criterio di taratura di Medina e Gonzales	31
Figura 4-17 – Determinazione dei parametri dell'equazione di equilibrio del profilo di spiaggia di Silvester e Hsu per la configurazione attuale (2010).	33
Figura 4-18 -Tracciamento della curva parametrica rappresentativa del profilo di equilibrio di Silvester e Hsu per la configurazione attuale.	34
Figura 4-19 – Tracciamento della curva parametrica rappresentativa del profilo di equilibrio di Silvester e Hsu a seguito della realizzazione della nuova diga foranea previsto dalla soluzione S3.	35

## INDICE TABELLE

Tabella 3-1 – Flusso di energia medio annuo e onde di modellazione equivalenti dinanzi al porto di Genova.	18
--	----

## 1. PREMESSE

### 1.1. Introduzione

Il presente rapporto è stato redatto nell'ambito del Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica per la realizzazione della nuova diga foranea del Porto di Genova e riguarda lo studio dei possibili effetti delle nuove opere sulla dinamica costiera lungo i litorali adiacenti al porto.

Lo studio è stato eseguito dalla Modimar S.r.l. con il coordinamento tecnico-scientifico del Prof. Ing. Paolo De Girolamo e dell'ing. Paolo Contini.

### 1.2. Obiettivi , metodologia di lavoro e sintesi dei risultati ottenuti

Il presente studio si è posto l'obiettivo di valutare il possibile impatto sulle coste adiacenti al Porto di Genova in relazione alla nuova configurazione portuale prevista dalla realizzazione della nuova diga foranea.

La soluzione selezionata analizzata nel presente studio è la Soluzione 3 riportata in Figura 1-1, dove sono distinte le due Fasi realizzative a) e b).

In particolare è stato analizzato come le nuove opere foranee previste dalla soluzione progettuale selezionata, possano modificare, rispetto alla situazione attuale:

- (i) le condizioni di moto ondoso sottocosta, che rappresentano la principale forzante per la messa in sospensione e per il trasporto dei sedimenti;
- (ii) le correnti litoranee indotte dal moto ondoso incidente e il conseguente trasporto solido longitudinale potenziale.

Si tratta quindi non di una valutazione assoluta, ma relativa rispetto alla situazione attuale.

Con riferimento alla Figura 1-2, il "sistema portuale di Genova", è contraddistinto da tre dighe foranee che si estendono, quasi senza soluzione di continuità, su una lunghezza complessiva di circa 14,0 km di costa alta e rocciosa a protezione del Porto di Genova, dell'aeroporto e del Porto di Voltri.

Come anche riportato nello studio "Le Spiagge della Liguria Centro-Orientale: analisi evolutiva" edito dalla Regione Liguria con il contributo dell'Università di Genova, il tratto di costa in esame risulta esposto alla traversia principale di Libeccio che determina un trasporto solido "potenziale" diretto verso Est.

In ragione della natura prevalentemente rocciosa della costa e dei fondali elevati, il trasporto solido costiero effettivo longitudinale, ovvero quello parallelo alla costa, indotto dal moto ondoso frangente risulta trascurabile.

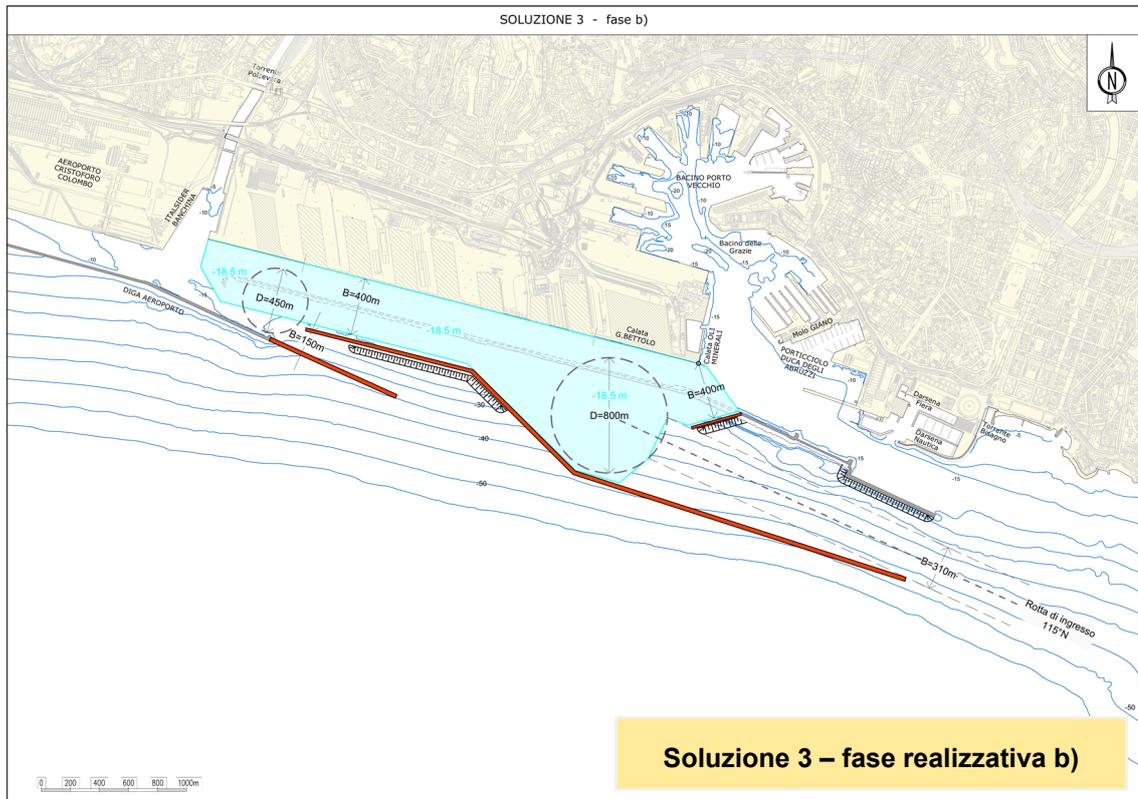
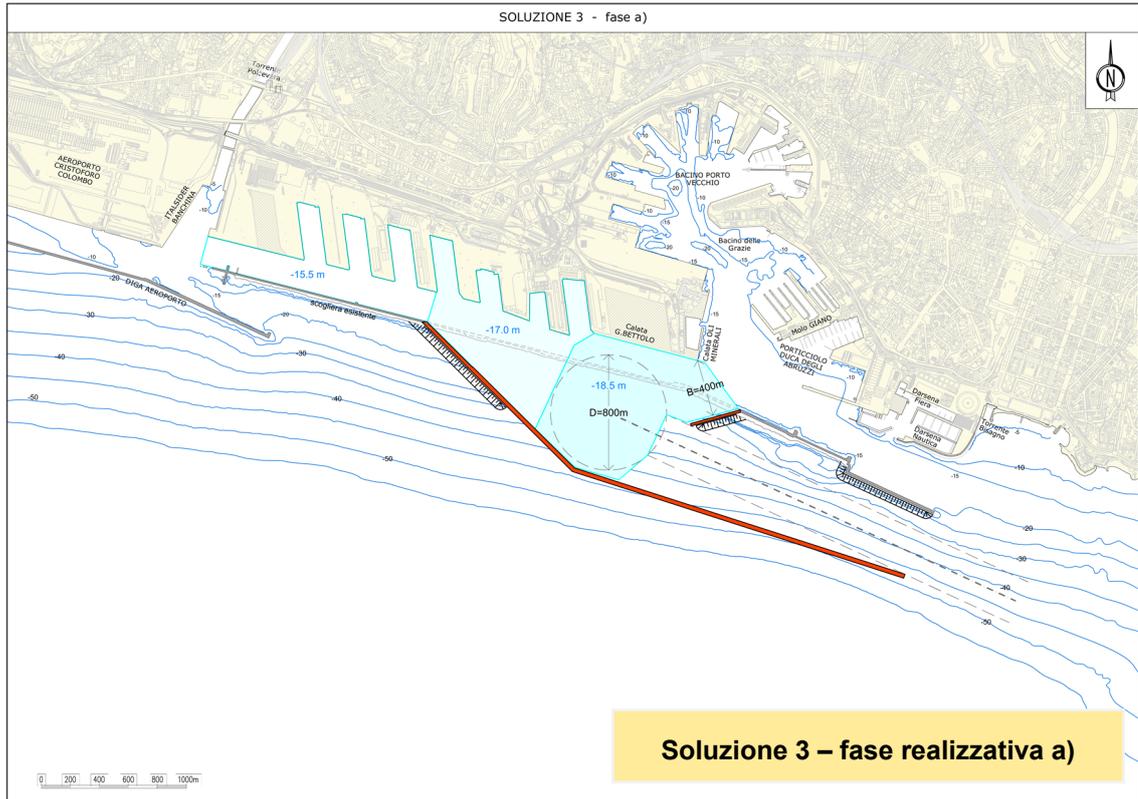


FIGURA 1-1. CONFIGURAZIONE PLANIMETRICA DELLA SOLUZIONE 3 - FASE A) E FASE B).



FIGURA 1-2 - INQUADRAMENTO DEL PORTO DI GENOVA.

L'assenza di trasporto solido costiero longitudinale ha infatti consentito di realizzare il sistema portuale secondo il classico schema con "diga foranea distaccata (non collegata a terra) disposta parallelamente alla costa". L'utilizzo di questa tipologia di assetto planimetrico, contraddistinto da almeno una doppia imboccatura per il porto, è possibile solo nel caso di assenza di trasporto solido costiero perché in caso contrario si verificherebbero rilevanti fenomeni di interrimento delle imboccature portuali.

A Levante ed a Ponente delle opere foranee del Porto di Genova sorgono alcune piccole insenature delimitate da promontori rocciosi o da elementi di natura antropica (terrapieni conquistati a mare) che comprendono al loro interno alcune "spiagge a tasca" ("pocket beaches") di estremo interesse dal punto di vista sociale e ambientale.

Queste spiagge, di estensione molto limitata, come indicato dalla cartografia tematica delle spiagge della Regione Liguria, di cui in Figura 1-3 è riportato un estratto, sono costituite in prevalenza da ghiaia e ciottoli.

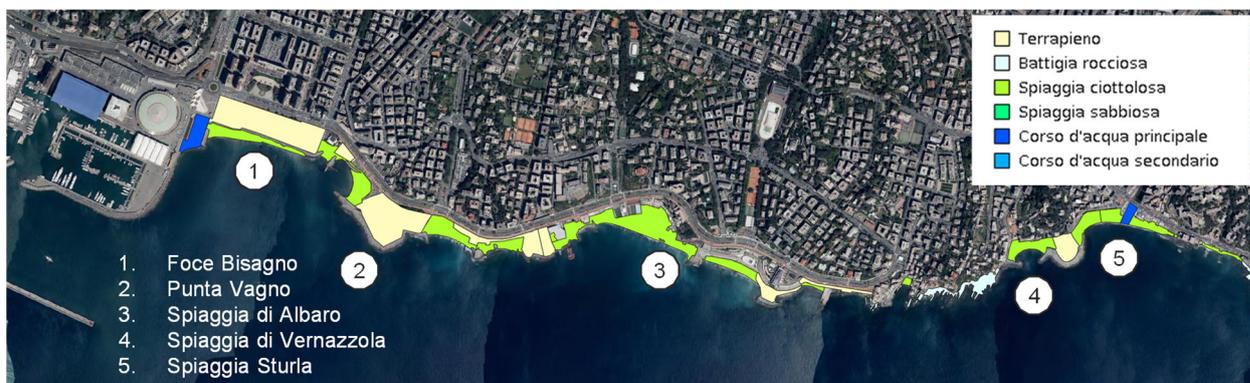


FIGURA 1-3 – CLASSIFICAZIONE DELLE SPIAGGE A LEVANTE DI GENOVA FORNITA DAL PORTALE CARTOGRAFICO DELLA REGIONE LIGURIA ([WWW.GEOPORTAL.REGIONE.LIGURIA.IT](http://WWW.GEOPORTAL.REGIONE.LIGURIA.IT)).

Le spiagge in esame sono quasi prive di alimentazione da parte dei corsi d'acqua che sfociano a mare in prossimità del porto di Genova (torrente Polcevera, torrente Bisagno, torrente Sturla). Questi infatti presentano un regime torrentizio e di conseguenza i loro apporti solidi sono concentrati esclusivamente quando avvengono eventi di piena significativi.

Gli apporti del torrente Polcevera, data la sua localizzazione, non contribuiscono ad alimentare le spiagge limitrofe al porto perché rimangono confinati in ambito portuale, mentre gli apporti alla foce del Bisagno e alla foce dello Sturla, prevalentemente costituiti da materiale fino in sospensione con una frazione granulometrica compresa tra le sabbie limose ed i limi sabbiosi, sono molto scarsi.

Per sopperire alla mancanza di apporti solidi, al fine di preservare queste spiagge di importante valore sociale per la città di Genova, sono stati effettuati diversi interventi di ripascimento nel corso dell'ultimo ventennio (vedi portale cartografico Regione Liguria: Ripascimenti 2003-2007).

L'analisi della configurazione delle opere foranee, sia relative allo stato attuale sia a quello di progetto, unitamente all'analisi dei caratteri morfologici del litorale in esame e delle caratteristiche di esposizione al moto ondoso, ha permesso di effettuare una valutazione preliminare della possibile interferenza delle nuove opere nei confronti della dinamica costiera.

Come in seguito illustrato nel capitolo 2, la conformazione delle nuove opere foranee, l'assenza del trasporto solido longitudinale e l'esposizione al moto ondoso, consentono di stimare una limitata, se non addirittura trascurabile, interferenza delle nuove opere sulla dinamica costiera, che può interessare esclusivamente il tratto di costa posto immediatamente a Levante dell'imboccatura portuale, in prossimità della foce del Bisagno.

Per confermare tali valutazioni è stato eseguito uno studio con l'ausilio di modellistica numerica finalizzato a:

1. caratterizzare le condizioni di moto ondoso, relative agli stati di mare più significativi per i processi di dinamica costiera, per le spiagge immediatamente a Levante della nuova imboccatura portuale, per valutare le possibili variazioni, rispetto allo stato attuale, della forzante di moto ondoso che genera le correnti litoranee;
2. analizzare il campo di circolazione idrodinamica indotto dalle forzanti di moto ondoso per valutare le possibili variazioni delle correnti litoranee, indotte dalle nuove opere in progetto, rispetto alla configurazione attuale.

Per caratterizzare le condizioni di moto ondoso sottocosta e le conseguenti correnti litoranee sono state effettuate delle simulazioni con il modello integrato di propagazione del moto ondoso e circolazione idrodinamica Delft3D-FM, un codice di calcolo sviluppato dall'istituto olandese Deltares.

La propagazione del moto ondoso, nell'ambito del modello integrato, è stata effettuata utilizzando il modello numerico di propagazione spettrale del moto ondoso D-WAVES (SWAN integrato nel software Delft 3D-FM).

Come forzante di moto ondoso è stata presa in esame l'onda climatica equivalente, avente un contenuto energetico equivalente a tutti gli stati di mare ricostruiti per il periodo 1979-2018 all'esterno del Porto di Genova, a circa 2 km dalla attuale diga foranea, alla profondità di -75 m.

La circolazione idrodinamica, nell'ambito del modello integrato, è stata simulata con il modello numerico D-FLOW-FM utilizzando la forzante di moto ondoso e la variazione dei livelli dovuta alla marea astronomica.

A causa della conformazione della costa a Levante del porto, caratterizzata dalla presenza di insenature delimitate da promontori rocciosi o da elementi di natura antropica, l'azione del moto ondoso sul litorale risulta molto variabile.

Le correnti indotte dal moto ondoso frangente si concentrano all'interno delle insenature localizzate lungo il litorale, presentando una circolazione a "celle" che non determina un significativo trasporto solido potenziale longitudinale.

Le simulazioni hanno confermato che la nuova diga foranea prevista dalla soluzione di progetto S3, relativamente allo stato di mare rappresentativo della risultante del clima di moto ondoso, proveniente da Libeccio, determina una variazione del moto ondoso in termini di  $H_s$ , dell'ordine del 5-10%, limitatamente allo specchio acqueo compreso tra l'imboccatura di Levante e Punta Vagno.

Di conseguenza solo in prossimità della foce del Bisagno si osserva una variazione della circolazione indotta dal moto ondoso prevalente con un incremento del flusso longitudinale diretto verso Ovest da Punta Vagno alla foce.

Pertanto è possibile che nel lungo termine la spiaggia possa trovare un nuovo assetto planimetrico, compatibile con la nuova risultante del moto ondoso, ruotando di qualche grado in senso antiorario, con una tendenza all'avanzamento in prossimità della foce del Bisagno.

Per effettuare una stima del nuovo assetto planimetrico assunto dalla linea di riva a seguito della realizzazione della nuova diga foranea è stato infine applicato il modello di equilibrio di spiaggia di Silvester e Hsu che consente di valutare l'evoluzione di una litorale sabbioso confinato ad un estremo da un punto di controllo in grado di schermare il moto ondoso.

I risultati ottenuti hanno mostrato che l'assetto della linea di riva a seguito della realizzazione della nuova diga foranea è pressoché simile a quello attuale. Le variazioni più significative si potranno verificare in prossimità della foce del Bisagno, nella zona più ridossata dalla nuova diga foranea, dove, se fosse presente un sufficiente volume di sedimenti, la posizione potenziale della linea di riva di equilibrio risulterebbe avanzata di circa 5-15 m rispetto alla situazione attuale. Ciò nonostante, considerata la natura prettamente grossolana dei sedimenti che costituiscono la spiaggia in esame, gli scarsi apporti solidi al litorale in esame, e la presenza delle opere di difesa radenti esistenti, si ritiene che tali variazioni saranno più contenute.

## 2. ANALISI PRELIMINARE DEI PROCESSI DI DINAMICA COSTIERA

### 2.1. Inquadramento del sito in esame

Con riferimento alla Figura 2-1, il “sistema” portuale di Genova, che comprende le tre dighe foranee del Porto di Genova, dell’aeroporto e del Porto di Voltri, si estende senza soluzione di continuità per circa 14 km di costa.

Poiché le profondità di imbasamento delle tre dighe (comprese tra circa -15,0 m e circa -20,0 m sul l.m.m.) risultano decisamente superiori rispetto alla “profondità di chiusura della fascia attiva” che lungo la costa in esame non supera le profondità di circa -7,0÷-8,0 m (vedi Lisi et al, 2010<sup>1</sup>), si può affermare, come peraltro evidenziato anche dal “Progetto Coste (edizione 2017) - Portale Cartografico Nazionale”, che il sistema portuale disconnette dal punto di vista del *trasporto solido costiero potenziale*, il litorale posto a Levante da quello posto a Ponente di esso.



FIGURA 2-1 - “SISTEMA” PORTUALE DI GENOVA.

Attualmente le imboccature del Porto di Genova non sono soggette a fenomeni di interrimento indotti dal trasporto solido costiero causato dal moto ondoso frangente e pertanto si può fin da ora giungere alla conclusione che l’attuale morfodinamica costiera risulta trascurabile o comunque molto contenuta. Ciò è dovuto al fatto che la costa in adiacenza al porto è prevalentemente alta e rocciosa con fondali molto acclivi e di conseguenza con ridotto trasporto solido longitudinale.

Proprio l’assenza di trasporto solido costiero longitudinale ha consentito di realizzare il sistema portuale di Genova secondo il classico schema con “diga foranea distaccata (non collegata a terra) disposta parallelamente alla costa”.

<sup>1</sup> Lisi, I., Bruschi, A., Del Gizzo, M., Archina, M., Barbano, A., Corsini, S., (2010), *Le unità fisiografiche e le profondità di chiusura delle coste italiane*, L’Acqua n. 2, 2010.

L'utilizzo di questa tipologia di assetto planimetrico, contraddistinto da almeno una doppia imboccatura per il porto, è infatti possibile solo nel caso di assenza di trasporto solido costiero perché, in caso contrario, si verificherebbero rilevanti fenomeni di interrimento delle imboccature portuali che a Genova come detto non si sono mai osservati.

## 2.2. Analisi diacronica delle linee di riva storiche

L'analisi delle linee di riva storiche a partire dal 1960 conferma l'assenza di un trasporto solido longitudinale significativo per il litorale in esame.

Nelle mappe riportate in Figura 2-2 e in Figura 2-3 è riportata un'elaborazione dei dati forniti dal "Progetto Coste (edizione 2017) del Portale Cartografico Nazionale" redatto a cura del Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare (MATTM).

Le figure, che si riferiscono al litorale posto a Levante e a Ponente del sistema portuale di Genova, mostrano che l'evoluzione della costa osservata dal 1960 al 2012 risulta del tutto trascurabile.

Le limitate variazioni della linea di costa osservate, che riguardano modesti avanzamenti posizionati a una certa distanza dalle opere portuali, corrispondono a zone conquistate a mare mediante l'impiego opere di difesa costiera.

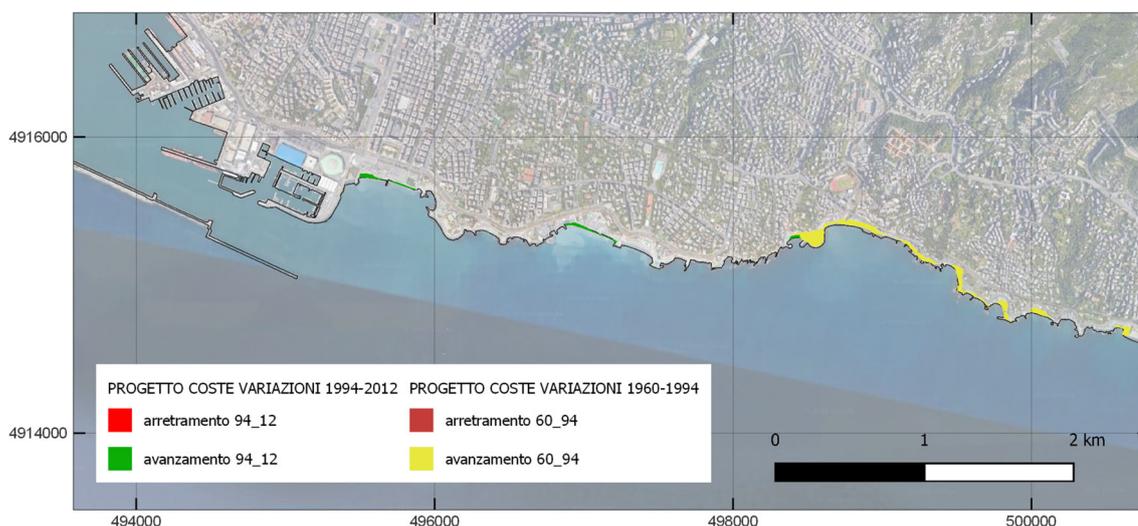


FIGURA 2-2 - LITORALE A LEVANTE DEL SISTEMA PORTUALE DI GENOVA: COSTE IN AVANZAMENTO E IN ARRETRAMENTO NEI PERIODI 1960-1994 E 1994-2012. IMMAGINE TRATTA DAL "PROGETTO COSTE (EDIZIONE 2017) PORTALE CARTOGRAFICO NAZIONALE DEL MATTM".

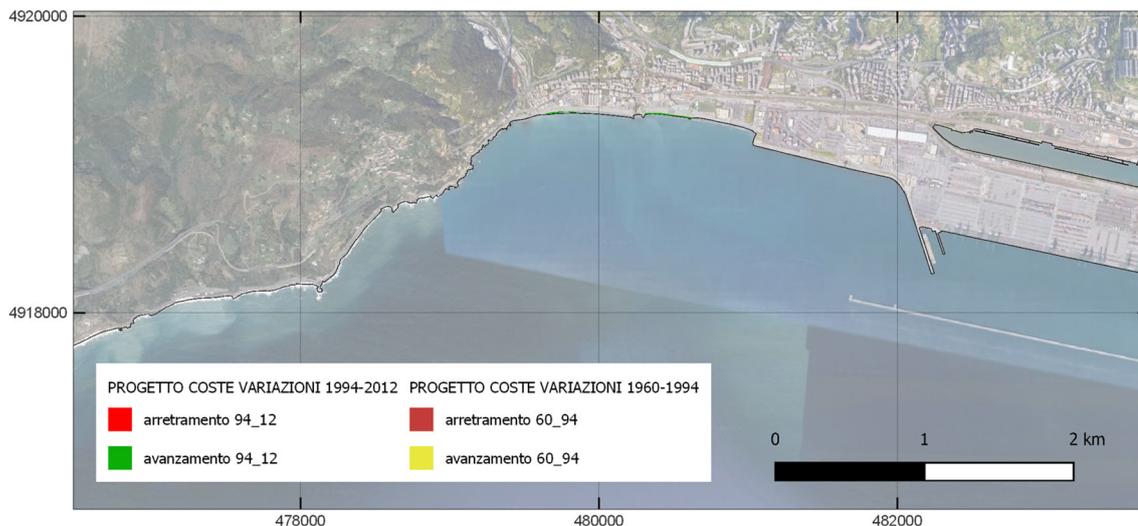


FIGURA 2-3 - LITORALE A PONENTE DEL SISTEMA PORTUALE DI GENOVA: COSTE IN AVANZAMENTO E IN ARRETRAMENTO NEI PERIODI 1960-1994 E 1994-2012. IMMAGINE TRATTA DAL “PROGETTO COSTE (EDIZIONE 2017) PORTALE CARTOGRAFICO NAZIONALE DEL MATTM”.

### 2.3. Interazione delle opere foranee del porto di Genova con la dinamica costiera

Le nuove opere foranee previste dalla soluzione progettuale, pur sviluppandosi su fondali maggiori rispetto a quelli che caratterizzano le opere attuali, non potranno bloccare ulteriormente il trasporto solido costiero potenziale il quale risulta già oggi completamente intercettato dalle dighe foranee esistenti.

Nella situazione in esame l'unica tipologia di impatto che le nuove opere potrebbero esercitare sulla morfodinamica costiera è costituita esclusivamente dalla modifica dell'area costiera schermata dal moto ondoso incidente ad opera delle nuove dighe foranee. Tale modifica infatti potrebbe causare la variazione della forma planimetrica di eventuali spiagge poste in adiacenza al porto.

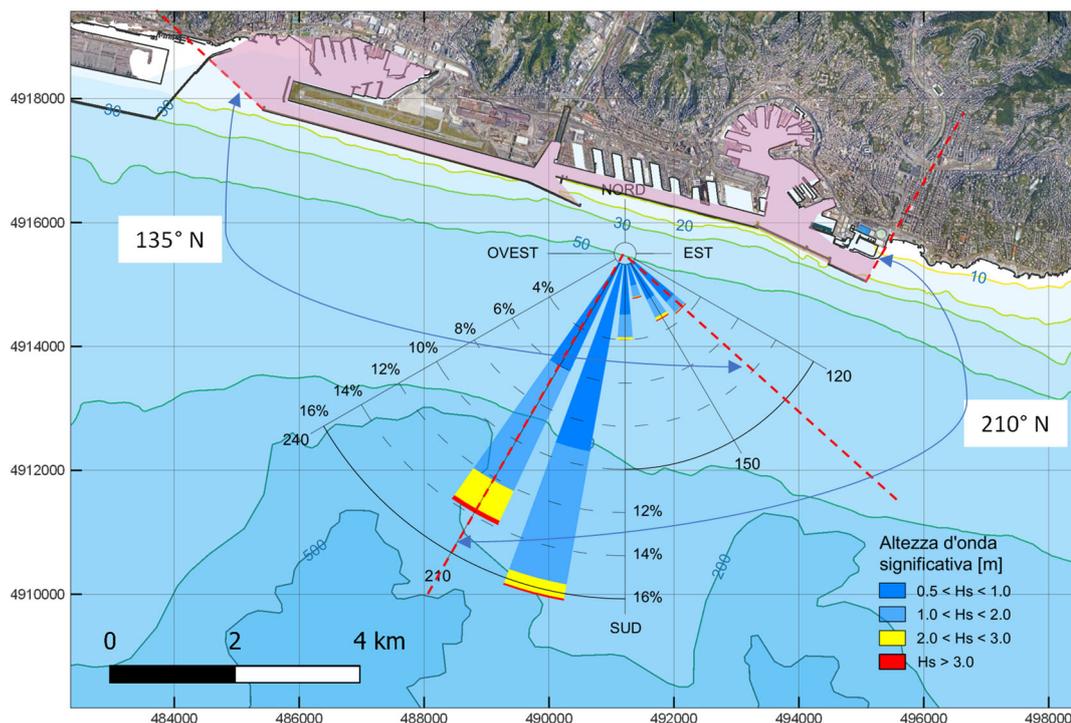


FIGURA 2-4 - SITUAZIONE ATTUALE: CLIMA ONDAMETRICO E AREA COSTIERA SCHERMATA DAL MOTO ONDOSO INCIDENTE AD OPERA DELLE DIGHE FORANEE (AREA CAMPITA IN ROSA).

Nella Figura 2-4, che si riferisce alla situazione attuale, è rappresentata mediante la campitura rosa l'area costiera schermata dal moto ondoso incidente ad opera delle attuali dighe foranee. L'area schermata è delimitata ad Ovest dalla direzione 135 °N e ad Est dalla direzione 210 °N, le quali a loro volta costituiscono le direzioni del moto ondoso che delimitano il settore di provenienza del clima ondometrico in costa mostrato in figura.

Nella Figura 2-5 sono mostrate, sempre mediante la campitura in rosa, le aree costiere schermate dal moto ondoso incidente relative alla Soluzione 3 in progetto. Il confronto tra la soluzione S3 e la situazione attuale riportata in Figura 2-4, mostra chiaramente che le nuove opere portuali previste non sono in grado di modificare, rispetto alla situazione attuale, l'area di costa schermata dal moto ondoso incidente e pertanto si può escludere che le nuove opere possano modificare l'attuale morfodinamica costiera. Possibili variazioni sul campo di moto ondoso a tergo della nuova diga foranea possono determinare una locale variazione della circolazione indotta dal moto ondoso frangente. Tale aspetto viene investigato in seguito con l'ausilio di un modello numerico.

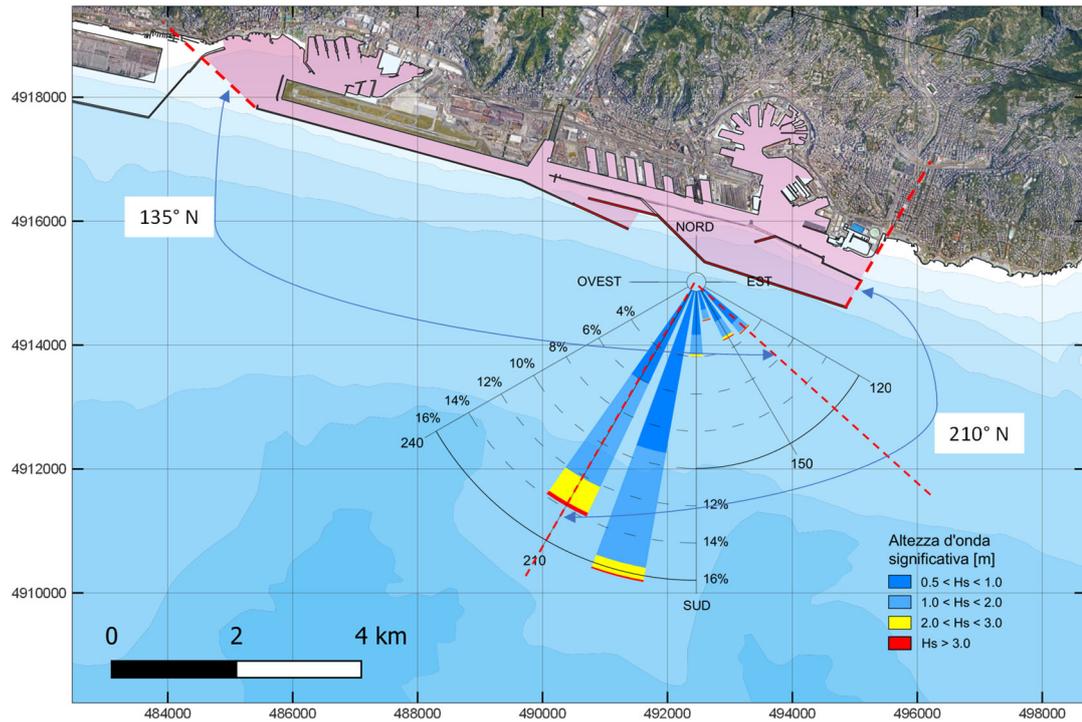


FIGURA 2-5 SOLUZIONE 3: CLIMA ONDAMETRICO E AREA COSTIERA SCHERMATA DAL MOTO ONDOSO INCIDENTE AD OPERA DELLE DIGHE FORANEE (AREA CAMPITA IN ROSA).

### 3. ANALISI DEL FLUSSO DI ENERGIA ASSOCIATO AL MOTO ONDOSO SOTTOCOSTA

Al fine di poter effettuare uno studio riguardante l'analisi della morfodinamica costiera risulta necessario individuare gli stati di mare rappresentativi dell'intero clima di moto ondoso, e di conseguenza dell'energia associata al moto ondoso, per il settore di traversia che caratterizza il sito in esame.

A partire dalla serie temporale dei dati di moto ondoso (1979-2018) propagati sottocosta nel punto posto su fondali di -75 m, ad una distanza di circa 2 km dall'attuale diga foranea del Porto di Genova, è stata applicata una procedura di calcolo per ricavare l'onda climatica equivalente che rappresenta, in termini di energia, l'intero clima di moto ondoso su base annuale.

L'onda climatica equivalente è infatti un'onda sintetica che possiede, in termini altezza d'onda, periodo, direzione e durata media annuale, lo stesso contenuto energetico di tutti gli stati di mare appartenenti alla serie storica in esame. Pertanto il suo effetto sul litorale in esame nel lungo termine è equivalente a quello dovuto alla totalità delle onde appartenenti alla serie storica di provenienza.

Il calcolo dell'onda climatica equivalente è basato sul calcolo del flusso di energia del moto ondoso che varia, per ogni settore di provenienza preso in esame, in funzione dell'altezza d'onda, del periodo e della frequenza di apparizione di ogni stato di mare.

Di seguito viene riportata la descrizione del metodo di calcolo del flusso di energia a partire dai dati di moto ondoso propagati sottocosta.

Secondo la teoria classica il flusso di energia è dato da:

$$E = \rho \cdot g \cdot H^2 \cdot C_g / 8$$

dove:

$\rho = 10.3 \text{ kN/m}^3$  densità dell'acqua

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$  accelerazione di gravità

H altezza d'onda (m)

$C_g = n \cdot C$  Celerità di gruppo (m/s)

C Celerità dell'onda (m/s)

$n = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right)$  fattore che dipende dalla profondità (h) e dalla numero d'onda (k) (variabile da 0.5 a 1)

noto che:

$$C = L / T \quad \text{e che} \quad L = g \cdot T^2 \cdot \tanh(kd) / (2 \cdot \pi) \quad (\text{relazione di dispersione})$$

si ottiene

$$C = g \cdot T \cdot \tanh(kd) / (2 \cdot \pi)$$

$$E = \rho \cdot g \cdot H^2 \cdot n \cdot g \cdot T \cdot \tanh(kd) / (2 \cdot \pi)$$

In definitiva, il flusso di energia è proporzionale al quadrato dell'altezza d'onda e al periodo:

$$E \propto H^2 \cdot T$$

Il flusso di energia lordo risultante si ottiene dalla sommatoria di  $H^2 \cdot T$  per ciascun evento rapportato alla totalità degli eventi, per cui si ha:  $E_{ris} = (\sum H^2 \cdot T) / N_{eventi}$

Ciascun evento è associato ad una determinata direzione  $\alpha$ , quindi per il calcolo dell'energia risultante netta è necessario considerare le componenti vettoriali della singola onda:

$$X = \sum H_i^2 \cdot T_i \cdot \sin(\alpha_i) \quad \text{e} \quad Y = \sum H_i^2 \cdot T_i \cdot \cos(\alpha_i)$$

dove X e Y sono le proiezione del flusso di energia associato all'evento ondoso sugli assi cartesiani di riferimento ed  $\alpha$  è la direzione media di provenienza dell'evento, da cui si ha che:

$$E_{netta} = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad \text{risultante energetica}$$

e

$$\theta = \arctg(Y/X) \quad \text{direzione dell'energia.}$$

L'onda climatica equivalente è un'onda virtuale che, come detto in precedenza, ha lo stesso flusso energetico degli eventi ondosi e la cui direzione è uguale a quella del flusso energetico, pertanto è tale da soddisfare la seguente relazione:

$$H_e^2 \cdot T_e = E_{netta} / N_{eventi}$$

I risultati del calcolo del flusso di energia medio annuale (espressi in W/m) nel punto sottocosta P1 prospiciente al porto di Genova ottenuto a partire dai dati di moto ondoso della serie storica oraria che si estende dal 1979 al 2018 sono riportati in Tabella 3-1.

La tabella riporta il valore del flusso di energia determinato per ciascuna classe di direzione di provenienza e di altezza d'onda significativa  $H_s$ . Per ogni classe direzionale è riportato il flusso di energia lordo dal quale sono determinate successivamente le componenti X e Y.

La tabella in basso riporta il flusso di energia risultante, determinato per diversi valori di soglia di  $H_s$ , il numero di eventi sopra soglia, la direzione del flusso, il valore di  $H_e$  e la durata, in mesi, dell'onda equivalente.

Prendendo a riferimento una soglia pari a  $H_s = 1.5$  m si ottiene un'onda equivalente di altezza significativa  $H_{s,e} = 2.0$  m, direzione di provenienza di  $199^\circ N$  e durata pari a 0.87 mesi/anno. Prendendo in considerazione l'analisi del valore atteso del periodo di picco per gli stati di mare propagati nel punto P1, effettuata nell'ambito dello studio meteomarinario di progetto, è possibile associare all'onda equivalente selezionata un periodo di picco  $T_p = 8.0$  s.

In Figura 3-1 è infine mostrato il diagramma polare del flusso di energia medio annuo sottocosta in relazione all'orientamento delle spiagge presenti a Levante del Porto di Genova.

**TABELLA 3-1 – FLUSSO DI ENERGIA MEDIO ANNUO E ONDE DI MODELLAZIONE EQUIVALENTI DINANZI AL PORTO DI GENOVA.**

FLUSSO DI ENERGIA MEDIO ANNUO (W/m)  
 Serie oraria ricostruita - Porto di Genova (Gennaio 1979 - Dicembre 2018)

DIR (°N)	CLASSI DI ALTEZZA D'ONDA SIGNIFICATIVA $H_s$ (m)										TOT.	Componenti		
	0.5÷1.0	1.0÷1.5	1.5÷2.0	2.0÷2.5	2.5÷3.0	3.0÷3.5	3.5÷4.0	4.0÷4.5	4.5÷5.0	> 5.0		X	Y	
90														
100														
110														
120	3.2	0.6										3.8	3.3	-1.9
130	43.2	24.5	13.6	5.6	5.6	0.5	1.4					94.4	72.3	-60.7
140	98.6	74.9	42.7	23.5	16.0	2.5		1.8				259.9	167.1	-199.1
150	63.8	65.8	53.9	44.0	34.6	29.6	7.9	4.1				303.7	151.8	-263.0
160	45.3	48.0	26.8	21.4	14.3	5.8	1.6	1.1	2.4			166.7	57.0	-156.6
170	46.8	44.0	24.3	17.9	8.0	1.4	3.9	5.0				151.3	26.3	-149.1
180	82.2	75.7	43.0	37.3	18.1	7.9	6.2					270.4	0.0	-270.4
190	209.1	255.7	160.6	106.0	59.7	31.8	12.9	6.8	10.1			852.8	-148.1	-839.8
200	410.9	836.6	698.6	420.7	195.2	83.5	34.0	16.6	2.5	3.1		2701.6	-924.0	-2538.7
210	284.6	534.5	579.8	577.0	427.9	189.0	103.6	39.8	10.2			2746.4	-1373.2	-2378.5
220	41.1	18.3	2.2	0.4								61.9	-39.8	-47.5
230														
240														
TOT.	1328.66	1978.72	1645.47	1253.73	779.38	352.00	171.66	75.18	25.17	3.14		7613.11	-2007.3	-6905.3

	Hs >		
	0.5	1.0	1.5
Flusso di energia risultante (W/m):	7191	5987	4116
Direzione del vettore flusso di energia (°N):	196	198	199
Numero eventi sopra soglia:	120396	50988	20014
H equivalente (m):	1.26	1.64	2.06
Durata (mesi):	5.23	2.22	0.87

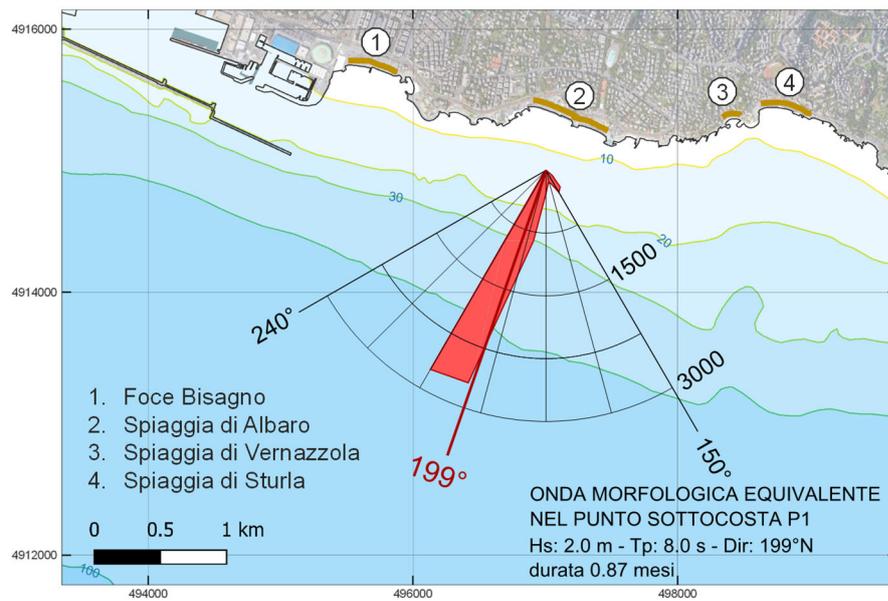


FIGURA 3-1 – RAPPRESENTAZIONE DEL FLUSSO DI ENERGIA ASSOCIATO AL MOTO ONDOSO SOTTOCOSTA IN RELAZIONE ALL'ORIENTAMENTO DELLE SPIAGGE POSTE A LEVANTE DEL PORTO DI GENOVA.

## 4. SIMULAZIONI NUMERICHE

### 4.1. Introduzione

Sottocosta, in prossimità della zona dei frangenti, la circolazione litoranea, che determina il trasporto “potenziale” di sedimenti e la conseguente morfologia costiera, è determinata in prevalenza dall’azione del moto ondoso incidente.

L’incidenza obliqua del moto ondoso sul litorale e la riduzione dell’altezza d’onda nella zona dei frangenti introducono di fatto una variazione del tensore di radiation stress che provoca un campo di corrente  $(u, v)$  la cui componente longitudinale, detta anche di “longshore”, risulta determinante per i processi di morfodinamica a lungo termine.

La variazione del radiation stress, e di conseguenza le forzanti  $F_x$ , e  $F_y$  dovute al moto ondoso, risultano strettamente legati ai processi di dissipazione del moto ondoso dovuti all’attrito sul fondo e al frangimento.

Per analizzare in dettaglio il possibile impatto delle nuove opere sulle correnti litoranee indotte dal moto ondoso, e di conseguenza sul trasporto solido “potenziale”, sono state condotte delle simulazioni numeriche per valutare come le nuove opere foranee previste dalla soluzione progettuale S3, possano modificare, rispetto alla situazione attuale:

- le condizioni di moto ondoso sottocosta;
- le correnti litoranee indotte dal moto ondoso.

Si tratta quindi non di una valutazione assoluta, ma relativa rispetto alla situazione attuale.

Al fine di effettuare l’analisi comparativa si è scelto di simulare lo stato di mare rappresentativo del clima di moto ondoso equivalente in quanto è in grado di rappresentare l’azione che svolge mediamente il moto ondoso sul litorale in esame.

Per effettuare le simulazioni è stato applicato il modello integrato di propagazione e circolazione idrodinamica Delft3D sviluppato dall’istituto olandese Deltares.

Il modello integrato Delft3D consente l'accoppiamento dei processi di propagazione del moto ondoso, risolti dal modello D-WAVES (SWAN), con i processi di idrodinamica, risolti dal modello D-FLOW-FM.

Nel modello integrato il modello D-WAVES e il modello D-FLOW FM si scambiano ciclicamente i risultati attraverso un file di comunicazione (com-file) contenente i parametri  $(H_{rms}, T_m, Dir)$ , le forzanti dovute al moto ondoso  $(F_x, F_y)$ , e i parametri che descrivono il campo idrodinamico (corrente  $(u,v)$ , livello, etc...).

Nei seguenti paragrafi 4.2 e 4.3 vengono illustrate: l’implementazione dei modelli numerici di calcolo, le condizioni al contorno applicate e infine i risultati ottenuti.

Nel paragrafo 4.4 sono infine presentati i risultati dell'applicazione del modello di equilibrio di spiaggia di Silvester e Hsu, sviluppato per studiare l'evoluzione di spiagge sabbiose confinate ad un estremo da un punto di controllo in grado di schermare il moto ondoso. L'applicazione del modello di Silvester e Hsu ha consentito di valutare i potenziali effetti, in termini di assetto planimetrico linea di riva, che possono essere determinati dalla nuova diga foranea.

#### **4.2. Implementazione del modello di calcolo idrodinamico integrato**

Per la propagazione del moto ondoso con il modello D-WAVES è stata presa in esame un'area di studio che si estende dalla bocca di Ponente del porto di Genova, sino a Genova Quinto al Mare a Levante.

La griglia di calcolo utilizzata per il modello D-WAVES rappresentata in Figura 4-1, è costituita da  $295 \times 122$  celle per un totale di 22884 elementi quadrangolari che presentano una superficie variabile da un massimo di 15.000 m<sup>2</sup> ad un minimo di 300 m<sup>2</sup>.

Come condizione al contorno è stata applicata, lato mare, l'onda climatica equivalente di altezza d'onda significativa  $H_s = 2.0$  m, periodo di picco  $T_p = 8.0$  s e direzione di provenienza 199 °N.

La griglia è sufficientemente ampia da escludere gli effetti di bordo dovuti alle condizioni al contorno nella zona di interesse in prossimità dell'imboccatura portuale.

La circolazione idrodinamica è stata risolta con il modello D-FLOW FM utilizzando un dominio di calcolo di estensione più limitata che si estende dal bacino della Lanterna a Levante fino a Vernazzola a Ponente e comprende il Porto Vecchio, il bacino delle Grazie e l'avamposto del Porto di Genova.

In Figura 4-3 è rappresentata la griglia di calcolo, non strutturata, utilizzata per effettuare le simulazioni idrodinamiche con il modello Delft3D D-FLOW-FM, costituita da 15272 nodi per un totale 14612 elementi di forma quadrangolare.

Lungo il contorno lato mare della griglia di calcolo è stata imposta una variazione di livello dovuta alla marea astronomica (ampiezza +/- 10 cm). Ai lati della griglia di calcolo è stato imposto un gradiente nullo del livello idrico trasversalmente alla costa (condizione di Neumann).

Le profondità nei nodi delle griglie di calcolo sono state definite sulla base delle carte nautiche e dei più recenti dati batimetrici a disposizione, compresi quelli relativi al recente rilievo batimetrico condotto nell'ambito del presente progetto di fattibilità, che ha riguardato lo specchio di mare prospiciente alla diga foranea del Porto di Genova.

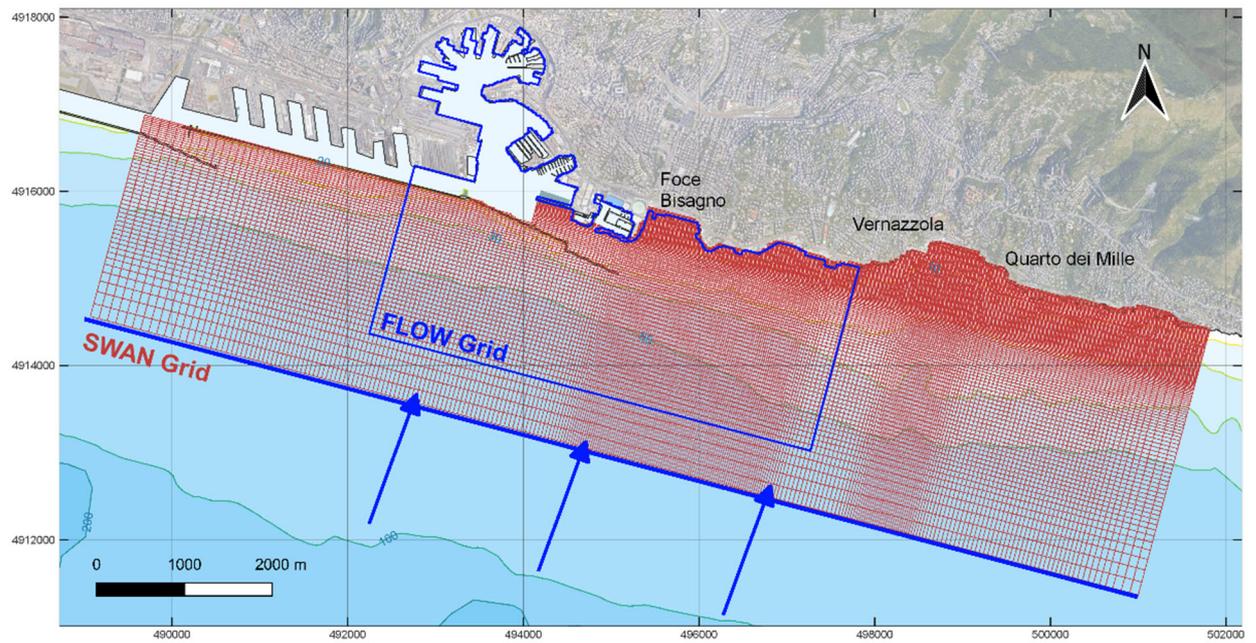


FIGURA 4-1 – GRIGLIA DI CALCOLO UTILIZZATA PER LA PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO CON IL MODELLO D-WAVES (SWAN) CON INDICAZIONE DEL DOMINIO DI CALCOLO UTILIZZATO DEL MODELLO D-FLOW.

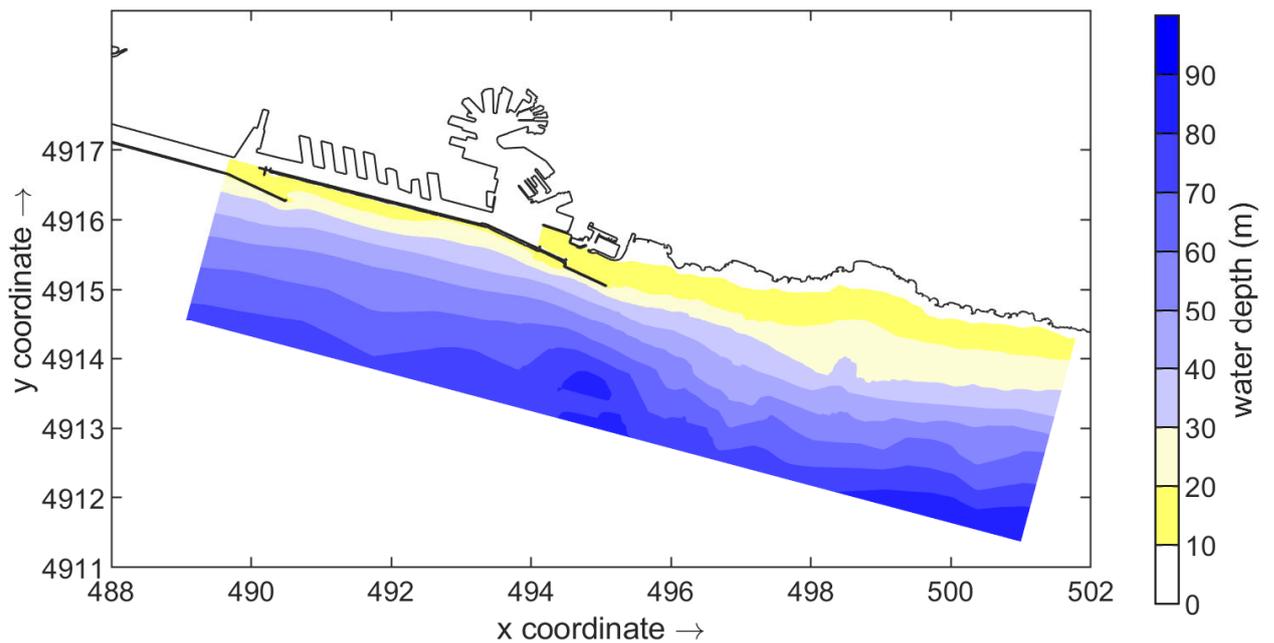


FIGURA 4-2 – PROFONDITÀ ALL'INTERNO DEL DOMINIO DI CALCOLO DEL MODELLO D-WAVES PER LA PROPAGAZIONE DEL MOTO ONDOSO.

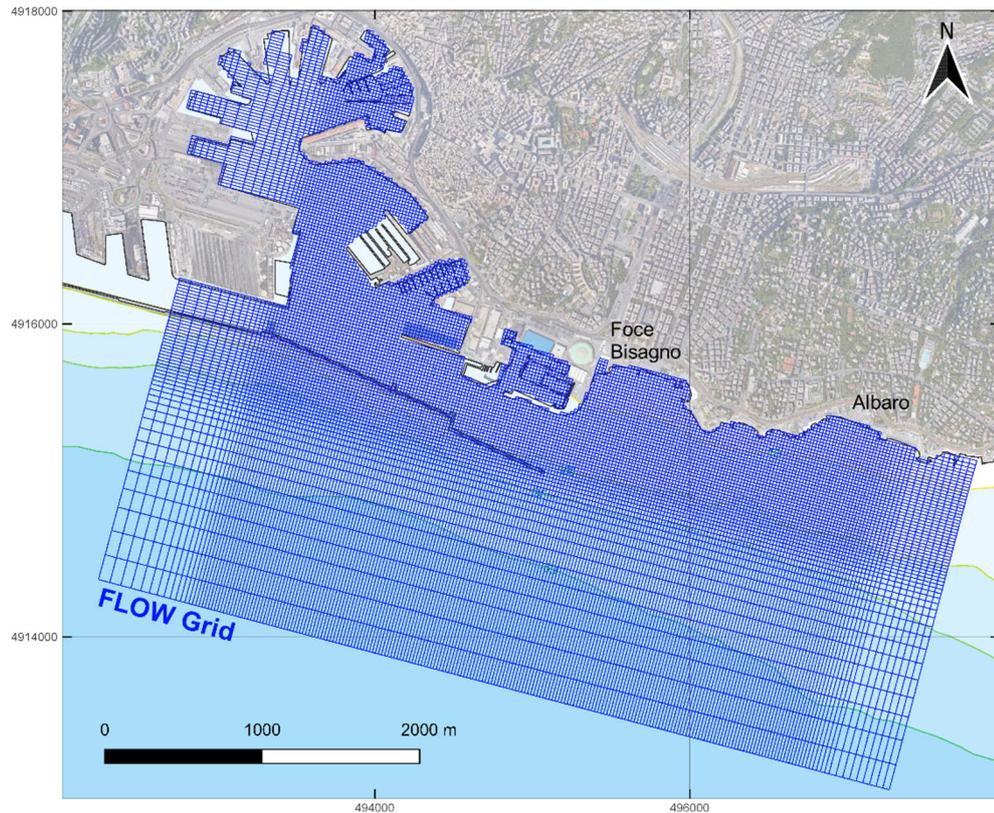


FIGURA 4-3-GRIGLIA DI CALCOLO UTILIZZATA PER LE SIMULAZIONI IDRODINAMICHE CON IL MODELLO D-FLOW-FM.

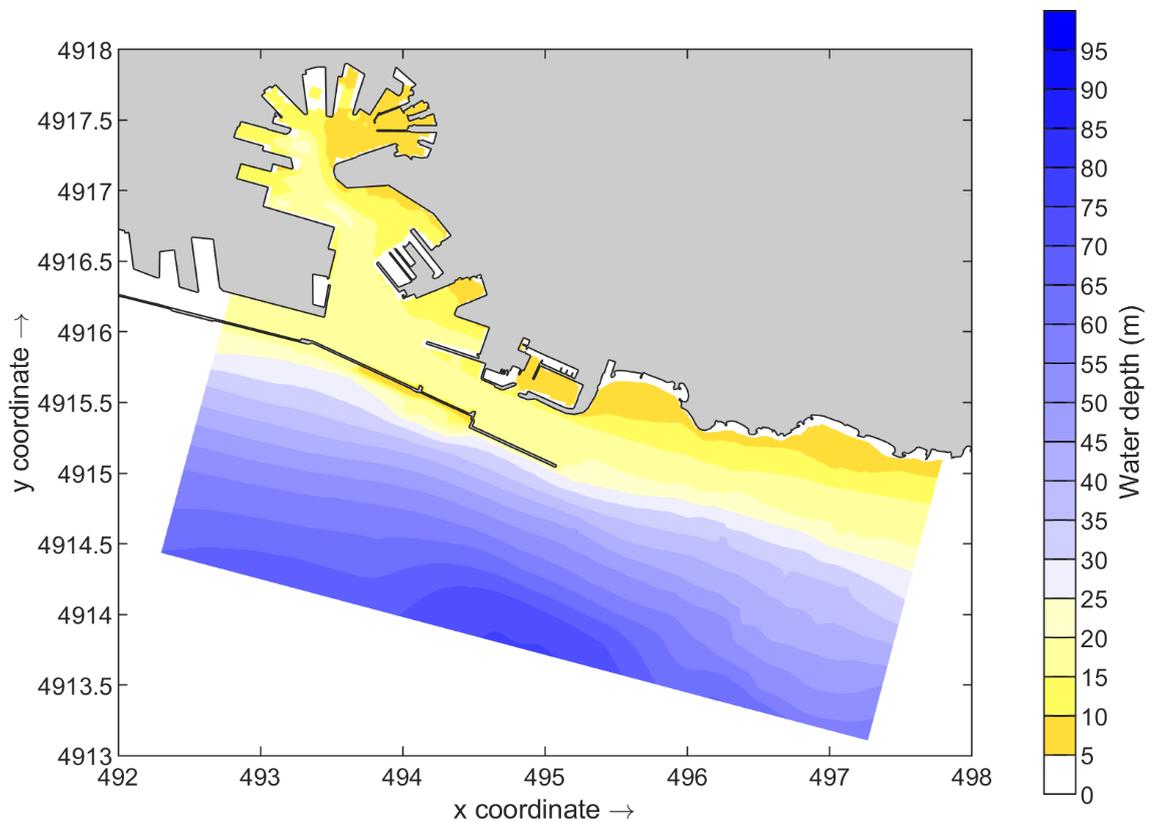


FIGURA 4-4 - PROFONDITÀ ALL'INTERNO DEL DOMINIO DI CALCOLO DEL MODELLO IDRODINAMICO D-FLOW-FM.

### 4.3. Risultati delle simulazioni con il modello idrodinamico integrato

In Figura 4-5 sono mostrati i risultati ottenuti con il modello D-WAVES (SWAN) per lo stato attuale relativi alla propagazione dello stato di mare rappresentativo dell'onda climatica equivalente di altezza d'onda significativa  $H_s = 2.0$  m, periodo di picco  $T_p = 8.0$  s e direzione di provenienza  $199^\circ\text{N}$ .

Allo stesso modo in Figura 4-6 sono mostrati i risultati ottenuti per la configurazione di progetto rappresentata dalla Soluzione S3.

A causa della conformazione della costa a levante del porto, caratterizzata dalla presenza di insenature delimitate da promontori rocciosi o da elementi di natura antropica, l'azione del moto ondoso sul litorale risulta molto variabile.

In Figura 4-7 è presentato il campo di circolazione idrodinamica per lo stato attuale indotto dallo stato di mare rappresentativo della risultante del clima di moto ondoso. Allo stesso modo in Figura 4-8 sono presentati i risultati della simulazione idrodinamica per la configurazione di progetto S3.

Le correnti indotte dal moto ondoso frangente si concentrano all'interno delle insenature situate lungo il litorale presentando una circolazione a "celle" che non determina un significativo trasporto solido potenziale.

La Figura 4-9 mostra la variazione dell'altezza d'onda significativa  $H_s$  indotta dalla nuova diga foranea ottenuta a seguito della propagazione dello stato di mare rappresentativo del clima di moto ondoso risultante su base annua, proveniente da libeccio.

Le simulazioni hanno confermato che la nuova diga foranea prevista dalla soluzione di progetto S3, relativamente allo stato di mare rappresentativo della risultante del clima di moto ondoso, proveniente da Libeccio, determina una variazione del moto ondoso, dell'ordine del 5-10%, limitata allo specchio acqueo compreso tra l'imboccatura di Levante e Punta Vagno.

Di conseguenza, come mostrato nel diagramma di Figura 4-10, solo in prossimità della foce del Bisagno si osserva una variazione della circolazione indotta dal moto ondoso prevalente con un incremento del flusso longitudinale diretto verso Ovest da Punta Vagno alla foce.

Pertanto è possibile che nel lungo termine la spiaggia possa trovare un nuovo assetto planimetrico, compatibile con la nuova risultante del moto ondoso, ruotando di qualche grado in senso antiorario.

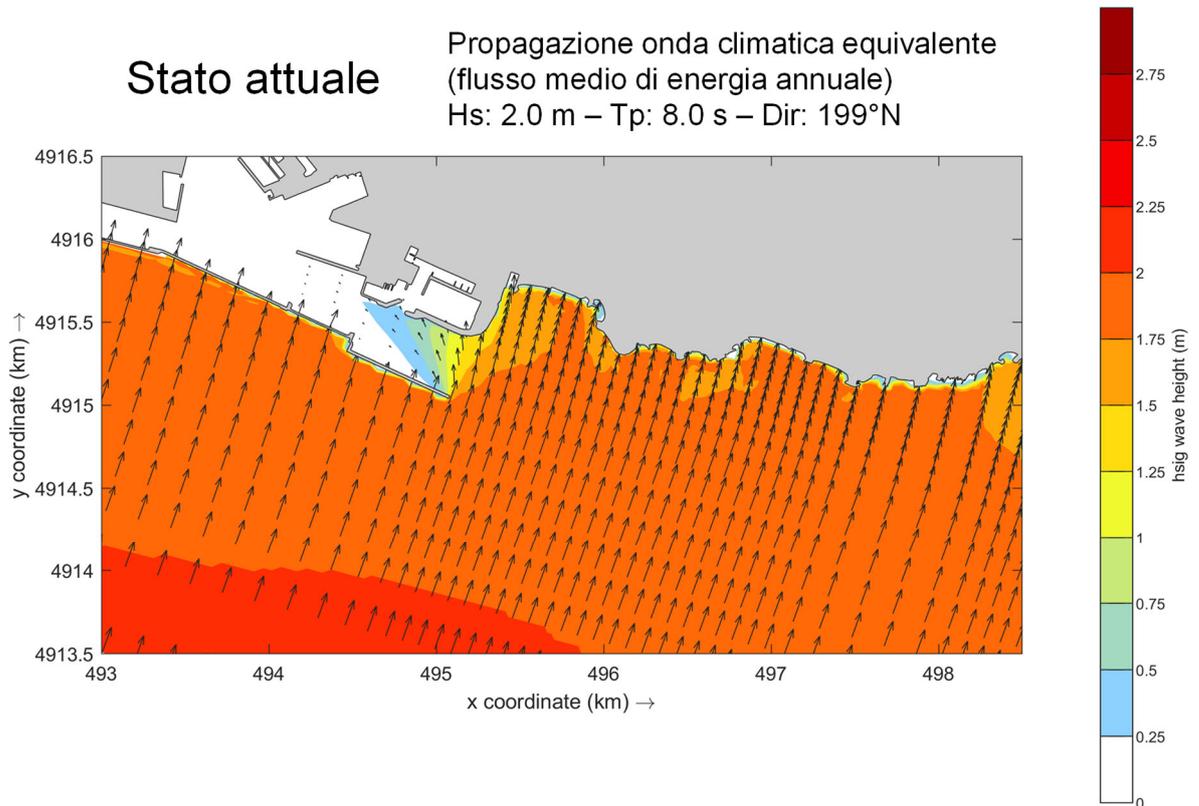


FIGURA 4-5 - RISULTATO DELLA PROPAGAZIONE DELL'ONDA CLIMATICA EQUIVALENTE PER LO STATO ATTUALE.

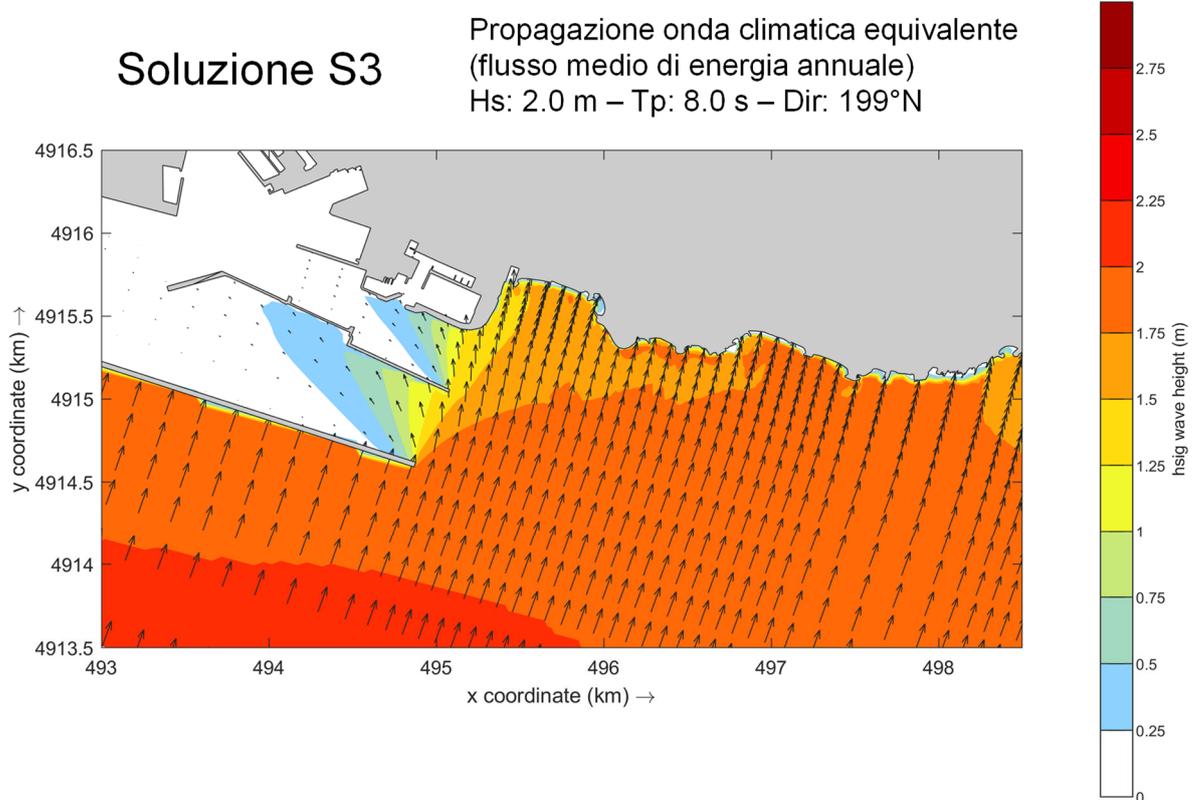


FIGURA 4-6 – RISULTATO DELLA PROPAGAZIONE DELL'ONDA CLIMATICA EQUIVALENTE PER LA SOLUZIONE DI PROGETTO S3.

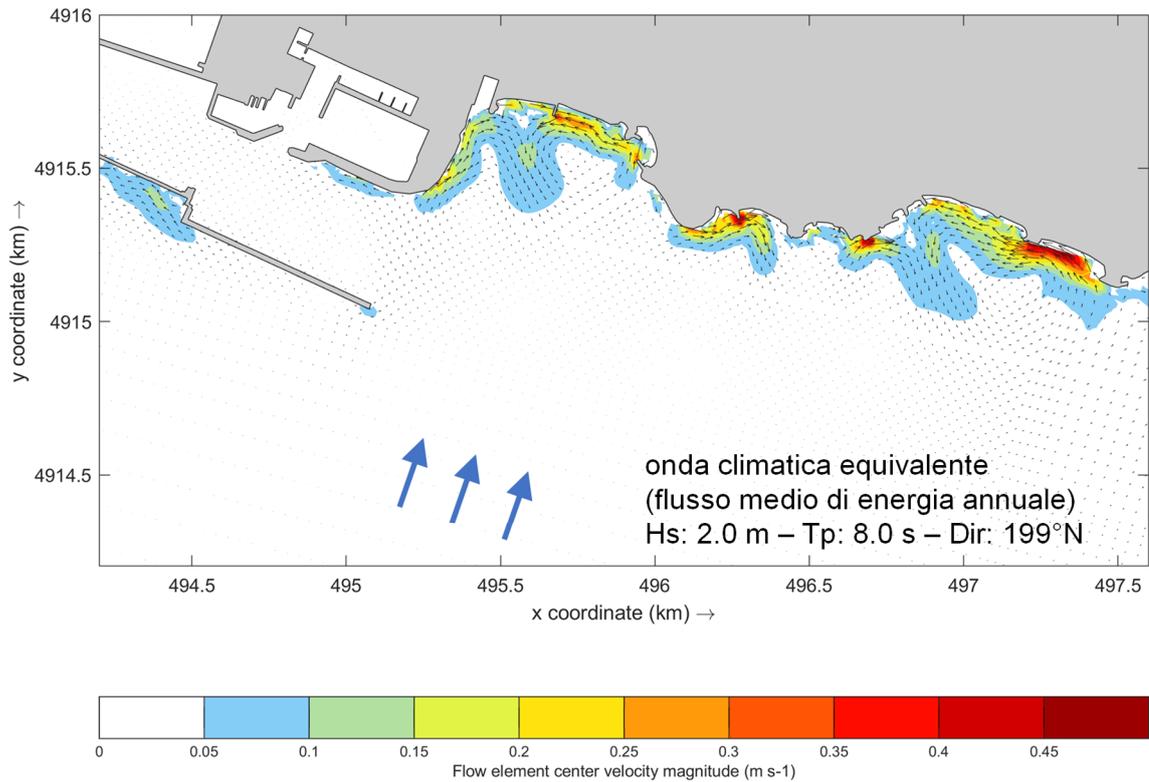


FIGURA 4-7 - STATO ATTUALE – CIRCOLAZIONE IDRODINAMICA INDOTTA DALLO STATO DI MARE RAPPRESENTATIVO DELL'ONDA CLIMATICA EQUIVALENTE

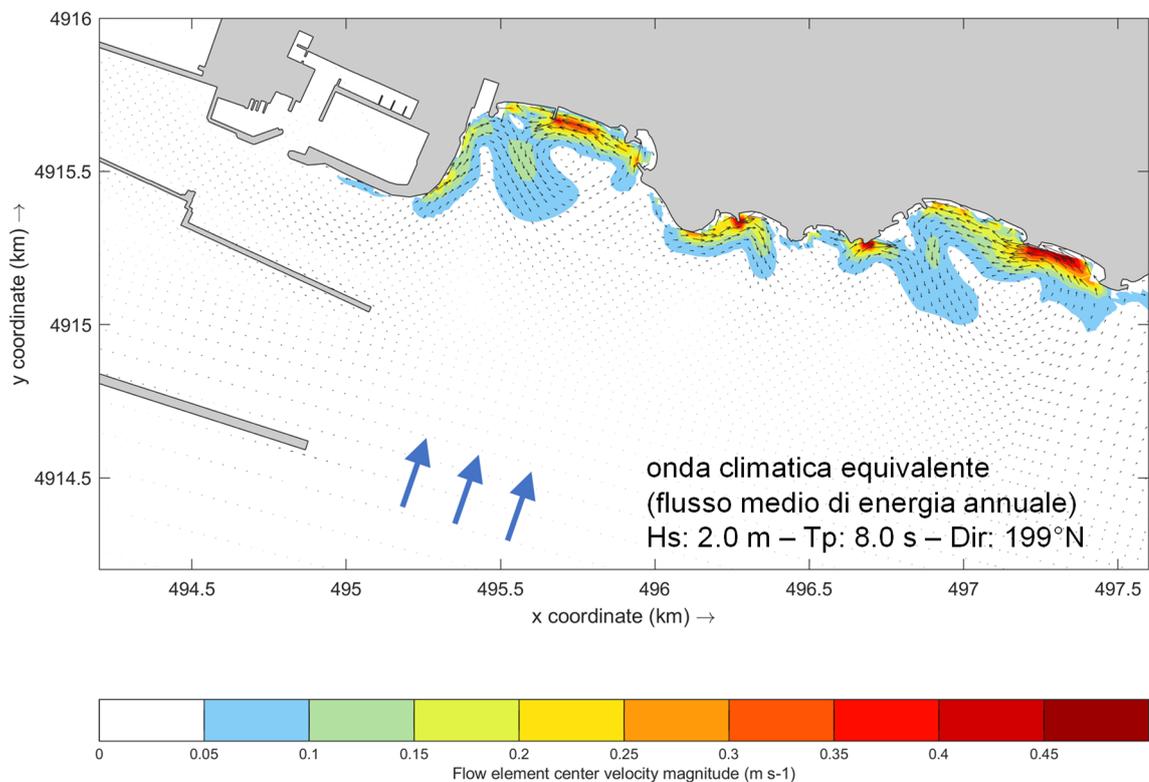


FIGURA 4-8 – SOLUZIONE DI PROGETTO S3 - CIRCOLAZIONE IDRODINAMICA INDOTTA DALLO STATO DI MARE RAPPRESENTATIVO DELL'ONDA CLIMATICA EQUIVALENTE

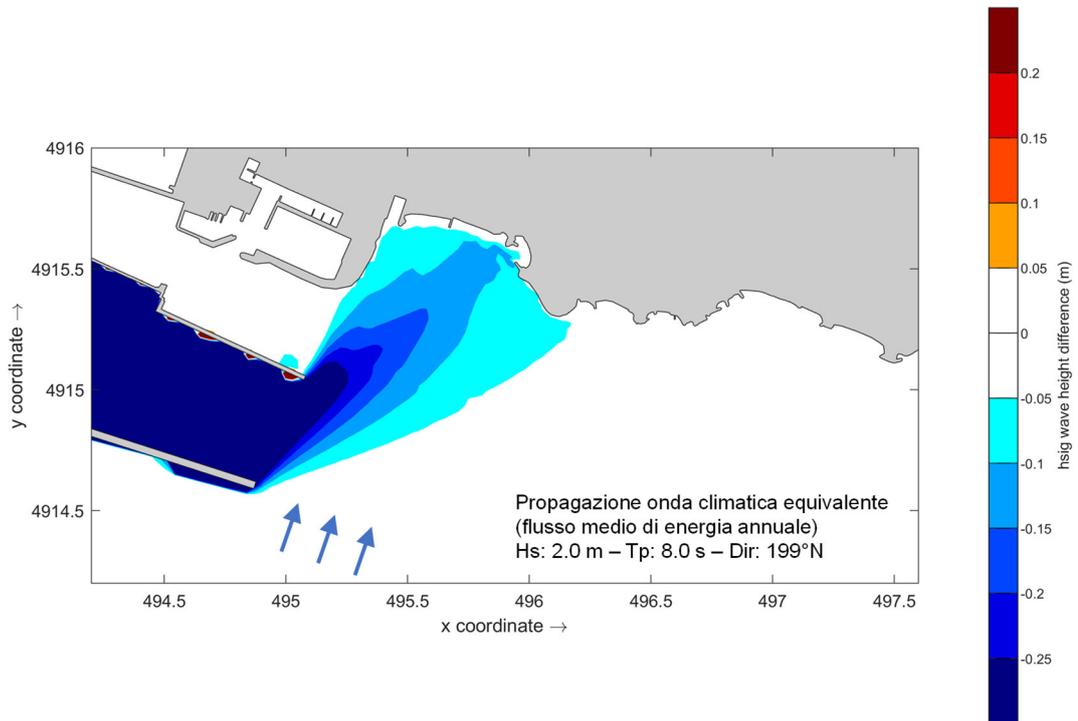


FIGURA 4-9 – VARIAZIONE DEL CAMPO DI ALTEZZA D’ONDA SIGNIFICATIVA OTTENUTO PER LO STATO DI MARE RAPPRESENTATIVO DELL’ONDA CLIMATICA EQUIVALENTE SOTTOFLUTTO ALL’IMBOCCATURA DI LEVANTE IN PRESENZA DELLA NUOVA DIGA FORANEA PREVISTA DALLA SOLUZIONE DI PROGETTO S3.

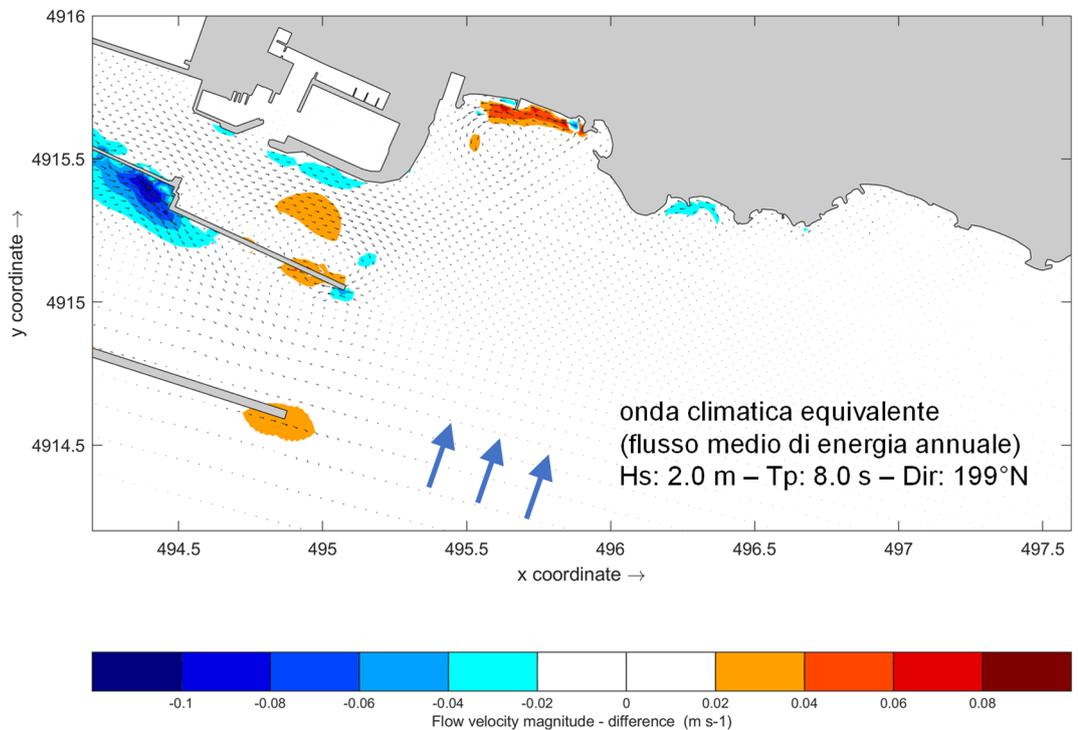


FIGURA 4-10 – VARIAZIONE DELLA CIRCOLAZIONE IDRODINAMICA INDOTTA DALLO STATO DI MARE RAPPRESENTATIVO DELL’ONDA CLIMATICA EQUIVALENTE IN PRESENZA DELLA NUOVA DIGA FORANEA PREVISTA DALLA SOLUZIONE DI PROGETTO S3.

#### 4.4. Applicazione del modello di spiaggia di Silvester e Hsu

Le analisi condotte in precedenza hanno evidenziato che, dal punto di vista del flusso longitudinale dei sedimenti indotto dal moto ondoso, l'influenza della nuova diga foranea si esaurisce in prossimità della foce del Bisagno dove è presente una piccola spiaggia, di estensione longitudinale di circa 500 m, delimitata a Levante della diga foranea del porto turistico di Genova e ad Ovest dal promontorio di Punta Vagno.

Le ortofoto desunte dal portale cartografico della Regione Liguria, relative agli anni 2000, 2010 e 2019, riportate nelle seguenti figure, consentono di ricostruire la recente evoluzione di questo tratto di costa.



FIGURA 4-11. ORTOFOTO 2000 – FONTE: PORTALE CARTOGRAFICO REGIONE LIGURIA

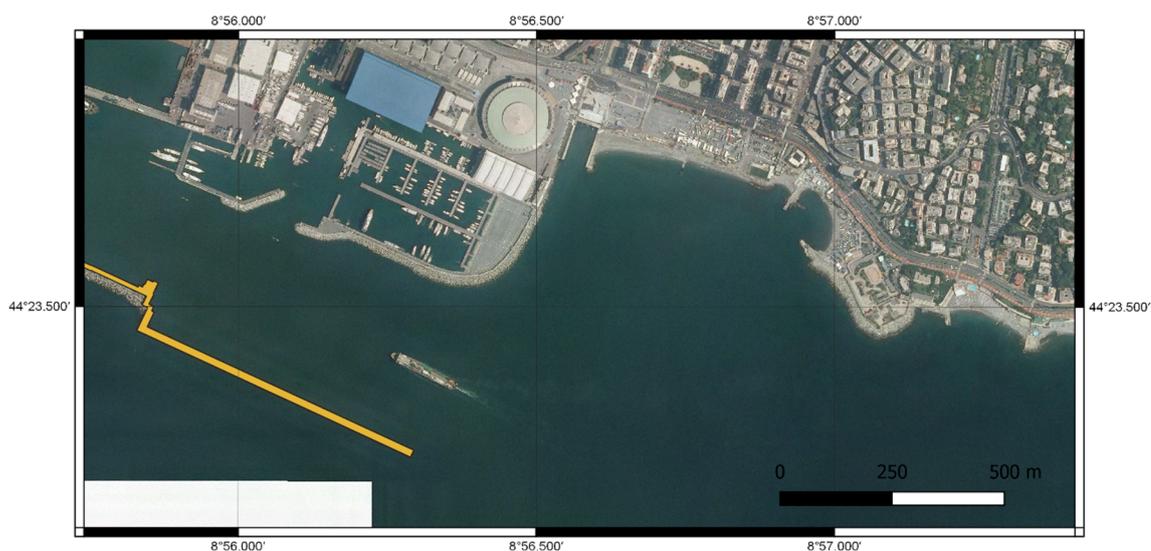


FIGURA 4-12. ORTOFOTO 2010 – FONTE: PORTALE CARTOGRAFICO REGIONE LIGURIA



FIGURA 4-13. ORTOFOTO 2019 – FONTE: PORTALE CARTOGRAFICO REGIONE LIGURIA.

La ripresa aerea di Figura 4-11 mostra che nel 2000 non era presente un vero e proprio arenile, la costa era difesa da un'opera radente e solo in prossimità della foce del Bisagno, che non era regimentata come oggi, era presente un esiguo accumulo di sedimenti che si addossava al molo sopraflutto del vecchio porto turistico.

La ripresa aerea di Figura 4-12 mostra l'evoluzione di questo tratto di costa a seguito della realizzazione del nuovo porto turistico, della foce armata del Bisagno e degli interventi di ripascimento che hanno consentito la formazione di una spiaggia di origine antropica con un larghezza di circa 20-25 m.

Le recente ripresa aerea del 2019, riportata in Figura 4-13, mostra che nel tempo la spiaggia ha mantenuto un equilibrio dell'assetto planimetrico preservando la sua larghezza di spiaggia.

L'assetto della spiaggia osservato nel 2019 mostra anche l'effetto del noto evento di mareggiata verificatosi ad Ottobre 2018, proveniente da Scirocco, che ha flagellato questo tratto litorale e che ha certamente determinato una rotazione della spiaggia che nel tempo verrà riportata verso la sua condizione di equilibrio.

In ragione di tale considerazione le successive analisi per la valutazione del profilo di equilibrio di spiaggia sono state effettuate sulla base della ortofoto del 2010.

La conformazione planimetrica della spiaggia presenta un assetto tipico delle falciate sabbiose la cui evoluzione è "controllata" ad un estremo da un promontorio o da un elemento antropico, come lo è nel caso in esame la diga foranea esistente, che determina una zona schermata dal moto ondoso che provoca un assetto curvilineo della linea di riva nella zona d'ombra.

A seguito della realizzazione della nuova diga verrà modificata la posizione del punto di diffrazione del moto ondoso ed è possibile che la spiaggia possa trovare un nuovo assetto planimetrico, compatibile con la risultante del moto ondoso, ruotando di qualche grado in senso antiorario.

Per valutare le variazioni dell'assetto planimetrico della spiaggia è stato pertanto applicato il modello di equilibrio proposto da Silvester e Hsu (1987).

Secondo il modello semi empirico di Silvester e Hsu in presenza di una falcata sabbiosa semi-infinita, con un apporto libero e non limitato di materiale solido, la cui evoluzione è "controllata" ad un estremo da un promontorio (elemento di diffrazione/ostacolo), il litorale raggiunge all'equilibrio una configurazione planimetrica di forma parabolica la quale presenta in generale la seguente equazione:

$$\frac{R}{R_0} = C_0 + C_1 \left(\frac{\beta}{\theta}\right) + C_2 \left(\frac{\beta}{\theta}\right)^2 \quad (1)$$

il significato dei simboli nell'equazione è definito nello schema di Figura 4-14.

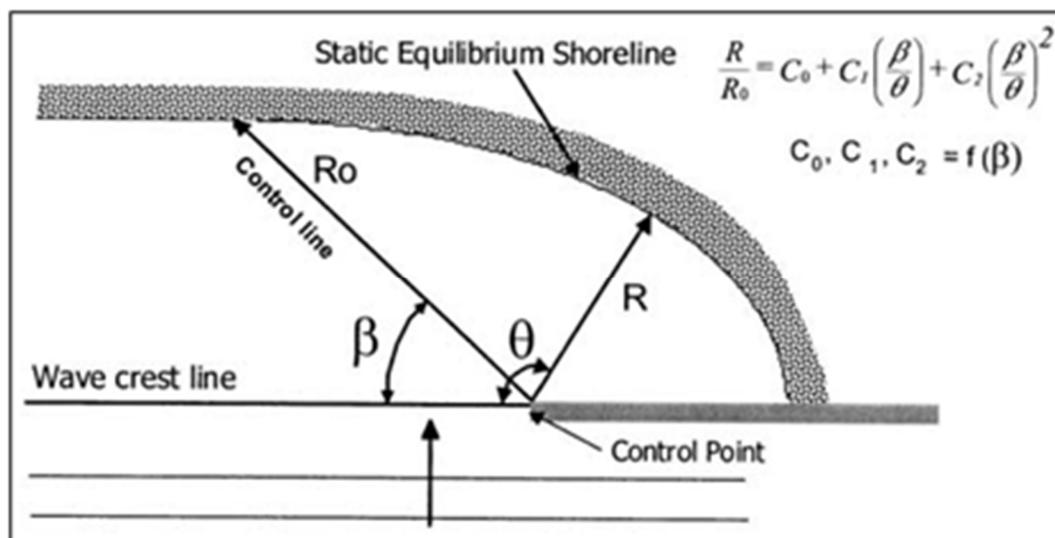


FIGURA 4-14. LITORALE IN EQUILIBRIO STATICO SECONDO LA TEORIA DI SILVESTER E HSU

I coefficienti  $C_0$ ,  $C_1$  e  $C_2$  sono stati determinati sulla base dell'osservazione di numerose spiagge da Hsu e Evans (1989) e i loro valori sono indicati in funzione dell'angolo  $\beta$  nel grafico di Figura 4-15.

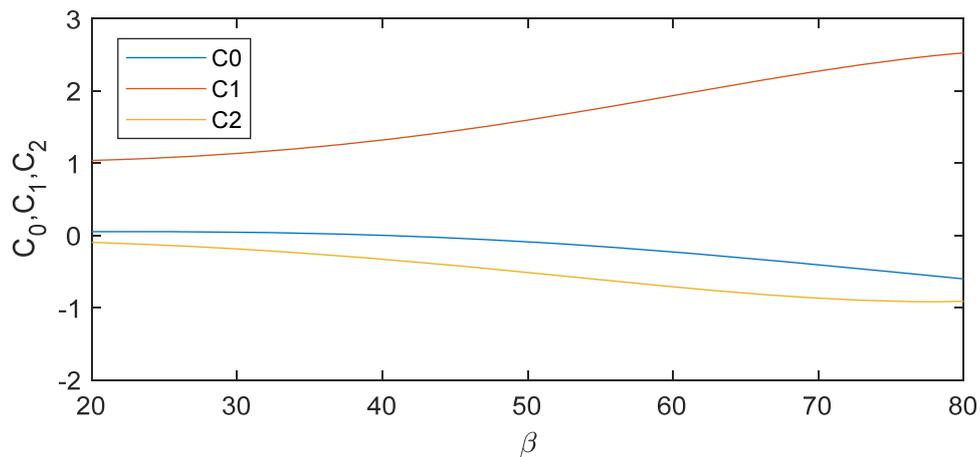


FIGURA 4-15. VALORE DEI COEFFICIENTI  $C_0, C_1$  E  $C_2$  PROPOSTI DA HSU E EVANS (1989)

Nel caso in esame la conformazione morfologica del litorale non rientra propriamente nelle ipotesi di base per l'applicazione del modello empirico parabolico di Silvester e Hsu e pertanto risulta difficile l'individuazione dei parametri geometrici che descrivono l'equazione.

Per una corretta applicazione del modello è stato necessario fare riferimento al criterio di taratura sviluppato da Medina e Gonzales (Coastal Engineering 43, 2001 - 209÷225) che consente di applicare il profilo di equilibrio di spiaggia per casi reali di spiagge confinate, di origine naturale o antropica, che non raggiungono il punto di equilibrio sottoflutto ( $P_0$ ). Lo schema del procedimento per la valutazione del profilo di equilibrio proposto da Medina e Gonzales è riportata nella seguente Figura 4-16.

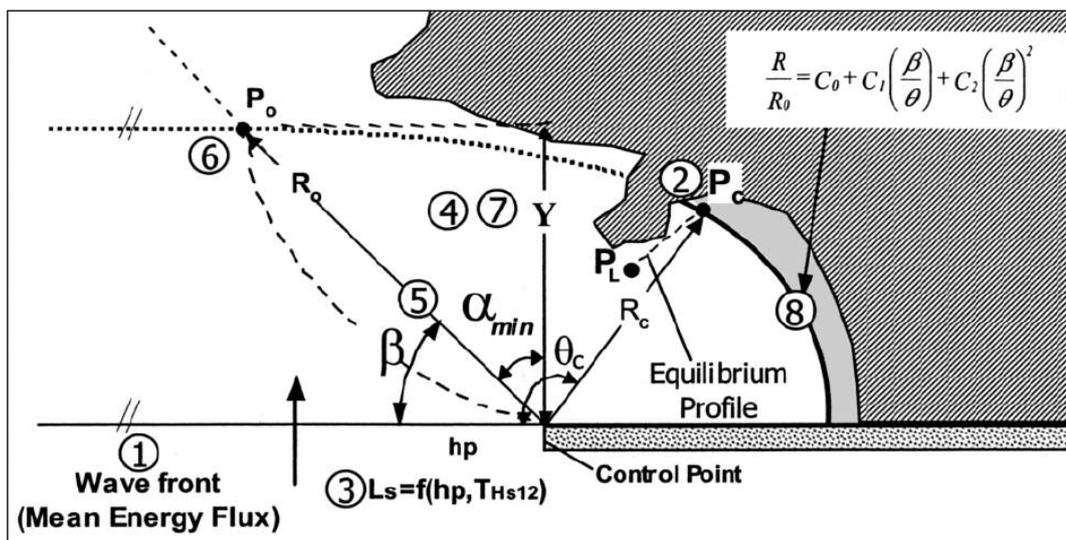


FIGURA 4-16 - SCHEMATIZZAZIONE DEL CRITERIO DI TARATURA DI MEDINA E GONZALES

Per il tracciamento del profilo di equilibrio di spiaggia è necessario determinare i parametri incogniti  $\beta$  e  $R_0$  che in assenza di una falcata semi-infinita sono di difficile identificazione.

Il metodo di Medina e Gonzales consente, a seguito di una procedura iterativa, di individuare i valori dell'angolo limite  $\beta$  e del raggio limite  $R_0$  necessari per il tracciamento della curva parametrizzata.

L'applicazione del profilo di equilibrio di spiaggia è stata condotta distinguendo le seguenti due fasi.

*Fase di validazione-calibrazione:* sulla base delle ortofoto più recenti, è stata dapprima verificata l'opportunità di modellare l'andamento del tratto di litorale in oggetto con una parabola avente una equazione del tipo sopra riportato. Successivamente applicando il metodo di Medina e Gonzales, come meglio descritto in seguito, sono stati individuati i parametri  $\beta$  ed  $R_0$  incogniti.

*Fase di previsione:* sulla base dei parametri precedentemente determinati, considerando la presenza della nuova diga foranea prevista dalla configurazione di progetto, sotto l'ipotesi di un'invarianza delle condizioni medie di esposizione del moto ondoso, è stato tracciato il profilo di equilibrio di spiaggia atteso.

#### 4.4.1. Fase di validazione-calibrazione

Nella prima fase è stata presa in considerazione la configurazione attuale del tratto di costa a Levante del porto di Genova e la linea di riva digitalizzata dalla ripresa aerea scattata nel 2010.

Al fine di ottenere l'equazione della curva parametrica che approssimi al meglio il reale andamento della linea di riva presa in considerazione, con riferimento allo schema di Figura 4-16, sono stati seguiti i seguenti passaggi:

1. è stata assunta come forzante di moto ondoso, il clima di moto ondoso prevalente su base annuale sottocosta, rappresentato dal flusso di energia medio precedente calcolato che presenta una direzione di  $199^\circ\text{N}$ ;
2. sono stati opportunamente scelti dei punti  $P_c = f(R_c, \theta_c)$  per i quali è stato imposto il passaggio della curva del Silvester e Hsu;
3. è stata definita la lunghezza d'onda  $L_s$  associata al periodo significativo  $T_s$ , stimato in 8.0 secondi per la risultante energetica su base annuale, in corrispondenza della testata della diga foranea, assumendo un fondale medio di 30 m lungo il fronte d'onda incidente;

4. è stato quindi preso in considerazione un valore ipotetico del parametro  $Y$ , che rappresenta la distanza di arretramento della linea di riva rispetto al punto di diffrazione;
5. è stato calcolato il parametro  $\alpha_{min} = f(Y/Ls)$  e di conseguenza il valore dell'angolo  $\beta$ ;
6. utilizzando il valore di  $\beta$  di prima iterazione è stata stimata l'incognita  $R_0$  che consente il tracciamento della curva parabolica descritta dall'equazione (1);
7. viene ricalcolato il parametro  $Y' = R_0 \cos \alpha_{min}$ , se la differenza tra  $Y$  e  $Y'$  è molto grande la procedura viene ripetuta utilizzando come valore di ingresso  $Y'$ .

Una volta individuato il fuoco di diffrazione (coincidente con la testata dell'attuale diga foranea ed evidenziato con un cerchio giallo in Figura 4-17) e selezionato il punto  $P_c(R_c, \theta_c)$  applicando la suddetta procedura iterativa è stato possibile ricavare i valori incogniti  $R_0 = 915$  m e  $\beta = 62^\circ$ .



FIGURA 4-17 – DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI DELL'EQUAZIONE DI EQUILIBRIO DEL PROFILO DI SPIAGGIA DI SILVESTER E HSU PER LA CONFIGURAZIONE ATTUALE (2010).

Dopo aver determinato tali valori è stato possibile tracciare la curva parametrica corrispondente, la quale viene riportata in Figura 4-18.

Come è possibile verificare analizzando la figura, l'andamento della parabola approssima molto bene quello della linea di riva. La figura mette inoltre in evidenza l'orientamento del tratto di spiaggia di Albaro che risulta anch'essa perfettamente orientata secondo la risultante del flusso medio di energia su base annuale.



FIGURA 4-18 -TRACCIAMENTO DELLA CURVA PARAMETRICA RAPPRESENTATIVA DEL PROFILO DI EQUILIBRIO DI SILVESTER E HSU PER LA CONFIGURAZIONE ATTUALE.

#### 4.4.2. Fase di previsione

Nella seconda fase, sulla base dei parametri precedentemente determinati, è stato simulato l'effetto della nuova testata della diga foranea prevista da progetto al fine di verificare se l'introduzione delle nuove opere potrà determinare una variazione significativa del profilo di equilibrio di spiaggia.

Sulla base dei parametri determinati nella fase precedente, e facendo riferimento al nuovo posizionamento planimetrico del punto di controllo determinato dalla testata della nuova diga foranea, è stata calcolata la possibile configurazione della futura linea di riva, rappresentata in Figura 4-19, applicando l'equazione del profilo di equilibrio di spiaggia di Silvester e Hsu.

Per il tracciamento della curva, è stato imposto il passaggio per il punto sottocosta  $P_0$  precedentemente determinato ed è stato spostato il punto di controllo in corrispondenza della nuova testata ottenendo così i seguenti parametri per la curva parametrica:  $R_0 = 1381$  m e  $\beta = 70^\circ$ .

I risultati ottenuti confermano che la variazione della linea di riva attesa a seguito della realizzazione della nuova diga foranea, sotto l'ipotesi che il clima di moto ondoso non subisca variazioni significative nel prossimo futuro, è piuttosto contenuta.

Il profilo di equilibrio della linea di riva, a seguito della realizzazione della nuova diga foranea, è disposto secondo un orientamento pressoché simile a quello attuale. Le variazioni più significative si potranno verificare in prossimità della foce del Bisagno, nella zona più ridossata dalla nuova diga foranea, dove, se fosse presente un sufficiente volume di sedimenti, la posizione potenziale della linea di riva di equilibrio risulterebbe avanzata di circa 5-15 m rispetto alla situazione attuale. Ciò nonostante, considerata la natura prettamente grossolana dei sedimenti che costituiscono la spiaggia in esame, gli scarsi apporti solidi al litorale in esame, e la presenza delle opere di difesa radente esistenti, si ritiene che tali variazioni saranno più contenute.



FIGURA 4-19 – TRACCIAMENTO DELLA CURVA PARAMETRICA RAPPRESENTATIVA DEL PROFILO DI EQUILIBRIO DI SILVESTER E HSU A SEGUITO DELLA REALIZZAZIONE DELLA NUOVA DIGA FORANEA PREVISTO DALLA SOLUZIONE S3.