

COMMITTENTE



**AUTORITA' PORTUALE DI PALERMO**  
Porti di Palermo e Termini Imerese

## LAVORI DI COMPLETAMENTO DEL MOLO FORANEO DI SOPRAFLUTTO DEL PORTO DI TERMINI IMERESE

### PROGETTO DEFINITIVO PROGETTO GENERALE

TITOLO

#### RELAZIONE TECNICHE STUDIO DELLA DINAMICA DELLE COSTE

ELABORATO	SCALA	NS. RIF	RIF. ARC. - NA4
B.5	-	B_5.doc	AUTAPA11 - 73

DATA	REVISIONE	REDATTORE	CONTROLLO	APPROVAZIONE
17 giugno 2013	emissione	AL	GI	EC



**AUTORITA' PORTUALE DI PALERMO**  
Porti di Palermo e Termini Imerese

#### PROGETTAZIONE IMPIANTI

Ing. Salvatore Acquista  
Ing. Enrico Petralia

*Collaboratori per la progettazione  
degli impianti*

Geom. Vincenzo D'Amico  
Geom. Antonino Martorana

IL RESPONSABILE  
DEL PROCEDIMENTO  
Ing. Sergio La Barbera

COORDINATORE PER  
LA SICUREZZA IN FASE  
DI PROGETTAZIONE

Ing. Paolo Tusa



#### IL PROGETTISTA

*Responsabile dell'integrazione  
tra le prestazioni specialistiche*  
Ing. Elio Ciralli

*Coordinamento*  
Ing. Giancarlo Inserra

*Collaboratori*  
Arch. Ivana Lorenzano  
Ing. Alfredo Lucarelli

**AUTORITA' PORTUALE DI PALERMO**  
***Porti di Palermo e Termini Imerese***

**LAVORI DI COMPLETAMENTO DEL MOLO FORANEO  
DI SOPRAFLUTTO DEL PORTO DI TERMINI IMERESE**

**PROGETTO DEFINITIVO  
PROGETTO GENERALE**

**STUDIO DELLA DINAMICA DELLA COSTA**

**GIUGNO 2013**

VERSIONE:	DESCRIZIONE:	PREPARATO:	APPROVATO:	DATA:
01	EMISSIONE	AL	GI	17 GIU 2013
NOME FILE: B5.DOC			DISTRIBUZIONE: RISERVATA	

## INDICE

---

<b>1. PREMESSA .....</b>	<b>2</b>
<b>2. METODOLOGIA GENERALE DI INDAGINE .....</b>	<b>3</b>
<b>3. DESCRIZIONE DELL'UNITA' E DELLA SUB-UNITA' FISIOGRAFICA .....</b>	<b>5</b>
<b>4. STATO DI FATTO E TENDENZE EVOLUTIVE .....</b>	<b>10</b>
4.1 DATI CLIMATOLOGICI .....	10
4.2 LIVELLI IDRICI OSSERVATI .....	11
4.2.1 <i>marea astronomica</i> .....	12
4.3 IL CLIMA D'ONDA E VALUTAZIONI ENERGETICHE .....	13
4.4 STIMA DELLA PROFONDITA' DI CHIUSURA .....	15
4.5 STUDIO IDROLOGICO-IDRAULICO .....	15
4.6 STUDI SEDIMENTOLOGICI .....	16
4.7 STUDIO DEL REGIME IDRODINAMICO.....	17
4.7.1 <i>Obiettivi</i> .....	17
4.7.2 <i>Modello di calcolo</i> .....	17
4.7.3 <i>Condizioni al contorno</i> .....	18
4.7.4 <i>Dominio di calcolo</i> .....	20
4.7.5 <i>Condizioni al contorno implementate</i> .....	21
4.7.6 <i>Tendenze idrodinamiche simulate</i> .....	22
4.8 EVOLUZIONE DELLA LINEA DI RIVA .....	24
4.8.1 <i>Evoluzione della linea di riva dal 1955 al 1998</i> .....	24
4.8.1 <i>L'evoluzione della linea di riva dal 1998 al 2003.</i> .....	28
4.8.2 <i>L'evoluzione della linea di riva dal 2003 a oggi</i> .....	36
4.8.3 <i>Conclusioni sull'evoluzione della linea di riva</i> .....	38
4.9 ANALISI DEL TRASPORTO SOLIDO CROSS-SHORE.....	38
4.9.1 <i>SCELTA DELLE CONDIZIONI AL CONTORNO ED INIZIALI</i> .....	39
4.9.2 <i>SIMULAZIONI EFFETTUATE</i> .....	42
4.9.3 <i>Conclusioni</i> .....	53
4.10 ANALISI DEL TRASPORTO SOLIDO LONG-SHORE .....	54
4.10.1 <i>Finalità</i> .....	54
4.10.2 <i>Il modello di calcolo PTM</i> .....	54
4.10.3 <i>APPLICAZIONE DEL MODELLO PTM</i> .....	58
4.11 TENDENZE EVOLUTIVE NELLA SITUAZIONE ATTUALE .....	63
<b>5. EFFETTI DEL PROGETTO SULLA DINAMICA DEI SEDIMENTI.....</b>	<b>64</b>
<b>6. CONCLUSIONI .....</b>	<b>70</b>

## 1. PREMESSA

---

L'Autorità Portuale di Palermo, a seguito di due distinte gare espletate, secondo i principi della procedura negoziata, ex art.125, comma 11, del D.Lgs 163/2006, e secondo il criterio dell'offerta economicamente più vantaggiosa, e in virtù dei finanziamenti regionali ex art. 111 della L.R.S. n. 11/2010, ha affidato:

- alla "Progetti e Opere S.R.L." il servizio di redazione del progetto definitivo dei "Lavori di completamento del molo foraneo di sopraflutto del porto di Termini Imerese";
- allo "Studio Mallandrino S.R.L." il servizio di redazione del progetto definitivo dei "Lavori di completamento del molo foraneo di sottoflutto del porto di Termini Imerese".

A supporto di tali progettazioni sono stati redatti una serie di studi specialistici, tra cui il presente elaborato "Studio della Dinamica della Costa".

Questo studio è stato redatto al fine di valutare la compatibilità delle nuove opere portuali in corso di progettazione con il regime traspo-deposizionale che caratterizza i litorali di Termini Imerese.

La necessità di questo studio nasce dalle seguenti considerazioni.

Qualsiasi intervento antropico costiero, sia esso radicato o radente la linea di riva, comporta una manomissione ed uno squilibrio della dinamica costiera precedente.

Ciò si esplicita in una serie di effetti ambientali concatenati ed interdipendenti, il più delle volte a caratteristica evolvente in funzione della facilità, o meno, di raggiungere un nuovo equilibrio dinamico.

Dal punto di vista ingegneristico devono essere compiuti tutti gli sforzi possibili ai fini di:

- prevedere con esattezza gli effetti provocati dalle nuove opere;
- attuare tutti i possibili rimedi ai fini della mitigazione degli impatti e dell'esclusione degli effetti inattesi, non proficui se non dannosi.

In una unità fisiografica, il regime di trasporto solido in prossimità della costa determina, ove ne occorrono le condizioni ed in concorso con altri fattori, le caratteristiche della linea di riva, soprattutto quando sia presente una componente superficiale di detrito alluvionale poco coeso.

La disponibilità di solido in sospensione che partecipi al naturale scambio con la fascia litoranea dipende dai rifornimenti che avvengono all'interno dell'unità fisiografica.

Il regime idrologico dei fiumi e dei torrenti, e quindi il regime di trasporto solido degli stessi è anch'esso componente fondamentale dell'argomento in questione.

Le variazioni indotte sul regime del trasporto solido marittimo e su quello solido fluviale comportano conseguenze, più o meno accentuate, in funzione delle variabili ambientali in gioco.

Lo squilibrio generato può evolvere o in un nuovo equilibrio o in un transitorio, anche molto lungo, dove il sistema litoraneo cercherà un nuovo assetto a seguito di notevoli cambiamenti morfologici.

Questi ultimi casi includono i purtroppo noti e frequenti fenomeni di erosione o di accrescimento (interrimento) di carattere patologico.

## 2. METODOLOGIA GENERALE DI INDAGINE

---

Nell'ingegneria costiera con il termine *morfodinamica* si intende l'evoluzione spazio-temporale della morfologia della spiaggia o anche di una forma morfologica della spiaggia quale la linea di riva, il profilo trasversale, o della barra sottomarina.

Si possono individuare le tre componenti fondamentali di uno studio rivolto alla modifica dei litorali:

- idrodinamica;
- trasporto solido iniziale;
- morfodinamica.

E' importante sottolineare che il passaggio dal trasporto solido iniziale alla morfodinamica costituisce tuttora una delle frontiere della ricerca che opera nel settore. Una delle principali difficoltà che si incontrano nello studio della morfodinamica dei fondali è causata dall'elevato grado di non linearità dei processi fisici coinvolti. Conseguentemente modesti errori nella definizione delle condizioni al contorno possono amplificarsi grandemente, causando il divergere dei risultati dalla realtà.

E' evidente che la riproduzione completa su modello, matematico o fisico, dei processi legati alla morfodinamica dei fondali richieda, pertanto, una completa descrizione dell'idrodinamica, delle proprietà del materiale di fondo e dei fenomeni di interazione tra matrice fluida e solida.

Lo studio del trasporto solido costiero risulta particolarmente articolato in quanto complessa è l'idrodinamica che lo governa. Infatti, il moto oscillatorio delle particelle fluide, indotto dalle onde di superficie, risulta accoppiato alla turbolenza e alla circolazione generale indotta dalle onde frangenti. E' possibile riconoscere nel trasporto solido costiero due componenti principali, individuate sulla base delle direzioni dominanti assunte dal trasporto stesso:

- trasporto solido trasversale alla linea di battigia denominato *cross-shore*;
- trasporto solido longitudinale parallelo alla linea di battigia denominato *long-shore*.

Il trasporto solido trasversale è causato principalmente dalla corrente indotta dal moto ondoso frangente, mentre il trasporto solido longitudinale è causato dalla corrente longitudinale indotta dalle onde frangenti.

Il trasporto solido longitudinale influisce in modo prevalente sull'evoluzione a lungo termine (anni) della morfologia di un litorale.

Tuttavia, occorre sempre ricordare che entrambe le modalità di trasporto sono contemporaneamente presenti su un litorale.

La complessa interazione tra i sedimenti e il fluido è causata, oltre che dalla turbolenza e dal moto oscillatorio delle particelle idriche, anche da altri fattori quali le variazioni del livello medio marino, la pendenza locale del fondale che influisce sulla stabilità dei sedimenti e la diversa granulometria del sedimento che costituisce la spiaggia.

In questo studio è stato dapprima riportato un riepilogo dei dati e delle informazioni utili per identificare le caratteristiche sedimentologiche, idrodinamiche ed traspo-deposizionali per il sito in esame. Alla luce di tali informazioni è stata, quindi, affrontata l'analisi diacronica al fine di evidenziare le tendenze evolutive che hanno interessato maggiormente il tratto di litorale in esame.

Le analisi sul trasporto solido sono state anche effettuate attraverso l'applicazione di specifici modelli di calcolo:

- *SBEACH*, per la previsione degli effetti *cross-shore* sul vettore del trasporto solido indotti dal moto ondoso;

- *ADCIRC*, associato ad *STWAVE*, per la previsione del regime idrodinamico indotto dal moto ondoso;
- *PTM*, per la previsione degli effetti long-shore del vettore di trasporto solido e delle tendenze di accumulo/erosione indotti dal regime idrodinamico e dal moto ondoso frangente.

### 3. DESCRIZIONE DELL'UNITÀ E DELLA SUB-UNITÀ FIOGRAFICA

Il sito portuale di Termini Imerese si colloca all'interno dell'unità fisiografica tra Capo Zafferano a ovest e Capo Cefalù a est.

In particolare esso è situato tra le foci del F. S. Leonardo e del F. Imera Settentrionale.

Altri corsi d'acqua di rilievo all'interno dell'unità fisiografica sono:

- il fiume Torto
- il torrente Barratina, avente foce in prossimità dell'attuale molo di sottoflutto.

Il tratto di costa compreso tra le foci del F. S. Leonardo e del F. Imera Settentrionale è stato inteso come sub-unità fisiografica sui cui insiste il porto di Termini Imerese.

Gli studi dell'ENEA del 2003 (cfr. "Elementi di Gestione Costiera", 2003), classificano il tratto di costa in esame principalmente come corrispondente ai morfotipi "Costa articolata" e "Costa di Litorale stretto".

La "costa articolata" è caratterizzata da rilievi montuosi o collinari affacciati direttamente sul mare. Il profilo sottomarino comunemente riproduce quello subaereo e, meno frequentemente, esibisce piattaforme di erosione. Il contatto terra – mare è eventualmente rappresentato da seni di spiaggia comunemente in ghiaia. Gli apporti solidi provengono da corsi d'acqua ad alto gradiente e da accumuli di frana e crollo della parete dei rilievi.

Secondo gli studi citati, a tale morfotipo corrisponde il tratto dell'unità fisiografica a ovest del Porto di Termini Imerese.

La "costa di litorale stretto" è relativamente poco pendente, di larghezza massima da qualche centinaio di metri a qualche chilometro. Il contatto terra–mare avviene su litorale ampio che comunemente disegna falciature di costa da grandi a molto grandi. Il retrolitorale è spesso rappresentato da sistemi di terrazzi fluviali e costieri. Gli apporti solidi provengono da corsi d'acqua ad alto gradiente che alimentano un'unità fisiografica costiera spesso delimitata da promontori.

A tale morfotipo corrisponde il tratto dell'unità fisiografica a est del Porto di Termini Imerese.

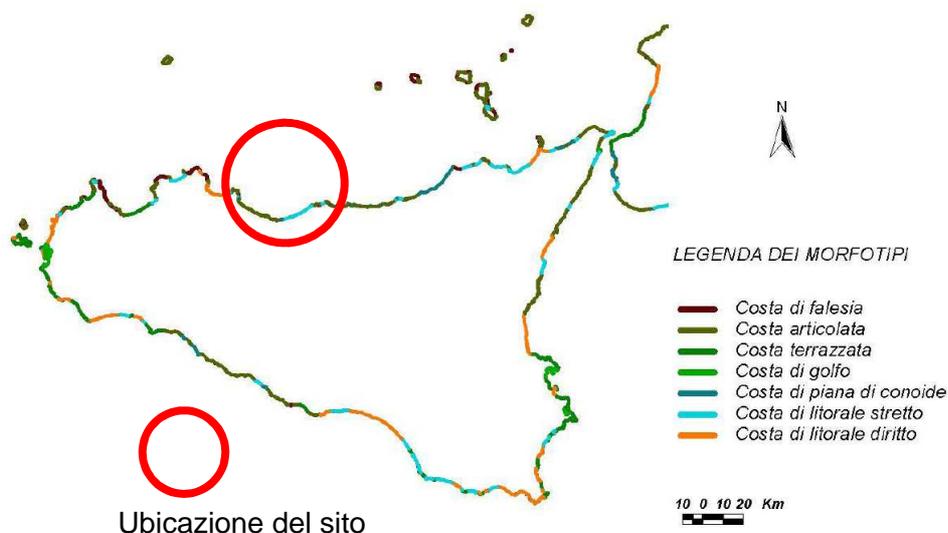


Figura 3.1 – Schema di riferimento per l'individuazione del morfotipo con indicazione del sito di interesse (Fonte: ENEA, 2003)

In generale, l'unità fisiografica è caratterizzata da un'alternanza di tratti di costa fortemente antropizzati, di zone ad alta valenza ambientale, di territori caratterizzati da un tessuto industriale e produttivo molto esteso, e di tratti di costa in cui sono presenti importanti insediamenti di carattere turistico-ricettivo.

Il tratto più occidentale dell'unità, a partire da Capo Zafferano, ha subito l'espansione dei grandi centri urbani limitrofi, che hanno esteso il loro tessuto spesso fin quasi la linea di riva. La vicinanza di questo territorio ai grandi centri urbani di Palermo e Bagheria ha reso nei decenni passati la costa della provincia di Palermo fortemente appetibile per coloro che avessero intenzione di costruire ville e case per il periodo balneare, spesso realizzate senza alcuna concessione ed invadendo anche la fascia demaniale: il fenomeno dell'abusivismo edilizio nella fascia costiera compresa nei territori dei comuni di S.Flavia, Casteldaccia, Altavilla Milicia e Trabia è talmente esteso che per interi tratti di litorale la distesa di costruzioni rende quasi inaccessibile la spiaggia alla pubblica fruizione.

La vicinanza di questi edifici espone tali beni al pericolo di mareggiate e contemporaneamente contribuisce, per la presenza di opere rigide, ad intensi fenomeni di arretramento dell'arenile: ciò ha determinato la necessità di interventi di protezione sia pubblici che, in taluni casi, realizzati puntualmente a difesa del singolo edificio dai proprietari del bene a rischio.

Sul tratto di costa che insiste sul territorio comunale di Termini Imerese è inserita una struttura portuale interfacciata con il grosso insediamento industriale tramite una strada litoranea protetta lungo il suo sviluppo da una serie di pennelli a T che costituiscono una protezione rigida della linea di riva.

Il tratto orientale dell'unità costiera è caratterizzato da ampie spiagge in cui è facile riconoscere l'impianto di estesi cordoni dunali. Questa fascia costiera presenta nella zona retrodunale grandi zone pianeggianti su cui recentemente sono stati costruiti numerosi complessi turistico-alberghieri e villini stagionali. Il tratto che insiste sul territorio comunale di Cefalù è infine caratterizzato da coste alte che creano un ambiente di alta valenza ambientale, già oggetto nei decenni passati di sfruttamento a fini turistici.

E' stato possibile identificare per la sub unità fisiografica i seguenti tratti di costa:

- il litorale compreso tra la foce del F. San Leonardo e la radice del molo di sopraflutto;
- il tratto dove insistono le opere portuali del porto di Termini Imerese;
- il tratto di costa compreso tra la il molo di sottoflutto del porto e il pontile di scarico per navi petroliere lungo circa 700 ml all'interno del quale ricade la foce del Fiume Torto; tale tratto è caratterizzato dalla presenza di numerose opere di protezione delle strutture dell'indotto industriale;
- il tratto di litorale dal pontile di scarico sino alla foce del F. Imera.

Si riporta di seguito una descrizione dettagliata del tratto costiero così come riportato nella relazione dell'unità fisiografica in esame, allegata al P.A.I..

Nel primo tratto di litorale è presente la foce del F. San Leonardo, che forma un'estuario.

L'alveo presenta il tipico aspetto delle fiumare con il tratto montano con elevata pendenza e stabilità delle sponde spesso precaria condizionata dalla presenza di formazioni fliscioidi, ed il tratto vallivo con letto ampio e sovralluvionato, morfologia a canali multipli e sedimenti grossolani di varia forma e grandezza e apparati focali molto vistosi.

il Fiume S. Leonardo rappresentava un'importante fonte di apporto solido; attualmente, a causa di opere di sbarramento della diga Rosamarina tale apporto di materiale è notevolmente diminuito.

Per tale motivo il tratto di costa compreso tra la foce ed il porto è soggetto ad un accentuato fenomeno erosivo che ha indotto l'amministrazione Comunale di Termini Imerese

a progettare un'opera di difesa della costa, finanziata con i fondi del Ministero dell'Ambiente costituita da barriere soffolte collegate.

In questo tratto il litorale è di tipo ghiaioso-ciottoloso.



**Figura 3.2 – Foce del Fiume San Leonardo**

Il porto di Termini Imerese è una struttura nata a servizio del vicino distretto industriale orbitante intorno all'ex stabilimento FIAT Auto. Attualmente è utilizzato a fini turistici e commerciali. Il porto è protetto da una diga foranea e da una diga di sottoflutto, entrambe parzialmente banchinate internamente. Dalla riva si diparte verso levante un ampio molo trapezoidale, completamente banchinato, che forma con le dighe sopraccitate due darsene.

A est del porto, la costa è di tipo sabbioso ciottoloso.



**Figura 3.3 – Il sito portuale di Termini Imerese**

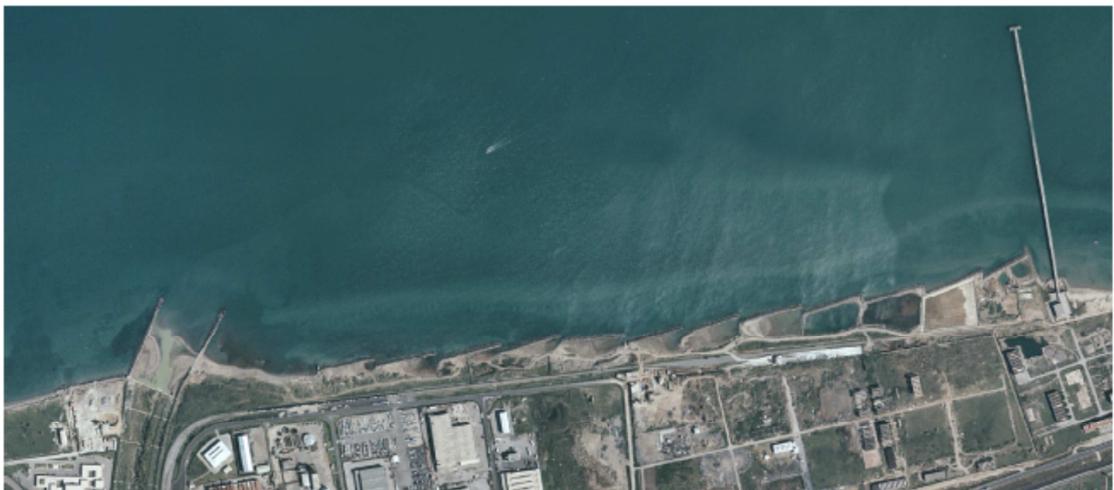
A est, tra la struttura portuale e l'area industriale è stato realizzato un doppio sistema di difesa costituito da scogliere radenti e pennelli a T, a protezione della strada litoranea di servizio. Proseguendo lungo la costa si incontra la Centrale termoelettrica Enel "Ettore Majorana". Sul litorale insistono due scarichi della centrale, una scogliera radente ed un muro di protezione e due pontili per l'approvvigionamento di petrolio dalle navi cisterna (uno di essi si inoltra in mare aperto per circa 2 km).

A fianco della centrale si trova l'ex stabilimento FIAT i cui piazzali sono difesi dal mare mediante quattro barriere emerse ormai pressoché collegate alla spiaggia per effetto dei tomboli venutisi a creare a tergo delle scogliere e un muro di protezione.



**Figura 3.4 – Tratto di costa protetto con scogliere radenti e pennelli**

A est si incontra la foce del Fiume Torto irrigidita mediante due pennelli particolarmente protesi verso il mare. Proseguendo verso Levante si trova la prosecuzione dell'area industriale: questa zona è protetta sulla costa da alcune barriere emerse a tergo delle quali si è verificato la formazione di tomboli ed in alcuni casi l'avanzamento artificiale della costa mediante colmate. Alla fine di questa opere di difesa si trova l'impianto di un pontile di scarico dei combustibili trasportati dalle navi petroliere lungo circa 700 ml e lo scarico di una condotta protetto da massi naturali.



**Figura 3.5 – Foce del Fiume Torto**

In località Torre Battilmano è situata una scogliera radente estesa per circa 250 m a protezione di alcuni fondi di proprietà privata.

A ovest della foce del F. Imera Settentrionale il tratto di costa è caratterizzato dalla presenza di insediamenti turistico- alberghieri.

Proseguendo si incontra la foce del Fiume Imera Settentrionale.



**Figura 3.6 – Foce del Fiume Imera**

La foce del Fiume Imera settentrionale costituiva in passato il punto di mutamento della morfologia del litorale che da sabbioso-ciottoloso diveniva di tipo sabbioso. Tuttavia a causa del forte fenomeno erosivo che si è innescato a levante della foce del fiume Imera, per la riduzione dell'apporto solido fluviale e litoraneo tale spiaggia è attualmente soggetta a classazione verso diametri più grandi (ghiaie e ciottoli) con perdita verso il largo e trasporto lungoriva (verso levante) delle sabbie.

Immediatamente ad est della foce dell'Imera sorge un insediamento turistico: la spiaggia antistante questo complesso è pressoché scomparsa e pertanto si è provveduto alla costruzione di un muro per la difesa dalle mareggiate degli edifici più vicini alla linea di riva. Attiguo a questo villaggio sorgono altri complessi balneari alcuni dei quali minacciati anch'essi dai marosi: a difesa di alcuni villini sono stati collocati dei massi naturali per costituire una scogliera radente.

Per porre rimedio a questa situazione di rischio l'amministrazione regionale ha deciso di finanziare il progetto definitivo di un'opera di difesa del tratto di costa compreso tra la foce del fiume Imera Settentrionale fino alla foce del Torrente Roccella, su proposta del Comune di Campofelice di Roccella, che consiste nella realizzazione di una barriera soffolta avente funzione di attenuare il moto ondoso in modo da salvaguardare l'arenile ricostruito mediante un intervento di ripascimento.

## 4. STATO DI FATTO E TENDENZE EVOLUTIVE

---

Per la definizione dello stato di fatto e delle tendenze evolutive è stata eseguita la ricerca dei dati disponibili; inoltre sono state eseguite applicazioni mirate per la valutazione di particolari aspetti come l'idrodinamica costiera.

### 4.1 DATI CLIMATOLOGICI

---

Di seguito si riportano i principali dati climatologici per il sito di interesse (cfr. l'elaborato "Studio Climatologico"). Sono riportate considerazioni sui dati climatologici essenziali quali:

- temperature;
- piovosità;
- vento.

Per quanto riguarda la termometria, secondo quanto riportato nell'elaborato "Studio climatologico", a cui si rimanda, nei mesi più caldi (luglio e agosto) si raggiungono temperature medie massime di circa 27°C; invece, nel mese più freddo (gennaio) la temperatura media minima è pari a 13°C. La temperatura media annua dell'intero territorio in esame è pari a 15°C.

Nel complesso il clima termico può essere ricondotto al tipo temperato-mediterraneo, avendosi all'incirca un semestre (ottobre-marzo) caratterizzato da temperature relativamente basse seppure variabili con l'altitudine, a cui si contrappone semestre (aprile-settembre) caratterizzato da occasionali alti valori di temperatura e sensibili escursioni giornaliere.

Per quanto riguarda la pluviometria, secondo quanto riportato nell'elaborato "Studio climatologico", a cui si rimanda, il valore di piovosità media annua risulta pari a circa 650 mm.

Il regime pluviometrico è quello caratteristico della Sicilia nord-occidentale, con un periodo piovoso da ottobre ad aprile e minimi stagionali nei mesi estivi di giugno, luglio e agosto. Si può affermare che l'andamento delle precipitazioni è di tipo temperato-mediterraneo, caratterizzato da un periodo piovoso da settembre ad aprile e minimi stagionali da maggio ad agosto.

Per quanto riguarda l'anemologia, non possedendo dati locali sul clima anemologico riguardanti direttamente la zona del porto di Termini Imerese, si è fatto riferimento ai dati di anemometrici della stazione dell'Aeronautica Militare di Ustica dal 1971 al 2000, così come riportati nell'altante climatico redatto dallo stesso ente militare.

Da questi si evince la prevalenza dei venti di Ponente, seguiti in ordine di frequenza dal Maestro, dalla Tramontana, dal Libeccio da Greco-Levante e quindi Scirocco.

In relazione all'esposizione ai venti spiranti dal mare verso il tratto costiero in esame, restringendo l'analisi della serie di misura anemometriche di Ustica agli eventi provenienti dal I e IV quadrante, si riscontra che i venti da Ponente insieme a quelli da Maestro (Nord-Ovest) sono dominanti in ogni stagione (eventi di più forte intensità), permanendo anche in estate anche se a livello di venti più deboli. Il vento di Grecale è presente per lo più in autunno ed in inverno, anche come vento forte e molto forte, mentre in estate e primavera è molto frequente in regime di brezza (debole e moderata).

I venti da Nord (Tramontana) si presentano come molto forti solo in inverno, autunno e primavera, si presentano invece forti in tutte le stagioni, ed acquisiscono un'elevata frequenza di apparizione in estate sebbene sotto il profilo di brezze o venti leggeri. Molto meno frequenti sono i venti da Levante, che peraltro soffiano quasi sempre con intensità deboli e moderate, mentre per quanto riguarda la direzione di Scirocco, per il tratto costiero in esame, il vento si presenta da terra, con intensità quasi sempre moderate e forti, ma con più debole frequenza.

In definitiva i venti di mare, che generano cioè i fenomeni ondosi che impattano il litorale, prevalenti in intensità e frequenza per il paraggio in esame sono quelli del IV quadrante (Maestrale e Tramontana), considerato che i venti dal I quadrante (Grecale e Levante) non sono mai fortissimi e sono peraltro di minor frequenza.

## 4.2 LIVELLI IDRICI OSSERVATI

La stima dei livelli idrici è, in genere, un processo complesso, in quanto il reperimento di dati locali per periodi di tempo sufficientemente lunghi è difficoltoso.

Di norma ci si affida, quindi, a:

- misure mareografiche in siti prossimi a quello in esame;
- analisi numeriche mediante modelli di calcolo che descrivano, con le dovute semplificazioni, la fisica del fenomeno;
- osservazioni in situ, spesso determinanti ai fini della corretta individuazione delle escursioni massime e minime.

In questo studio si farà riferimento al mareografo della rete R.M.N. prossimo al sito in esame, localizzato a Palermo; i dati disponibili coprono il range temporale che va dal 1992 al 2012.

È opportuno evidenziare che i dati sull'escursione dei livelli idrici, come letti da un mareografo, sono strettamente dipendenti dalle condizioni orografiche del sito ove il mareografo è installato (verosimilmente all'interno di porti) ed includono sia la componente di variazione dei livelli idrici denominata storm surge, che tiene conto degli effetti indotti dalle variazioni barometriche, dal moto ondoso in frangenza e dell'azione anemologica, sia il sovrizzo indotto dalla marea astronomica.

Purtroppo la serie storica è contrassegnata da un carattere di discontinuità, per problemi legati al funzionamento della strumentazione mareografica.

Dai dati rilevati, si osserva che il range di variazione del livello idrico per il sito di riferimento, nel periodo di osservazione, è variabile tra -0,44 m e +0,66 m.

L'intervallo di variazione dei livelli idrici massimi è compreso tra 12 e 66 cm, con valore medio pari a 47 cm.

L'intervallo di variazione dei livelli idrici minimi è compreso tra -7 e -44 cm, con valore medio pari a -28 cm.

Si riporta di seguito il grafico delle oscillazioni di livello idrico derivanti dai rilievi effettuati per l'anno 2011, per facilità di rappresentazione.

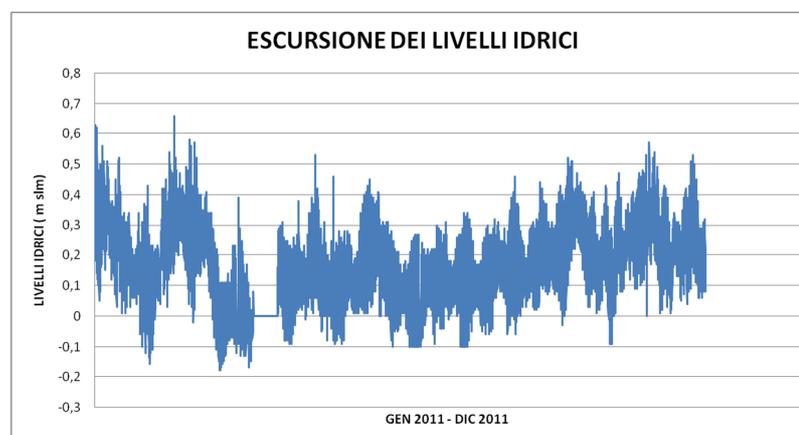


Figura 4.1 - Rilevamenti del mareografo di Palermo per l'anno 2011

Per maggiori chiarimenti si rimanda all'elaborato "Studio meteomarino".

#### 4.2.1 marea astronomica

Il fenomeno periodico della marea astronomica, come è noto, è caratterizzato dalla sovrapposizione di più componenti, ciascuna delle quali caratterizzata da un periodo e da un'ampiezza relativa.

L'andamento della marea lungo i litorali siciliani è di tipo semidiurno.

L'I.S.P.R.A., nel 2011, ha eseguito uno studio di tali fattori per ognuno dei siti strumentati della rete mareografica nazionale, fornendo i valori locali relativi alle costanti di ampiezza relativa e fase.

Per il presente studio si è fatto riferimento ai dati forniti per la stazione di Palermo, in quanto località più prossima al sito di interesse.

Sono state considerate le seguenti componenti principali, alle quali competono gli effetti maggiori in termini di escursione dei livelli idrici:

COMPONENTI		PERIODO (ore)
LUNARE PRINCIPALE	M2	12.42
SOLARE PRINCIPALE	S2	12.00
LUNARE ELLITTICA MAGGIORE	N2	12.66
LUNI-SOLARE SEMIDIURNA	K2	11.97
LUNI SOLARE DIURNA	K1	23.98
LUNARE DIURNA PRINCIPALE	O1	25.82
SOLARE DIURNA PRINCIPALE	P1	24.07

**Tabella 4.1 – Componenti principali di marea**

Di seguito si riportano i valori stimati di ampiezza relativa e fase stimati per la località di Palermo nell'anno 2011.

COMPONENTI	AMPIEZZA (cm)	FASE (°)
K1	2.89	181.24
K2	1.14	222.16
M2	1.43	206.23
N2	2.33	192.16
O1	1.22	107.66
P1	0.83	172.29
S2	4.29	227.77

**Tabella 4.2 – Valori dei coefficienti di ampiezza relativa e fase.**

Sovrapponendo i dati sopra riportati si osserva che l'ampiezza massima di marea astronomica è pari a circa 14 cm; ciò implica che sia verosimile valutare l'escursione dei livelli idrici indotta dal fenomeno della marea astronomica pari a circa 30 cm, con andamento semidiurno.

### 4.3 IL CLIMA D'ONDA E VALUTAZIONI ENERGETICHE

Il paraggio dell'unità fisiografica oggetto del presente studio si affaccia sul Tirreno Meridionale: esso risulta direttamente esposto agli eventi meteomarini dal I° e IV° quadrante. Più precisamente, ponendosi al largo della costa in prossimità del porto sulla batimetrica dei -100 m slm, il settore di traversia geografico è delimitato ad ovest dalla visuale del promontorio di Capo Zafferano con direzione di circa 300° e ad est dalla visuale di Capo Cefalù con direzione di circa 90°N.

Per quanto riguarda il regime medio del moto ondoso al largo esso è caratterizzato da una distribuzione con onde provenienti principalmente dal primo quadrante e dal quarto quadrante.

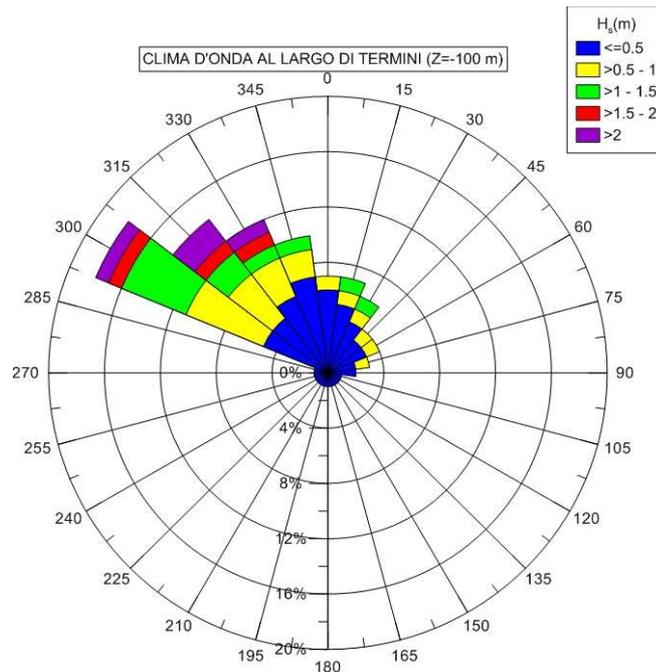


Figura 4.2- Diagramma polare del clima d'onda al largo di Termini Imerese.

Il modello di calcolo STWAVE, già descritto nell'elaborato "Studio Idraulico Marittimo" (al quale si rimanda) è stato utilizzato per analizzare la trasformazione subita dalle onde nel loro procedere dal largo verso riva per il tratto di litorale ricadente all'interno dell'unità fisiografica.

Sono state determinate le onde trasformate in corrispondenza in un punto di controllo, adeguatamente posizionato sottocosta ai fini di condurre le analisi sull'agitazione residua (cfr. elaborato "Studio Idraulico Marittimo") e le analisi sul regime idrodinamico e sul regime del trasporto solido (cfr. paragrafo 4.7 e capitolo 6).

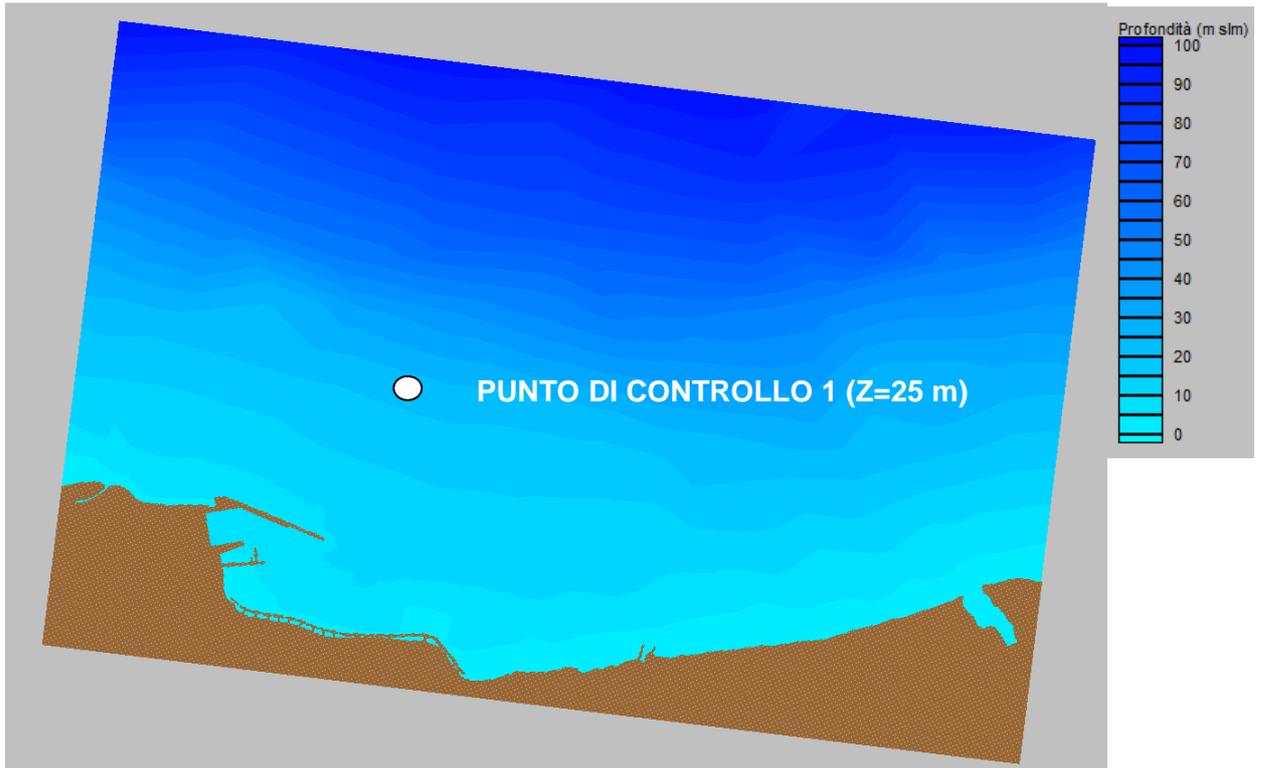


Figura 4.3 – Dominio di calcolo per le simulazioni con il modello STWAVE ed ubicazione del punto di controllo.

Di seguito si riporta il diagramma del clima d'onda locale sottocosta nel punto di controllo.

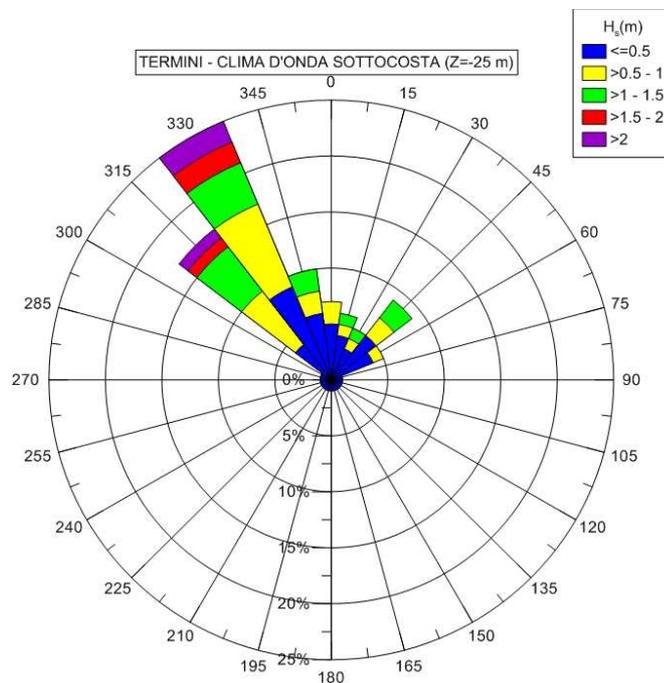


Figura 4.4 - Diagramma polare del clima d'onda locale sottocosta nel punto di controllo 1

L'onda che si propaga sottocosta e che proviene da una direzione appartenente al settore di traversia individuato si trasforma proponendosi in direzione d'attacco più vicina possibile all'ortogonale alla linea di riva.

Presso il punto di controllo 1, in corrispondenza della batimetrica dei -25 m s.l.m., i treni d'onda sottocosta tendono a posizionarsi, secondo una distribuzione bimodale individuata dai settori compresi tra 315°N-0°N (traversia principale) e 0°-75°N (traversia secondaria).

E' lecito concludere che le distribuzioni direzionali descritte sono valide anche per quanto riguarda il contenuto energetico del clima d'onda al largo e sottocosta.

Per maggiori informazioni sulle valutazioni energetiche relative al moto ondoso si rimanda a quanto riportato alla sezione 4.7.5 di questo elaborato.

#### 4.4 STIMA DELLA PROFONDITA' DI CHIUSURA

---

Un'ulteriore importante informazione ai fini del presente studio è la profondità di chiusura, ovvero il limite della fascia in cui i sedimenti del fondo subiscono rimaneggiamento e trasporto per azione del moto ondoso.

La stima della profondità di chiusura è stata effettuata utilizzando la relazione proposta da *Birkemeier (1985)*:

$$h_c = 1.57 H_{s,12}$$

in cui  $H_{s,12}$  è l'altezza significativa dell'onda omnidirezionale al largo, mediamente uguagliata o superata solo 12 ore in un anno.

Dalla valutazione del clima d'onda al largo del sito di Termini Imerese (cfr. l'elaborato "*Studio Meteomarinò*") è stato stimato che tale onda è  $H_{s,12} = 3,65$  m e quindi la profondità di chiusura è pari a circa 5,75 m.

#### 4.5 STUDIO IDROLOGICO-IDRAULICO

---

Nello studio idrologico-idraulico sono stati analizzati, pertanto, i bacini idrografici che insistono nell'area in oggetto; più precisamente:

- bacino del Fiume San Leonardo;
- bacino del Fiume Imera Settentrionale;
- bacino del Fiume Torto;
- bacino del Torrente Barratina.

Per ciascuno dei corsi d'acqua di interesse sono state individuate la stima delle portate, la valutazione del rischio idraulico e la previsione della produzione di sedimento alla sezione focale, utilizzando i dati e le metodologie presenti in letteratura ed eseguendo applicazioni numeriche mirate.

Per il bacino del Fiume San Leonardo a valle della diga Rosamarina sono state stimate come verosimili le seguenti grandezze alla foce:

- $P = 4.720$  t/a.
- $Q_{50 \text{ anni}} = 713$  m<sup>3</sup>/s;
- $Q_{100 \text{ anni}} = 845$  m<sup>3</sup>/s;
- $Q_{300 \text{ anni}} = 1.061$  m<sup>3</sup>/s.

Per il bacino del Fiume Imera settentrionale sono state stimate come verosimili le seguenti grandezze alla foce:

- $P = 2.750$  t/a.
- $Q_{50 \text{ anni}} = 591$  m<sup>3</sup>/s;
- $Q_{100 \text{ anni}} = 718$  m<sup>3</sup>/s;

-  $Q_{300 \text{ anni}} = 929 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Per il bacino del Fiume Torto sono state stimate come verosimili le seguenti grandezze alla foce:

- $P = 5.330 \text{ t/a}$ .
- $Q_{50 \text{ anni}} = 696 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- $Q_{100 \text{ anni}} = 825 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- $Q_{300 \text{ anni}} = 1.034 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Per il bacino del Torrente Barratina sono state stimate come verosimili le seguenti grandezze alla foce:

- $P = 666 \text{ t/a}$ .
- $Q_{50 \text{ anni}} = 193 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- $Q_{100 \text{ anni}} = 214 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- $Q_{300 \text{ anni}} = 236 \text{ m}^3/\text{s}$ .

I dati sopra riportati mostrano chiaramente che l'apporto solido fluviale è molto ridotto.

Le analisi relative all'individuazione del rischio idraulico hanno indicato chiaramente che la presenza dei corsi d'acqua non implica rischi o vulnerabilità per le strutture portuali esistenti e per quelle da realizzare.

#### 4.6 STUDI SEDIMENTOLOGICI

In base ai dati raccolti ed analizzati nell'elaborato "Studio sedimentologico", a cui si rimanda per maggiori chiarimenti, si è pervenuti alle seguenti considerazioni.

L'evoluzione del litorale è notevolmente influenzata dalle correnti marine, in quanto l'area risente soprattutto della naturale frequenza ed intensità degli agenti meteomarinari del IV quadrante, i quali causano un certo numero di mareggiate che aumentano l'entità del trasporto solido dei sedimenti.

La presenza di insediamenti civili ed opere antropiche che interferiscono con il sistema morfodinamico marino ha determinato alcune variazioni nel regime della dinamica della costa, soprattutto per quanto riguarda l'apporto solido fluviale.

Sulla base delle considerazioni sulla distribuzione e variabilità granulometrica e tessiturale dei sedimenti analizzati secondo la metodologia di Shepard (1954) e sugli indici statistici di Folk e Ward (1957), si possono effettuare le seguenti considerazioni.

- i sedimenti presenti nelle aree per il prolungamento del molo di sopraflutto sono costituiti da sabbie con un'aliquota di materiale pelitico;
- i sedimenti presenti nelle aree per il prolungamento del molo di sottoflutto, a causa del basso dinamismo, sono prevalentemente costituiti da peliti;
- la componente ghiaiosa è presente solo nei campioni prelevati in corrispondenza delle zone a est della foce del fiume San Leonardo, per via della riduzione dell'apporto solido fluviale e per via degli idrodinamismi diretti da ovest verso est, che trasportano via le particelle più fini.

In generale le considerazioni sugli indici statistici di Folk e Ward (1957), sulle curve di Balsillie e sulla mineralogia dei sedimenti marini confermano l'importanza delle correnti litoranee indotte dal moto ondoso sulla dinamica dei sedimenti all'interno dell'unità fisiografica in esame, e come tali correnti siano orientate principalmente da ovest verso est.

In particolare è stato confermato che il sito d'origine prevalente dei sedimenti sia il bacino idrografico del fiume San Leonardo per via delle affinità mineralogiche tra i suoli presenti sui versanti del bacino idrografico e i sedimenti prelevati presso il molo di sopraflutto.

E' quindi evidente come la regimazione del cordo idrico e la costruzione dello sbarramento della diga Rosamarina all'inizio degli anni '80 siano state le cause principali per il deaurimento del deposito costiero e l'innescare dei fenomeni di erosione (cfr. la sezione 4.8. del presente elaborato).

Tali fenomeni erosivi hanno avuto la loro manifestazione più evidente nella scomparsa della cosiddetta "Secca di San Giovanni", che interessava l'area della testata del molo foraneo di sopraflutto fino agli anni '80 (cfr. la sezione 4.8. del presente elaborato).

#### 4.7 STUDIO DEL REGIME IDRODINAMICO

Secondo le informazioni presenti in letteratura (cfr. l'elaborato "Studio Climatologico") per via del moto ondoso, le correnti dominanti sono prevalentemente orientate da O verso E, con differenze stagionali dovute a particolari e persistenti eventi atmosferici o barici, durante i quali la corrente prevalente cambia direzione, soprattutto sotto-costa da est verso ovest.

Tale evidenza è confermata anche dal "Portolano del Mediterraneo", edito dal servizio idrografico della Marina Militare italiana, che indica come presso il porto di di Termini Imerese, "la corrente è generalmente diretta per ovest e d'intensità variabile" e che "talora inverte la sua direzione".

Questa sezione ha lo scopo di approfondire le conoscenze sul regime idrodinamico dei litorali di Termini Imerese, attraverso l'uso di apposita modellistica matematica.

##### 4.7.1 Obiettivi

Determinare il regime idrodinamico è fondamentale a causa dell'interdipendenza dei fenomeni idrodinamici con quelli legati alla sedimentologia, al trasporto solido litoraneo e alla qualità delle acque, tematiche certamente non trascurabili e di rilevante interesse.

In particolare, è stato applicato il modello matematico numerico agli elementi finiti ADCIRC, sviluppato da *Luettich R.A. e Westerink J.J. (2000)*.

Dapprima sarà presentato il modello di calcolo utilizzato, in seguito saranno descritte le condizioni al contorno e le forzanti considerate; infine saranno analizzati i risultati ottenuti con le simulazioni numeriche, al fine di delineare il regime correntometrico in situ.

##### 4.7.2 Modello di calcolo

ADCIRC è un modello numerico che si basa sulla soluzione del problema del moto per un fluido in movimento su un sistema ruotante come quello terrestre (*Luettich R.A., Westerink J.J., 2000*).

Le equazioni base sono state formulate usando la pressione idrostatica tradizionale e le approssimazioni di Boussinesq, utilizzabili in sistemi di coordinate cartesiane e sferiche.

Le equazioni sono state discretizzate nello spazio usando il metodo agli elementi finiti (FE) e nel tempo usando il metodo alle differenze finite (FD).

Il modello ADCIRC risolve il sistema costituito dall'equazione di continuità primitiva:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0 \quad (A)$$

in cui :

- $\zeta(x,y,t)$ : elevazione della superficie libera;
- $U, V(x,y,t)$ : componenti orizzontali della velocità;

- $t$ : tempo;
- $x, y$ : variabili spaziali di riferimento.

e dalle equazioni della quantità di moto (nella forma non conservativa):

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + fV = -\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0 H} + D_x - B_x \quad (B)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU = -\frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0 H} + D_y - B_y \quad (C)$$

in cui:

- $f$ : parametro di Coriolis;
- $g$ : accelerazione di gravità;
- $\rho_s, \rho$ : densità dell'acqua e densità di riferimento;
- $(\eta + \gamma)$ : azione dovuta al potenziale gravitazionale (marea newtoniana, attrazione della terra e degli altri corpi);
- $H$ : altezza della colonna d'acqua;
- $\tau_{sx} \tau_{sy}$ : sforzi di trascinamento superficiali (dovuti ad esempio all'azione del vento);
- $\tau_{bx} \tau_{by}$ : sforzi dovuti all'azione di attrito del fondale;
- $B_y$  e  $B_x$ : termini relativi ai gradienti di pressione;
- $D_x$  e  $D_y$ : termini dispersivi-diffusivi.

L'elevazione  $\zeta(x,y,t)$  è ottenuta dalla soluzione dell' equazione di continuità integrata sulla profondità nella forma "Generalized Wave-Continuity Equation" (GWCE)", al fine di evitare problemi di tipo numerico dovuto dall' uso del metodo di Galerkin per la discretizzazione spaziale:

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + \tau_0 \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} - UH \frac{\partial \tau_0}{\partial x} - VH \frac{\partial \tau_0}{\partial y} = 0 \quad (D)$$

in cui:

$$A_x \equiv \frac{\partial UH}{\partial t} + \tau_0 UH = \frac{\partial Q_x}{\partial t} + \tau_0 Q_x \quad (E)$$

$$A_y \equiv \frac{\partial VH}{\partial t} + \tau_0 VH = \frac{\partial Q_y}{\partial t} + \tau_0 Q_y \quad (F)$$

avendo indicato con  $\tau_0$  il parametro numerico variabile spazialmente usato come funzione peso tra l'equazione primitiva e la sua forma modificata GWCE.

Le componenti della velocità  $U(x,y,t)$  e  $V(x,y,t)$  sono, invece, calcolate dalle equazioni della quantità di moto.

#### 4.7.3 Condizioni al contorno

Tra le condizioni al contorno che è possibile imporre in ADCIRC, si enumerano:

- *elevazione dovuta al potenziale gravitazionale* (come serie nel tempo o calcolate per mezzo dell'analisi armonica delle costituenti di marea);
- specifico "*flusso normale*" (apporti idrici provenienti da corsi d'acqua);

- *stress superficiale* (provocato dal vento e/o dal wave radiation stress);
- *pressione atmosferica e azione anemologica*.

L'implementazione delle condizioni al contorno e delle forzanti segue una determinata architettura dei files di input (fort.xx), richiesto dal codice.

La forzante di marea rappresenta la variazione di livello idrico dovuta all'azione delle forze di tipo gravitazionale sulla massa liquida.

L'equazione di riferimento (REID 1990) è :

$$\eta(\lambda, \phi, t) \equiv \sum_{j,n} \alpha_{jn} C_{jn} f_{jn}(t_o) L_j(\phi) \cos \left[ 2\pi (t - t_o) / T_{jn} + j\lambda + \nu_{jn}(t_o) \right] \quad (3)$$

in cui:

- $\alpha_{jn}$  : fattore di riduzione del campo gravitazione (cfr. Wahr, 1981);
- $\nu_{jn}(t_o)$  : angolo di equilibrio, che tiene conto della variazione temporale del parametro di fase (cfr. Schureman, 1958);
- $\lambda, \phi$ : longitudine e latitudine;
- $C_{jn}$ : ampiezza relativa della marea;
- $f_{jn}(t_o)$ : fattore nodale che tiene conto dell'influenza della marea di periodo 18,6 anni sulle maree di corto periodo (cfr. Schureman, 1958);
- $L(\phi)$ : parametro che dipende dalla latitudine;
- $T_{jn}$ : periodo della marea;
- $T_o$ : tempo di riferimento.

Tale forzante viene implementata in ADCIRC sul contorno di "mare aperto" del dominio, indicando per ogni nodo del contorno stesso le componenti di marea principali e i valori dei coefficienti caratteristici delle componenti stesse, compresi i valori di ampiezza relativa e fase, che dipendono dal sito di interesse.

La variazione del livello idrico è caratterizzata da un termine legato agli effetti dell'attrito del fondale, secondo le seguenti equazioni:

$$\tau_{bx} = U \tau^* \quad (H)$$

$$\tau_{by} = V \tau^* \quad (I)$$

in cui:

- $V, U$ : componenti orizzontali della velocità;
- $\tau^*$ : parametro funzione del coefficiente di attrito ("Drag coefficient")  $C_f$  e della velocità mediata lungo la colonna d'acqua.

Il termine  $\tau^*$  può essere espresso tramite una relazione lineare o quadratica:

$$\tau^* = C_f \quad (L)$$

$$\tau^* = C_f \left( \frac{1}{H} \right) \left( \frac{U_z + V_z}{2} \right) \quad (M)$$

e il valore minimo consigliato  $C_{f \min}$  è pari a 0,0025; per la valutazione di tale parametro si possono applicare le seguenti formule:

- nel caso di acque alte ( $H > H_{break}$ ),  $C_f = C_{f \min} \quad (N)$ ;

- nel caso di acque basse ( $H < H_{break}$ ),  $C_f = C_{f\ min} \left( \frac{H_{break}}{H} \right)$  (O);

in cui:

- $\gamma = 1/3$ ;
- $H_{break}$ : altezza di rottura dell'onda;
- $N$ : coefficiente di Manning;
- $C_{f\ min} = gn^2 / H_{break}^\gamma$ .

Il “flusso normale” può essere inserito in ADCIRC come serie nel tempo, mentre le forzanti di tipo meteorologico (velocità del vento e pressione atmosferica) possono essere implementati secondo varie modalità.

Tra le opzioni più semplici vi è quella relativa alla costruzione di una serie temporale per più nodi della mesh di calcolo, per ciascuno dei quali vengono indicate le componenti (secondo il sistema di riferimento adottato, ovvero meteorologico) della VEL<sub>10</sub> (velocità del vento a 10 m rispetto sul l.m.m.) misurata in nodi e il valore della pressione atmosferica in hPa.

ADCIRC implementa una routine che permette di calcolare lo sforzo dovuto al vento, a partire dai dati di velocità, e la variazione di livello idrico, causata dal gradiente di pressione atmosferica.

Le forzante “radiation stress” (indotta dal moto ondoso e dal fenomeno del frangimento dell'onda) viene implementata in modo simile alla forzante meteorologica, importandone i valori da modelli relativi alla propagazione del moto ondoso come STWAVE, che tengano conto, tra gli altri fenomeni, anche del frangimento dell'onda.

#### 4.7.4 Dominio di calcolo

Il dominio scelto ha una forma semicircolare; la profondità di mare aperto è circa 100,00 m sul l.m.m. Esso si estende dalla foce del Fiume San Leonardo sino alla foce del Fiume Imera settentrionale. La configurazione portuale analizzata è quella di stato di fatto, denominata “Layout 0”.

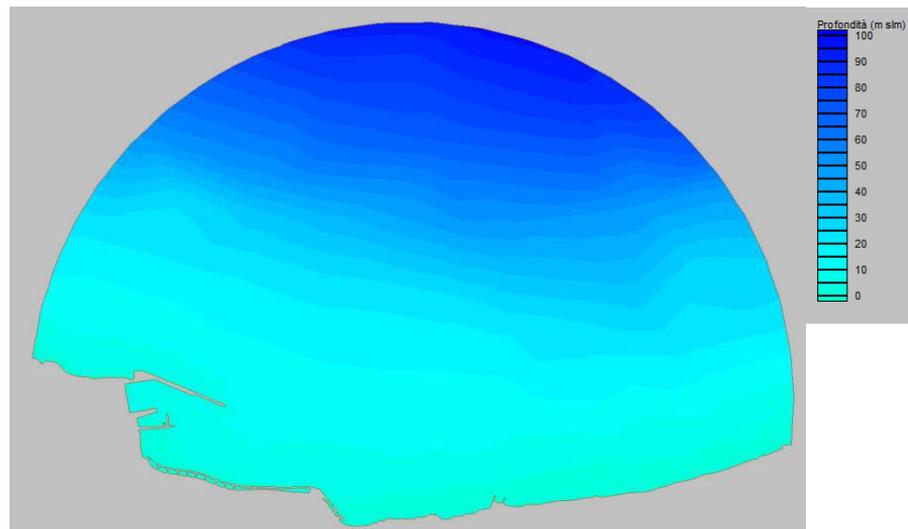


Figura 4.5 – Dominio generale ADCIRC per le condizioni di stato di fatto con relative batimetrie

La mesh è caratterizzata da elementi triangolari, di dimensioni e densità variabili, al fine di ottenere una maggiore risoluzione in specifiche zone, ad esempio vicino la costa e le opere portuali.

In queste analisi si è scelto di utilizzare sottocosta una risoluzione di elementi con lato di dimensione pari a 10 m, mentre al largo la dimensione della maglia è pari a 50 m.

#### 4.7.5 Condizioni al contorno implementate

Per le simulazioni condotte si è scelto un periodo pari a 2 giorni.

Le prime 24 ore sono utilizzate per la fase di *autocalibrazione del modello*; tale durata è stata ritenuta idonea per l'annullamento degli effetti dovuti alle notevoli oscillazioni di velocità e di livello idrico relative alle condizioni di moto iniziale nullo ( $v=0,00$  m/s,  $h=0,00$  m,  $t=0,00$  s), il restante periodo è stato ritenuto adeguato per valutare almeno 1 ciclo di marea semidiurna, caratteristica dei litorali siciliani.

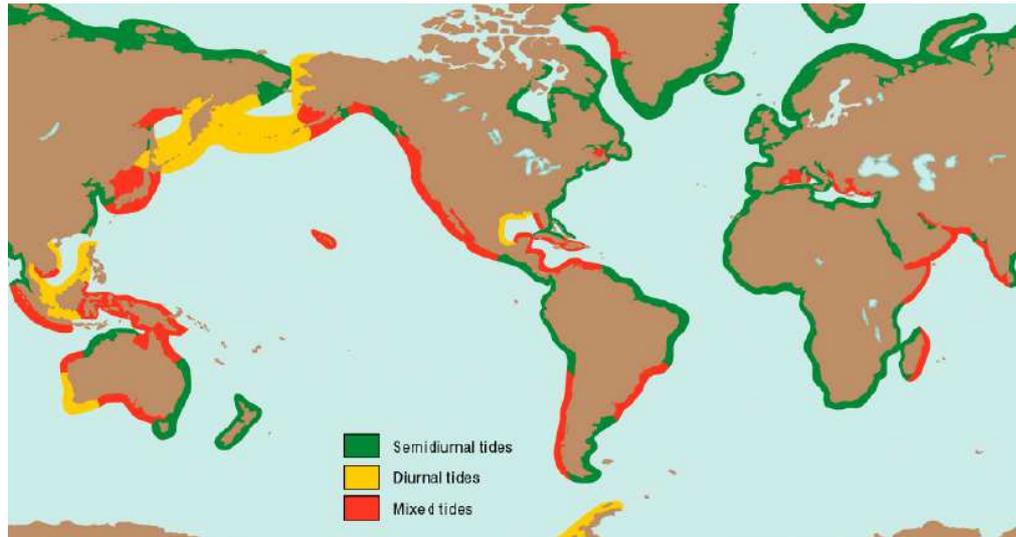


Figura 4.6 –Distribuzione della tipologia di marea

Il fenomeno periodico della marea, come è noto, è caratterizzato dalla sovrapposizione di più componenti, ciascuna delle quali caratterizzata da un periodo e da un'ampiezza relativa.

Tra queste sono state scelte quelle principali, ovvero quelle alle quali competono gli effetti maggiori in termini di escursione dei livelli idrici, secondo il prospetto già riportato alla sezione 4.2 del presente elaborato.

I valori delle costanti generali di marea (ampiezza assoluta, frequenza, fattore di riduzione, fattore nodale, e angolo di equilibrio) dipendono dalla localizzazione geografica del sito e dal tempo di riferimento. per la loro individuazione si è fatto riferimento al database di *Le Provost*, generalmente usato per le applicazioni modellistiche con ADCIRC.

I valori locali relativi alle costanti *ampiezza relativa* e *fase di riferimento* sono stati determinati sulla base delle registrazioni dei livelli idrici della stazione RMN di Palermo nell'anno 2011, secondo il prospetto già riportato alla sezione 4.2 del presente elaborato.

La forzante "*radiation stress*" è stata implementata accoppiando il codice di calcolo ADCIRC con il codice STWAVE già descritto nell'elaborato "*Studio Meteomarino*", al quale si rimanda. Tramite una procedura automatica (definita "*steering module*") ADCIRC riceve come input in tutti i nodi le componenti del radiation stress indotto dal moto ondoso, restituiti come dati di output da STWAVE.

Dagli studi meteomarini (cfr. elaborato "*Studio Meteomarino*") è emerso che, nei fenomeni di propagazione dell'onda dal largo verso riva, è stato possibile identificare due direzioni medie di propagazione del moto ondoso:

- $D_L=330^\circ N$  (rappresentativa degli eventi del IV quadrante)
- $D_L=45^\circ N$  (reppresentatica degli eventi del I quadrante).

Come è noto il contenuto energetico del moto ondoso è valutabile tramite l'espressione:

$$E = \frac{1}{8} \cdot \rho \cdot g \cdot H_s^2 \cdot L \cdot \frac{10800}{T}$$

dove:

- E: contenuto energetico [MJ/m x anno];
- $\rho$ : densità dell' acqua pari a 1030 Kg/m<sup>3</sup>;
- g: accelerazione di gravità pari a 9,81 m/s<sup>2</sup>;
- H<sub>s</sub>: altezza d'onda significativa [m];
- L: lunghezza d'onda [m];
- T: periodo medio dell'onda [s].

Appare chiaro quindi che i fenomeni più significativi, in quanto provocano gradienti maggiori nel flusso traspedeponzionale, sono quelli caratterizzati dai valori delle altezze d'onda significativa maggiore e quindi a maggiore contenuto energetico. Dall'osservazione del clima d'onda al largo di Termini Imerese emerge che il valore di soglia per tali eventi può essere assunto pari a 2,0 m.

Come riportato nell'elaborato "studio meteomarino" sono stati stimati i valori dell'altezza d'onda significativa annuale per le direzioni al largo comprese tra 300°N e 90°N, secondo settori di ampiezza pari a 30°N. Ogni valore annuale assume un valore maggiore del valore di soglia.

Si è ritenuto congruo e verosimile considerare la mareggiata annuale come rappresentativa dei gradienti idrodinamici e sedimentari.

Il valore dell'altezza d'onda significativa è stato ottenuto eseguendo una media pesata tra i valori annuali direzionali per ogni quadrante in funzione dell'occorrenza direzionale percentuale all'interno del clima d'onda. Le mareggiate di modellazione ottenute sono:

- H= 4,00 m, T= 9,2 s, D<sub>L</sub>= 330 N;
- H= 3,20 m, T= 8,0 s, D<sub>L</sub>= 45 N.

Si osserva che non stati considerati gli apporti fluviali in quanto ritenuti trascurabili al fine dello studio del regime idrodinamico e, più in generale, della dinamica della costa, per via del carattere torrentizio dei corsi d'acqua che insistono sull'area portuale e per via degli interventi di protezione idraulica eseguiti lungo gli alvei che hanno ridotto l'apporto solido alla foce (cfr. l'elaborato "studio idrologico-idraulico" e la sezione 4.8 del presente elaborato).

#### 4.7.6 Tendenze idrodinamiche simulate

Le forzanti implementate nel codice di calcolo sono:

- *marea e moto ondoso* da 330°N;
- *marea e moto ondoso* da 45°N.

Per ciascuna delle simulazioni effettuate, per quanto riguarda la distribuzione spaziale del vettore velocità, sono state estratte delle planimetrie di dettaglio, raffiguranti l'area interessata dalle opere portuali. La scala cromatica è tale da assegnare al rosso un valore di velocità pari a 1,0 m/s ed al blu il valore di 0,00 m/s, al fine di evidenziare al meglio i campi di velocità indotti. Di seguito si riportano le immagini relative al regime correntometrico indotto dalle mareggiate da 45°N e da 330°N.

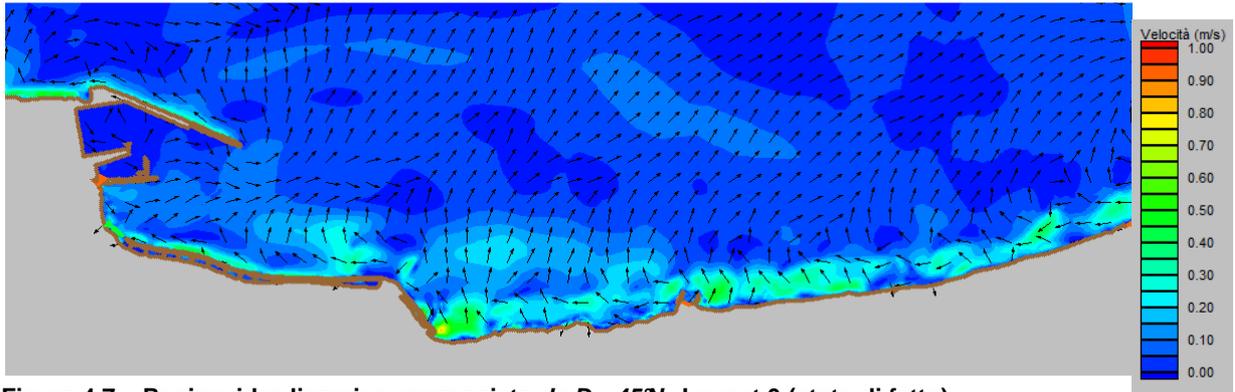


Figura 4.7 – Regime idrodinamico: mareggiata da  $D_L=45^\circ N$ , Layout 0 (stato di fatto)

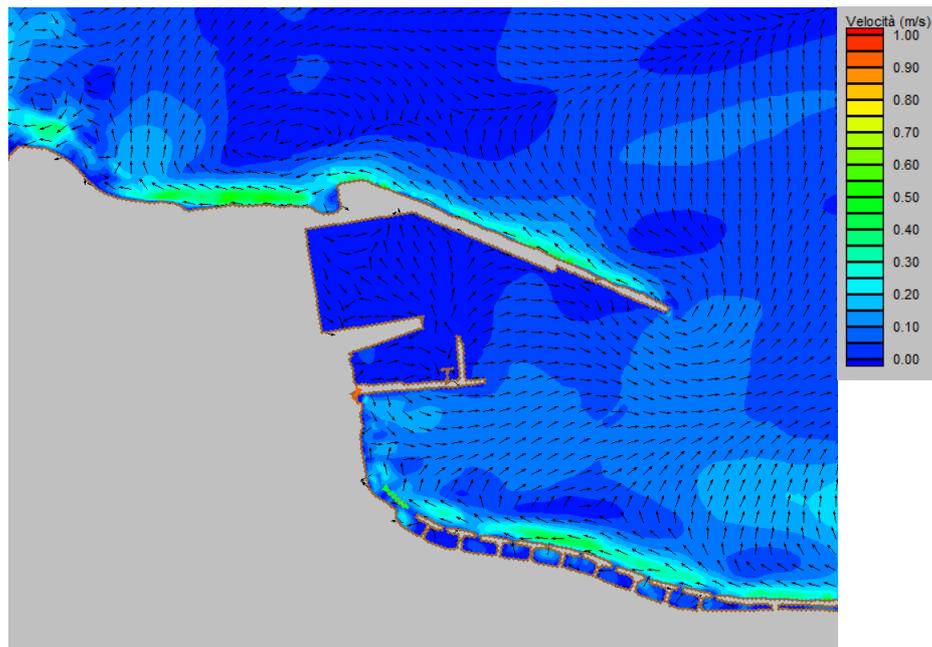


Figura 4.8 – Regime idrodinamico: mareggiata da  $D_L=45^\circ N$ , Layout 0 (stato di fatto). Particolare.

Nel layout di stato di fatto, in linea generale, le condizioni idrodinamiche indotte dal moto ondoso da  $45^\circ N$ , direzione rappresentativa del moto ondoso dal I quadrante, inducono la formazione di una corrente litoranea diretta dalla foce del Fiume Imera verso il porto attuale; le correnti sono pressoché parallele alla linea di costa con direzione E-O e lungo il molo di sottoflutto le correnti si dispongono parallele all'opera secondo la direzione SO-NE. All'interno del porto e all'imboccatura si osserva la formazione di una zona a basso dinamismo. Lungo il molo foraneo la corrente si dispone parallela all'opera secondo la direzione SE-NO. Oltre la radice del molo di sopraflutto, sino alla foce del Fiume San Leonardo, la corrente litoranea è diretta secondo la direttrice E-O.

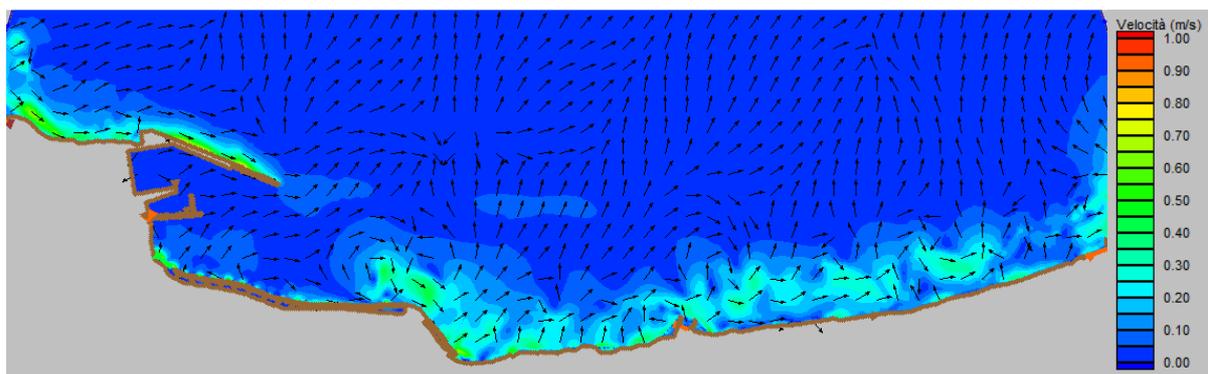


Figura 4.9 – Regime idrodinamico: mareggiata da  $D_L=330^\circ N$ , Layout 0 (stato di fatto)

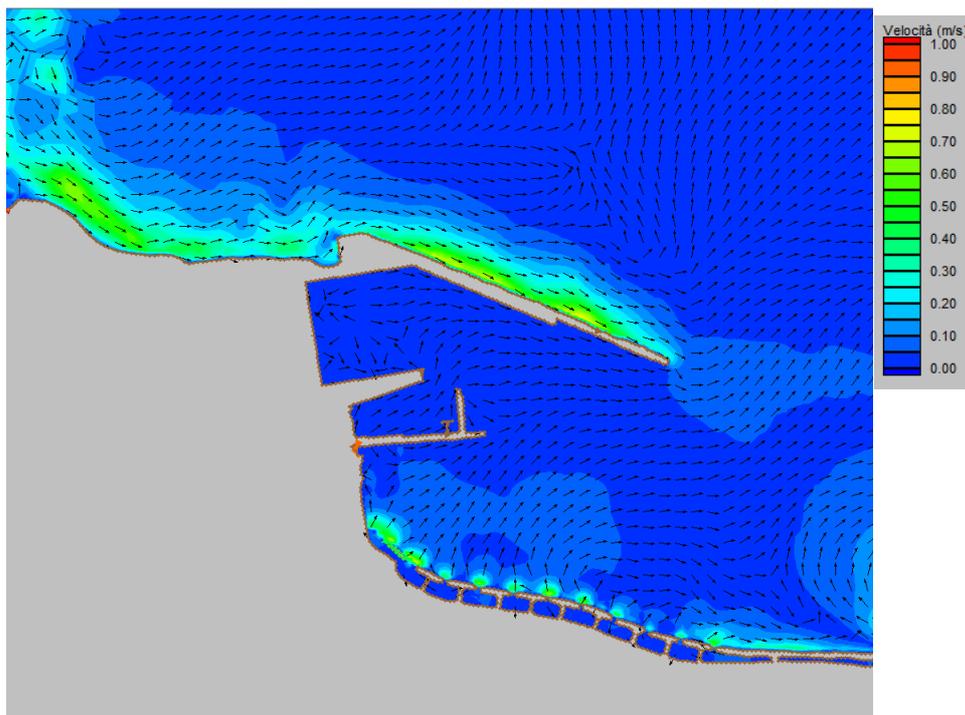


Figura 4.10 – Regime idrodinamico: mareggiata da  $D_L=330^\circ N$ , Layout 0 (stato di fatto). Particolare.

Nel layout di stato di fatto, in linea generale, le condizioni idrodinamiche indotte dal moto ondoso da  $330^\circ N$ , direzione rappresentativa del moto ondoso dal IV quadrante, inducono la formazione di una corrente litoranea diretta dalla foce del Fiume S. Leonardo verso il porto attuale; le correnti sono pressoché parallele alla linea di costa con direzione O-E e all'imboccatura e nell'area a est del molo di sottoflutto si forma una zona caratterizzata da livelli idrodinamici bassi. Lungo il tratto di litorale a est del porto interessato dagli interventi di protezione con scogliere radenti e pennelli si osserva la formazione di un vortice in senso orario.

Le informazioni idrodinamiche ottenute in questa sezione saranno utilizzate come dati di input per gli studi relativi all'analisi *long-shore*.

## 4.8 EVOLUZIONE DELLA LINEA DI RIVA

Al fine di effettuare un'analisi delle tendenze evolutive dei litorali in prossimità del sito di interesse è stato fatto riferimento:

- agli studi condotti a supporto del Piano Regolatore del Porto vigente e relativi al periodo 1955-1998;
- agli studi di supporto del Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico redatto dalla Regione Siciliana Assessorato Territorio e Ambiente per l'unità fisiografica 18 (2006) per il periodo 1992 -2003;
- ad alcune elaborazioni eseguite per la redazione del presente elaborato e relative al periodo che va dal 2003 a oggi.

### 4.8.1 Evoluzione della linea di riva dal 1955 al 1998

L'indagine cartografica condotta durante la redazione del P.R.P., ha consentito l'identificazione temporale degli interventi antropici, nonché al riscontro qualitativo degli effetti conseguenti sull'evoluzione della linea di riva tra il 1955 e il 1998.

In particolare a supporto del PRP sono state confrontate l'andamento della linea di riva a partire dagli aerofotogrammi relativi ai seguenti voli:

- Volo del 10/7/1955, produzione: Istituto Geografico Militare;

- Volo del 10/09/1970, produzione: S.A.S. Palermo;
- Volo del 01/10/1976, produzione: S.A.S. Palermo;
- Volo del 20/6/1979, produzione S.A.S. Palermo;
- Volo del 16/05/1983, produzione: S.A.S. Palermo;
- Volo del 27/3/1987, produzione: S.A.S. Palermo;
- Ortofoto del 1998, produzione: Assessorato Regionale Territorio ed Ambiente.

Le immagini riportate mostrano come nell'arco di 30 anni, tra 1955 e il 1985, il tratto di costa in prossimità del sito portuale di Termini Imerese, sia stato caratterizzato da forti fenomeni evolutivi di accrescimento indotti dal materiale solido trasportato dal F. San Leonardo.

I redattori del PRP hanno indicato come fino al 1985, gli ingenti apporti solidi del San Leonardo diretti secondo la direzione longitudinale NO-SE, per via dei fenomeni diffrattivi che si verificano in prossimità della testata del molo foraneo sedimentavano causando il patologico interrimento del sito portuale con la formazione della cosiddetta "Secca di San Giovanni", indicata in rosso nelle immagini dal 1955 al 1979.

Essa veniva utilizzata come spiaggia balneare dagli abitanti della zona.

Le immagini relative al 1987 e al 1998 mostrano, con un cerchio verde, come, la realizzazione della diga Rosamarina (1985) ha provocato l'intercettazione degli apporti solidi provenienti dall'entroterra e ha ridotto l'apporto solido al mare; ciò ha di fatto ridimensionato il fenomeno di sedimentazione in corrispondenza della testata della diga foranea ed all'interno del bacino portuale.



**Figura 4.11 – Evoluzione della linea di riva. Volo del 10/7/1955 Stralcio areofotogrammetrico. Produzione I.G.M. Fonte: Piano Regolatore del Porto di Termini Imerese (Anno 2003).**



**Figura 4.12 – Evoluzione della linea di riva. Volo del 10/9/1970. Stralcio areofotogrammetrico. Produzione S.A.S. Palermo. Fonte: Piano Regolatore del Porto di Termini Imerese (Anno 2003).**



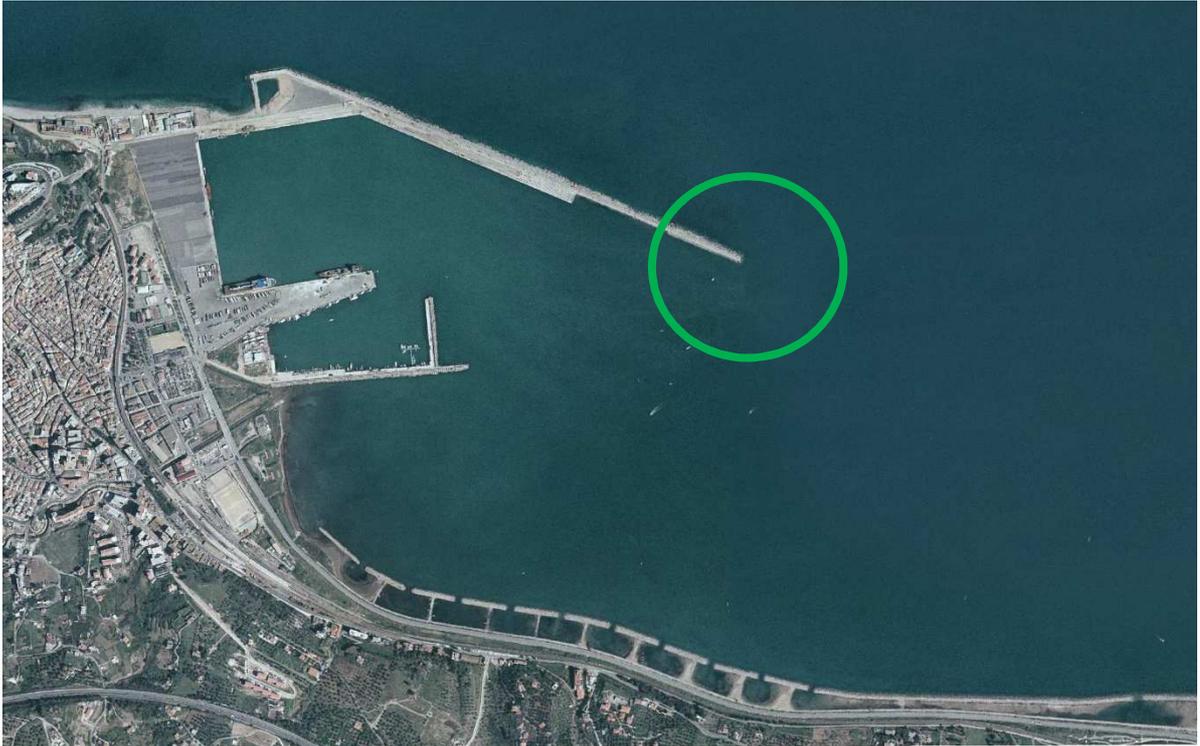
**Figura 4.13 – Evoluzione della linea di riva. Volo del 01/10/1976. Stralcio areofotogrammetrico. Produzione S.A.S. Palermo. Fonte: Piano Regolatore del Porto di Termini Imerese (Anno 2003).**



Figura 4.14 – Evoluzione della linea di riva. Volo del 20/6/1979. Stralcio areofotogrammetrico. ProduzioneS.A.S. Palermo. Fonte: Piano Regolatore del Porto di Termini Imerese (Anno 2003).



Figura 4.15 – Evoluzione della linea di riva. Volo del 27/3/1987. Stralcio areofotogrammetrico. ProduzioneS.A.S. Palermo. Fonte: Piano Regolatore del Porto di Termini Imerese (Anno 2003).



**Figura 4.16 – Evoluzione della linea di riva. Ortofoto del 1998, produzione: Assessorato Regionale Territorio ed Ambiente. Fonte: Piano Regolatore del Porto di Termini Imerese (Anno 2003).**

#### 4.8.1 L'evoluzione della linea di riva dal 1998 al 2003.

Secondo il P.A.I., la sub-unità fisiografica in esame presenta principalmente le seguenti tipologie costiere:

- spiagge basse ciottolose,
- spiagge basse sabbiose-ghiaiose.

L'estensione di tale sub-unità fisiografica è pari a circa 18 Km.

Per la redazione del PAI, è stata eseguita la analisi temporale dell'evoluzione della linea di riva.

In particolare è stato fatto riferimento alla linea di riva degli anni:

- 1992: Fonte CTR in formato raster in scala 1:10.000;
- 1998: Fonte ortofoto in scala 1:10.000
- 2003: Fonte restituzione in formato vettoriale di una ripresa fotogrammetrica.

Naturalmente l'analisi delle variazioni della posizione della linea di riva è legato alla scala e alla georeferenziazione dei dati cartografici disponibili. Lungo il litorale in esame sono stati individuati dei "targets" per cui i fenomeni evolutivi della linea di riva sono stati ritenuti non trascurabili. Le variazioni subite dalla linea di riva, in questi punti, sono state ottenute tramite la seguente formula

$$\Delta Y_{1,2} = Y_2 - Y_1$$

in cui il pedice indica l'anno di riferimento.

Valori positivi di  $\Delta Y$  indicano un avanzamento della linea di costa locale; valori negativi rappresentano un arretramento.

Di seguito si riporta una tabella riepilogativa degli arretramenti registrati per la redazione del PAI.

COMUNE	(frazione)	Arretramento medio stimato tra gli anni 1992 e 2003 (Larghezza in m.)
<b>TERMINI IMERESE</b>		
	Ovest foce S.Leonardo 1	4
	Ovest foce S.Leonardo 2	7
	Est foce S.Leonardo 1	10
	Est foce S.Leonardo 2	12
	Est foce S.Leonardo 3	12
	Est foce S.Leonardo 4	16
	Sopraflutto porto Termini	8
	Casello Bello	3
	Centrale termoelettrica	10
	Stabilimento FIAT	6
	Est Foce Fiume Torto	19
	Pontile	4
	Torre Battilamano 1	6
	Torre Battilamano 2	6
	Torre Battilamano 3	8
	Villaggio Tedesco	8
	Ovest Foce Imera	10

**Tabella 4.3 –Evoluzione della linea di riva. Arretramento medio stimato nel periodo 1992-2003. Fonte di riferimento: relazione dell' U.F.18 del P.A.I. della Regione Sicilia (2006).**

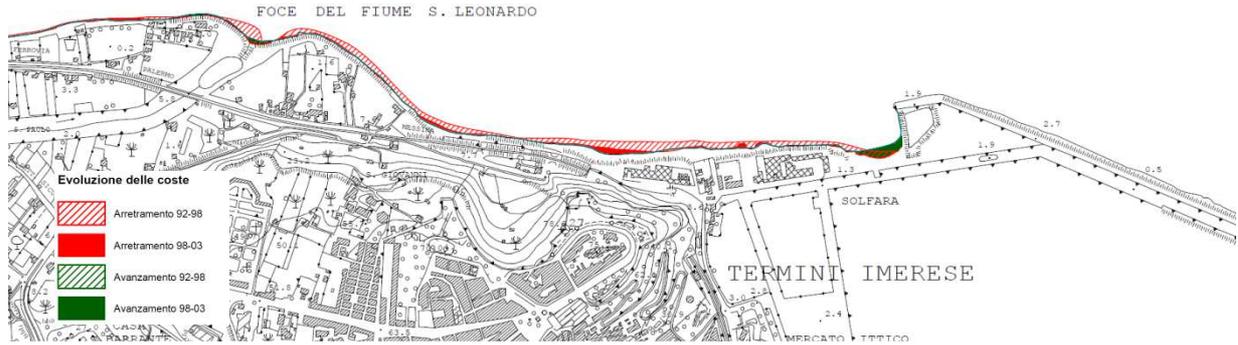
In prossimità della foce del fiume S. Leonardo il fenomeno di erosione è molto accentuato con arretramenti pari mediamente a 12 m tra il 1992 e il 2003: ciò è legato al depauperamento degli apporti solidi del fiume per effetto dello sbarramento costituito dalla diga di Rosamarina.

Tale deficit è così rilevante che il litorale è in arretramento anche a ridosso del molo del porto di Termini Imerese, laddove cioè sarebbe naturale attendersi un avanzamento per accumulo dei sedimenti trasportati da occidente verso oriente dalle correnti generate dal moto ondoso. L'arretramento a ridosso del porto ha entità comprese tra 16 e 8 m tra il 1992 e il 2003.

Si osserva che la realizzazione del piazzale presso la radice del molo foraneo ha indotto dei fenomeni di avanzamento della linea di costa per via dell'aggetto costituito dalla stessa opera verso il mare aperto tra il 1998 e il 2003.

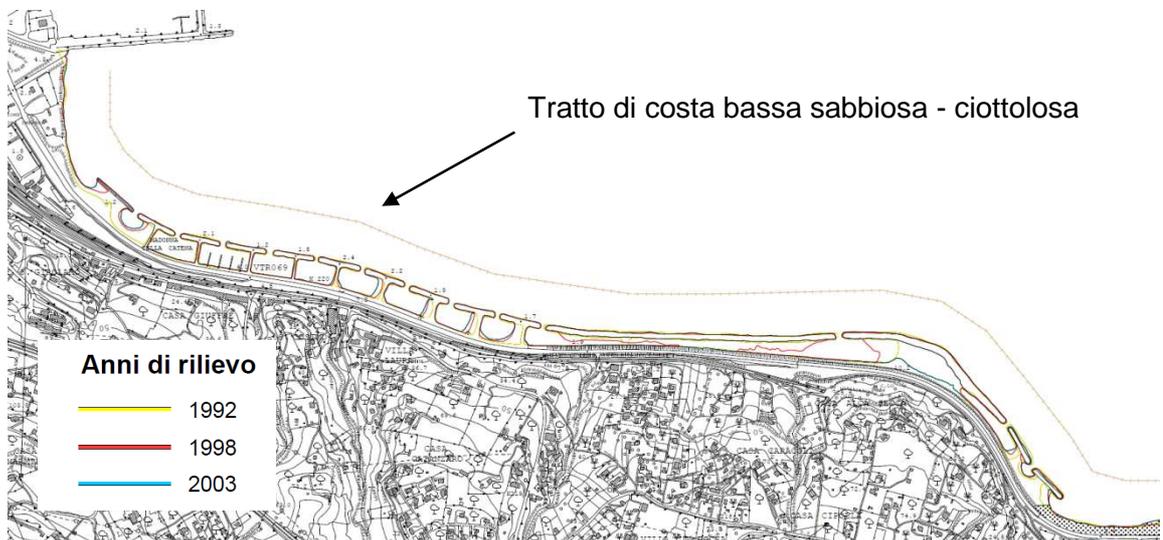


**Figura 4.17 – Evoluzione della linea di riva. Tratto compreso tra la foce del Fiume S. Leonardo e la radice del molo di sopraflutto del porto di Termini Imerese. Sovrapposizione tra le linee di riva. Fonte di riferimento: Cartografia allegata alla relazione dell' U.F.18 del P.A.I. della Regione Sicilia (2006).**



**Figura 4.18 – Evoluzione della linea di riva. Tratto compreso tra la foce del Fiume S. Leonardo e la radice del molo di sopraflutto del porto di Terminì Imerese. Stima dei tratti in avanzamento o in arretramento. Fonte di riferimento: Cartografia allegata alla relazione dell' U.F.18 del P.A.I. della Regione Sicilia (2006).**

Ad est del porto di Terminì Imerese la linea di costa è totalmente irrigidita dal sistema di difesa costituito da pennelli e barriere emerse parallele alla costa, che ha favorito nel corso degli anni un accumulo di sedimenti per effetto diffrattivo delle scogliere.



**Figura 4.19 – Evoluzione della linea di riva. Tratto compreso tra il molo di sottoflutto del porto di Terminì Imerese e la zona industriale. Sovrapposizione tra le linee di riva. Fonte di riferimento: Cartografia allegata alla relazione dell' U.F.18 del P.A.I. della Regione Sicilia (2006).**



**Figura 4.20 – Evoluzione della linea di riva. Tratto compreso tra il molo di sottoflutto del Porto di Terminì Imerese e l'indotto industriale. Stima dei tratti in avanzamento o in arretramento. Fonte di riferimento: Cartografia allegata alla relazione dell' U.F.18 del P.A.I. della Regione Sicilia (2006).**

A ovest della foce del fiume Torto, in prossimità del canale di scarico della centrale Enel, si nota un'area localizzata di forte erosione, seguita da un accumulo che si estende fino alle barriere parallele poste a protezione della zona industriale: sottoflutto a queste barriere vi è una zona soggetta ad erosione (cfr. le figure 4.17 e 4.18). I pennelli aggettanti realizzati alla foce del fiume Torto sono la causa principale dell'erosione del litorale immediatamente a levante di questo sbocco fluviale, che non si è esteso molto lungo la costa poiché è stato realizzato un intervento di protezione a salvaguardia dell'area industriale di Termini Imerese. A est della foce del fiume Torto l'arretramento è stato stimato pari a 19 m.

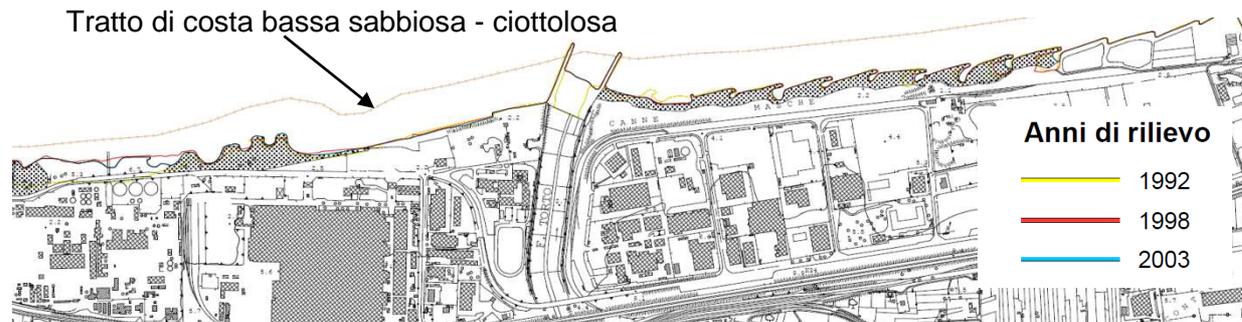


Figura 4.21 – Evoluzione della linea di riva. Tratto in prossimità della foce del Fiume Torto. Sovrapposizione tra le linee di riva. Fonte di riferimento: Cartografia allegata alla relazione dell' U.F.18 del P.A.I. della Regione Sicilia (2006).

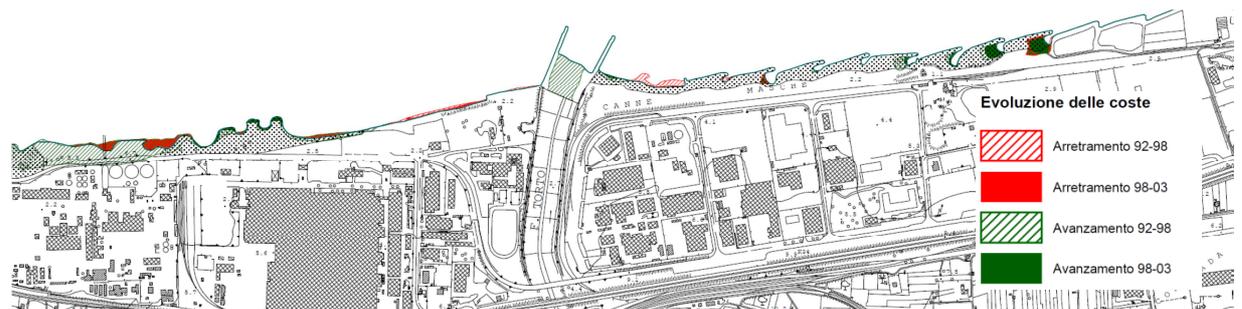


Figura 4.22 – Evoluzione della linea di riva. Tratto in prossimità della foce del Fiume Torto. Stima dei tratti in avanzamento o in arretramento. Fonte di riferimento: Cartografia allegata alla relazione dell' U.F.18 del P.A.I. della Regione Sicilia (2006).

A partire dalla località "Torre Battilmano" il litorale è soggetto ad un arretramento che è possibile stimare in media pari a 8 m fino alla foce del fiume Imera Settentrionale. Oltrepassato tale fiume il fenomeno erosivo con arretramenti che interessano il litorale di Campofelice di Roccella stimabili in media nell'ordine di una decina di metri nel periodo 1992-2003. Tale fenomeno interessa il litorale che si estende immediatamente a levante del fiume Imera per uno sviluppo di circa 2 km con estrema intensità.

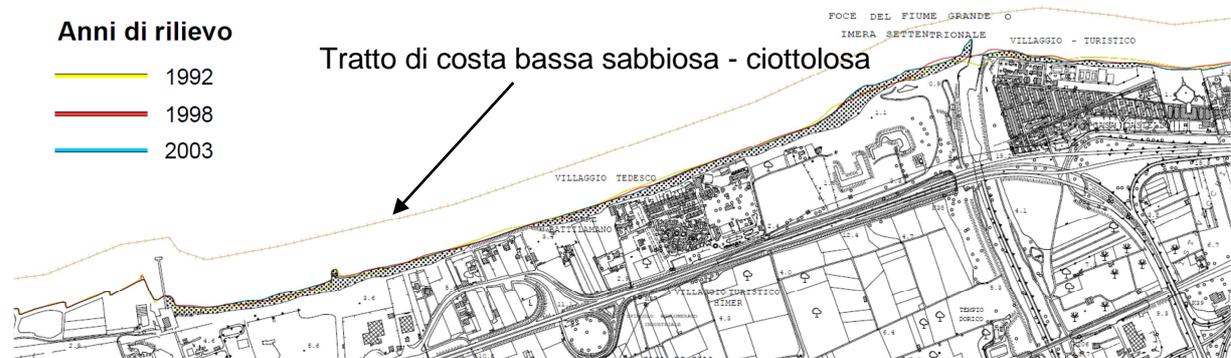
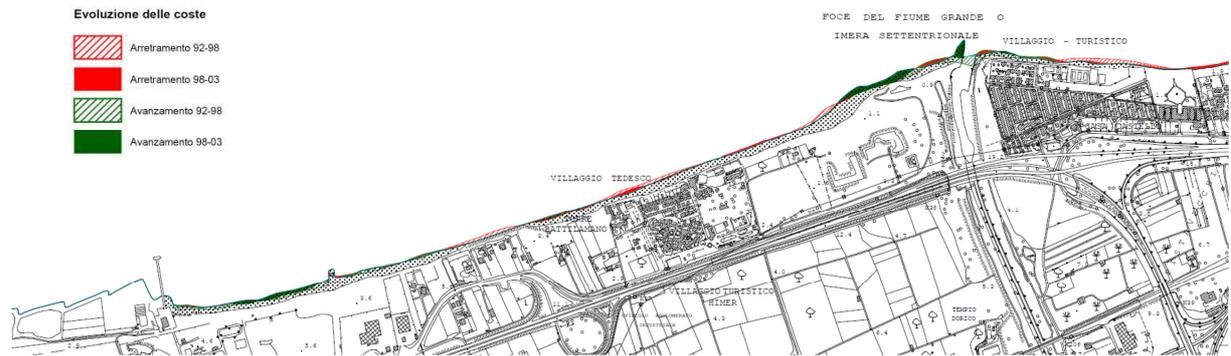


Figura 4.23 – Evoluzione della linea di riva. Tratto in prossimità della foce del Fiume Imera settentrionale. Sovrapposizione tra le linee di riva. Fonte di riferimento: Cartografia allegata alla relazione dell' U.F.18 del P.A.I. della Regione Sicilia (2006).



**Figura 4.24 – Evoluzione della linea di riva. Tratto in prossimità della foce del Fiume Imera settentrionale. Stima dei tratti in avanzamento o in arretramento. Fonte di riferimento: Cartografia allegata alla relazione dell' U.F.18 del P.A.I. della Regione Sicilia (2006).**

Per la redazione del PAI, la definizione del livello di rischio di erosione di un tratto di costa, è stata effettuata mediante l'utilizzo di una matrice costruita sul grado di pericolosità e sul livello del valore del bene "spiaggia".

Lo stato di pericolosità per erosione costiera di un tratto di costa bassa viene stimata in funzione dei seguenti parametri:

- l'intensità o magnitudo (M), intesa come "severità" del fenomeno erosivo;
- lo stato di sollecitazione (S), inteso come numero di eventi di mareggiata che hanno interessato il tratto di costa.

La definizione dell'*intensità* è stata legata ai seguenti fattori:

- gradiente di arretramento, in base all'analisi della posizione storica della linea di riva;
- la larghezza media della fascia costiera attuale;

secondo il seguente schema:

		Larghezza Media Spiaggia		
		L < 10 m	10m < L < 50 m	L > 50m
Velocità di Arretramento	V < 1 m/anno	M3	M2	M1
	1 < V < 5 m/anno	M4	M3	M2
	V > 5 m/anno	M4	M4	M3

**Tabella 4.4 – Matrice per la valutazione della Magnitudo. Fonte di riferimento: relazione dell' U.F.18 del P.A.I. della Regione Sicilia (2006).**

Si definisce *stato di carico o sollecitazione* la condizione di pressione esercitata dal clima meteomarinico sul litorale: questa variabile è indicativa della frequenza con cui gli eventi dannosi hanno interessato un tratto di costa.

Per la stima dello *stato di carico o sollecitazione*, è stata utilizzata la seguente matrice.

Classe di sollecitazione	Scala	Mareggiate nell'ultimo decennio
Molto alta	S <sub>3</sub>	Più di 8 mareggiate
Alta	S <sub>2</sub>	Da 6 a 8 mareggiate
Media	S <sub>1</sub>	Da 3 a 5 mareggiate
Bassa o nulla	S <sub>0</sub>	Da 0 a 2 mareggiate

Tabella 4.5 – Matrice per la valutazione della sollecitazione. Fonte di riferimento: relazione dell' U.F.18 del P.A.I. della Regione Sicilia (2006).

Dalla correlazione fra magnitudo e stato di carico (o sollecitazione) è possibile ricavare una valutazione indicativa della *pericolosità*, intesa come prodotto della magnitudo per la sollecitazione, ( $P=M_x S_x$ ).

Sono identificate 5 classi di pericolosità P0,P1,P2, P3, P4 che rappresentano un'intensità via via crescente.

			Magnitudo			
			M1	M2	M3	M4
Stato di Sollecitazione	Molto alto	S3	P3	P3	P4	P4
	Alto	S2	P2	P3	P3	P4
	Medio	S1	P1	P2	P3	P3
	Basso o nullo	S0	P0	P1	P2	P3

Tabella 4.6 – Matrice per la valutazione della pericolosità. Fonte di riferimento: relazione dell' U.F.18 del P.A.I. della Regione Sicilia (2006).

P0	Pericolosità Nulla
P1	Pericolosità Bassa
P2	Pericolosità Media
P3	Pericolosità Elevata
P4	Pericolosità Molto elevata

Tabella 4.7 – Matrice per la definizione degli stati di pericolosità. Fonte di riferimento: relazione dell' U.F.18 del P.A.I. della Regione Sicilia (2006).

Per giungere poi alla valutazione finale del rischio, si è cercato dapprima di pervenire ad una definizione e valutazione degli elementi vulnerabili, ritenendo opportuno classificare i beni spiagge esposte al pericolo in 2 classi, secondo un valore crescente.

Classe	Descrizione
E2	Spiagge e coste alte.
E3	Spiagge ed aree costiere di alta valenza turistico- ambientale.

Tabella 4.8 – Matrice per la definizione degli elementi vulnerabili. Fonte di riferimento: relazione dell' U.F.18 del P.A.I. della Regione Sicilia (2006).

Attraverso dunque la combinazione dei due fattori pericolosità P ed elementi a rischio E, si arriva alla determinazione del rischio.

La Tabella seguente mostra le possibili combinazioni fra P ed E.

		Elementi a Rischio	
		E2	E3
Pericolosità	P1	R1	R2
	P2	R2	R3
	P3	R3	R4
	P4	R4	R4

Tabella 4.9 – Matrice per la definizione dei livelli di rischio erosione. Fonte di riferimento: relazione dell' U.F.18 del P.A.I. della Regione Sicilia (2006).

Nel P.A.I. sono individuati lo stato di pericolosità e di rischio per quei tratti di costa in cui gli arretramenti sono significativi e cioè almeno pari a 5 m.

Nella tabella successiva per il tratto di costa che va dal Fiume San Leonardo al Fiume Imera si riportano le informazioni usate nel PAI, il toponimo della località, la lunghezza in metri del tratto considerato, la classe di magnitudo, il livello di pericolosità, il grado di attenzione e il livello di rischio.

Comune	lunghezza spiaggia (m)	Magnitudo	Pericolosità	Elementi a rischio	Rischio
Ovest foce S.Leonardo 1	251	M3	P4	E2	R3
Ovest foce S.Leonardo 2	324	M3	P4	E3	R4
Est foce S.Leonardo 1	206	M4	P4	E2	R4
Est foce S.Leonardo 2	168	M2	P3	E2	R3
Est foce S.Leonardo 3	246	M4	P4	E2	R4
Est foce S.Leonardo 4	552	M3	P4	E2	R4
Sopraflutto porto Termini	228	M3	P4	E2	R4
Casello Bello	174	M3	P3	E2	R3
Centrale termoelettrica	523	M3	P3	E2	R3
Stabilimento FIAT	643	M3	P3	E2	R3
Est Foce Fiume Torto	184	M3	P3	E2	R3
Pontile	112	M2	P2	E2	R2
Torre Battilmano 1	83	M3	P3	E2	R3
Torre Battilmano 2	355	M2	P2	E2	R2
Torre Battilmano 3	190	M4	P3	E2	R3
Villaggio Tedesco	697	M3	P3	E3	R4
Ovest Foce Imera	133	M3	P3	E3	R4

Tabella 4.10 – Individuazione dei tratti di costa a rischio. Fonte di riferimento: relazione dell' U.F.18 del P.A.I. della Regione Sicilia (2006).

Secondo le analisi eseguite durante la redazione del PAI all'interno della sub-unità fisiografica, lo sviluppo dei tratti di costa in erosione è pari a circa 5 km.

Per quanto riguarda la classificazione, lo sviluppo delle costa classificata "P2" è pari a 467 m, la costa classificata "P3" è pari a 2.795 m; la costa classificata "P4" è pari a 771 m.

Per quanto riguarda la classificazione, lo sviluppo delle costa classificata "R2" è pari a 467 m, la costa classificata "R3" è pari a 2.216 m, la costa classificata "R4" è pari a 2.386 m.

Per le zone R4 ricadenti nel comune di Termini Imerese comprese tra la foce del Fiume San Leonardo e la radice del molo di sopraflutto per la protezione degli elementi a rischio presenti il comune di Termini Imerese sta conducendo l'iter per la realizzazione di interventi di recupero e stabilizzazione della spiaggia in erosione che prevedono la realizzazione di scogliere soffolte, da finanziare con sovvenzione del Ministero dell'Ambiente.

Di seguito si riportano gli stralci cartografici di riferimento.

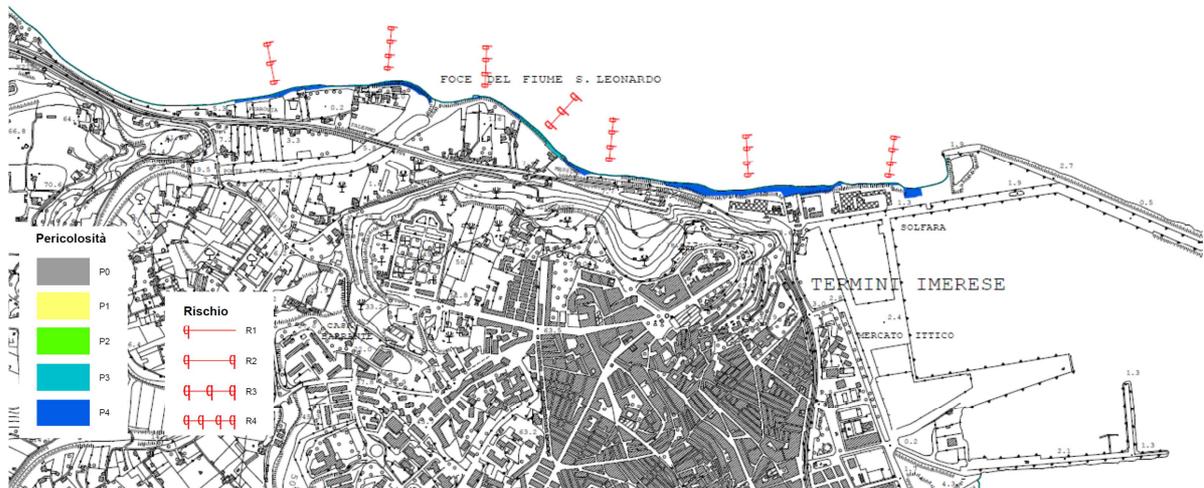
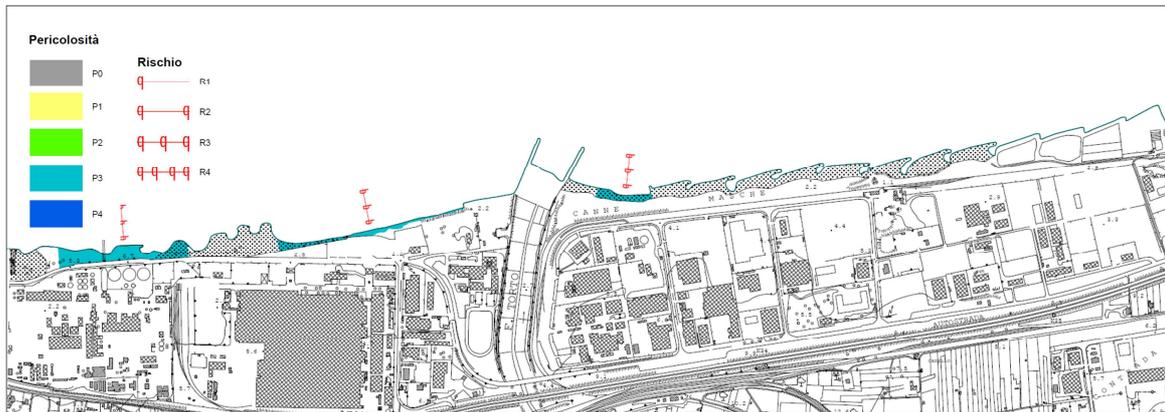


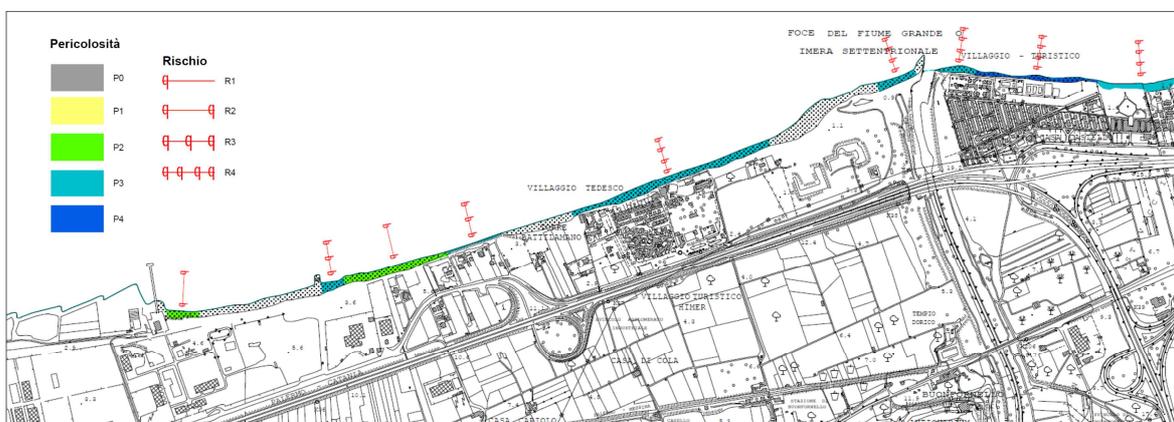
Figura 4.25 – Valutazione della pericolosità e del Rischio per erosione. Tratto compreso tra la foce del Fiume S. Leonardo e la radice del molo di sopraflutto del Porto di Termini Imerese. Fonte di riferimento: Cartografia allegata alla relazione dell' U.F.18 del P.A.I. della Regione Sicilia (2006).



Figura 4.26 – Valutazione della pericolosità e del Rischio per erosione. Tratto compreso tra il molo di sottoflutto del Porto di Termini Imerese e l'indotto industriale. Fonte di riferimento: Cartografia allegata alla relazione dell' U.F.18 del P.A.I. della Regione Sicilia (2006).



**Figura 4.27 – Valutazione della pericolosità e del Rischio per erosione. Tratto in prossimità della foce del Fiume Torto.. Fonte di riferimento: Cartografia allegata alla relazione dell' U.F.18 del P.A.I. della Regione Sicilia (2006).**



**Figura 4.28 – Valutazione della pericolosità e del Rischio per erosione .Tratto in prossimità della foce del Fiume Imera settentrionale. Fonte di riferimento: Cartografia allegata alla relazione dell' U.F.18 del P.A.I. della Regione Sicilia (2006).**

#### 4.8.2 L'evoluzione della linea di riva dal 2003 a oggi

Di seguito si riportano alcuni stralci relativi ad ortofoto e immagini satellitari dell'area in prossimità al sito di interesse relative al periodo che va dal 2003 a oggi. Nelle immagini successive con un rettangolo rosso viene identificata l'area compresa tra la foce del fiume San Leonardo e la radice del molo di sopraflutto, con un cerchio rosso l'area della testata del molo foraneo di sopraflutto.

Le immagini successive mostrano come lo stato dell'evoluzione della linea di riva in prossimità del sito portuale sia rimasta pressochè simile a quella del periodo precedente, dato che nel periodo suddetto non ci sono stati interventi di rilievo lungo il tratto di litorale in esame in grado di apportare sostanziali modifiche all'equilibrio dinamico costiero.

Nell'area tra la foce del fiume San Leonardo e la radice del molo di sopraflutto la tendenza all'erosione è tuttora presente. Si ricorda a tal fine, come già accennato nella sezione precedente, che il comune di Termini Imerese sta conducendo l'iter per la realizzazione di interventi di recupero e stabilizzazione di questo tratto di litorale in erosione che prevedono la realizzazione di scogliere soffolte.

In prossimità della testata del molo di sopraflutto, rimanendo inalterato il regime dell'apporto solido fluviale e costiero, i fenomeni di interrimento sono tuttora ridotti rispetto a quanto accadeva precedentemente alla realizzazione della diga Rosamarina.



Figura 4.29 – Evoluzione della linea di riva. Immagine satellitare del 2006. (Fonte: Google Earth).



Figura 4.30 – Evoluzione della linea di riva. Stralcio dell'ortofoto del 2009. (Fonte: Ortofoto ATA 2008 – SITR- Regione Sicilia).



Figura 4.31 – Evoluzione della linea di riva. Immagine satellitare del 2012. (Fonte: Google Earth).

### 4.8.3 Conclusioni sull'evoluzione della linea di riva

---

Le indagini compiute sull'evoluzione della linea di riva mostrano come la costa dell'unità fisiografica sia soggetta a tendenze erosive diffuse.

Negli anni si è osservato il depauperamento degli apporti solidi fluviali e marini, dovuta alla realizzazione di manufatti ed infrastrutture sia lungo la costa che all'interno nei bacini imbriferi tributari.

Tra le opere che hanno inciso maggiormente nel mancato apporto di materiali sono da considerare gli sbarramenti, come la diga di Rosamarina sul Fiume S.Leonardo, le briglie e traverse fluviali, su tutti i fiumi principali afferenti all'unità fisiografica, che catturano i sedimenti, ed infine le opere di sistemazioni delle foci del fiume Torto e fiume Imera Settentrionale.

Per comprendere l'ordine di grandezza di tale riduzione di materiale solido, basti pensare che fino alla realizzazione della diga Rosamarina, il San Leonardo era in grado di fornire quantità di materiale solido tali da indurre elevati fenomeni di interrimento in prossimità della testata del molo foraneo, formando la cosiddetta "Secca di San Giovanni", utilizzata come spiaggia balneare dagli abitanti della zona. A seguito della realizzazione della Diga Rosamarina, tale secca è completamente scomparsa per via del mancato apporto solido.

La morfologia attuale, quindi, è stata fortemente influenzata anche dallo sviluppo degli insediamenti abitativi ed allo sfruttamento agricolo ed industriale della fascia retrostante la spiaggia. Le attività umane ed i manufatti costruiti hanno determinato in più punti l'interruzione dei cordoni dunali determinando una grave alterazione del regime degli apporti sedimentari e del loro trasporto e distribuzione. Le caratteristiche tessiturali dei sedimenti di spiaggia emersa corrispondono oggi a quelle dei sedimenti grossolani.

Ciò ha generato i fenomeni di arretramento che permangono ancora oggi.

Ai fini di limitare gli effetti causati dal continuo processo di erosione che coinvolge le coste sono stati realizzati, nel corso degli anni alcuni interventi di protezione. Ivi la linea di riva è completamente stabilizzata.

Nei tratti di litorali invece ove tali interventi non sono stati realizzati i fenomeni di arretramento sono molto ampi e ciò indotto la Regione Sicilia a classificare nel P.A.I. (anno 2006) tali aree come ad elevato rischio erosivo (R4). Tra queste aree ricade il tratto di litorale compreso tra la foce del F. San Leonardo e il sito portuale. Per tale tratto costiero sono in fase di approvazione alcuni interventi di protezione in cui promotore e il comune di Termini Imerese.

### 4.9 ANALISI DEL TRASPORTO SOLIDO CROSS-SHORE

---

Per verificare se, per i litorali in prossimità del sito portuale di Termini Imerese siano caratterizzati da fenomeni di trasporto solido cross-shore, caratteristici dell'evoluzione della costa nel breve periodo, sono state effettuate alcune simulazioni numeriche mediante l'applicazione del codice di calcolo SBEACH, sviluppato dal Coastal Engineering Reserch Center, oggi CHL, dell'U.S. Army Corps of Engineers.

*SBEACH* è un modello numerico bidimensionale sviluppato per predire le risposte morfologiche cross-shore, fondato su formulazioni teorico-sperimentali, che simula le variazioni del profilo trasversale di una spiaggia sottoposta all'azione del moto ondoso frangente. Esso calcola i cambiamenti del profilo di spiaggia, tenendo conto dell'erosione delle dune e della formazione o degli spostamenti delle barre sommerse. Si osserva come le trasformazioni simulate da questo modello siano relative all'ambito dei singoli eventi di mareggiate e quindi del breve periodo, da cui, comunque è possibile dedurre informazioni sugli effetti indotti sul regime dei sedimenti e sulla dinamica del litorale.

Una delle ipotesi fondamentali del codice di calcolo SBEACH è che il cambiamento del profilo sia prodotto unicamente dai fenomeni di dinamica trasversale e dalla redistribuzione del sedimento lungo il profilo stesso, senza variazioni volumetriche complessive. I processi longitudinali sono considerati uniformi con risultante nulla nei confronti dei cambiamenti del profilo trasversale di spiaggia.

Per il calcolo delle risposte morfodinamiche del profilo di spiaggia il codice di calcolo richiede i dati tipici utilizzati per gli studi di ingegneria marittima; in particolare, come condizioni al contorno ed iniziali, necessita della sequenza temporale di altezze, periodi e direzioni d'onda relativi alla mareggiata di calcolo, dei livelli idrici, dei dati che descrivono le coordinate del profilo trasversale e del diametro medio del sedimento  $D_{50}$ .

Informazioni dettagliate sul metodo di sviluppo del modello e su varie applicazioni possono essere reperite in una serie di documenti tecnici e nei manuali del C.E.R.C. (Larson and Kraus 1989; Larson, Kraus, and Byrnes 1990; Rosati et al. 1993; Wise, Smith, and Larson 1996).

#### 4.9.1 SCELTA DELLE CONDIZIONI AL CONTORNO ED INIZIALI

##### 4.9.1.1 Profili di indagine

Per verificare il trasporto solido cross-shore, sono stati individuati 2 profili di indagine, come riportato nella figura successiva.

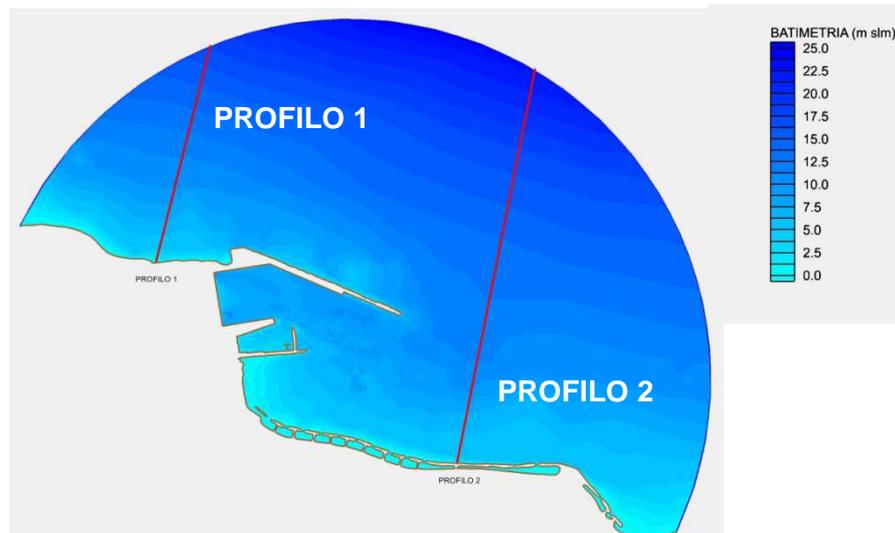


Figura 4.32 – Localizzazione dei profili per l'analisi cross-shore

I profili di indagine sono stati orientati secondo la direzione pressochè normale alla direzione "media" della linea di riva.

I profili individuati sono i seguenti:

- *profilo 1*: si sviluppa per 1.350 m, è localizzato nel tratto di litorale immediatamente a ovest delle attuali opere portuali;
- *profilo 2*: si estende per 2.550 m, è situato nel tratto di litorale immediatamente a est delle attuali opere portuali ed interseca una delle scogliere di protezione.

La geometria di tali profili è stata estratta dal dominio numerico costruito dalla scrivente per gli studi idrodinamici, applicando algoritmi di interpolazione ai dati batimetrici delle carte nautiche e a quelli derivati dai rilievi batimetrici forniti dall'Autorità committente; la batimetria all'interno del dominio varia tra 0 e -25,00 m sul l.m.m.. Ai fini computazionali, i profili

sopraindicati sono stati discretizzati in celle regolari di dimensione pari a 10,00 m; il *profilo 1* è stato discretizzato in 144 celle, il *profilo 2* in 246 celle.

#### 4.9.1.2 Stato di mare

Dallo studio del clima d'onda (cfr "*Studio meteomarinò*"), sulle batimerie dei – 25 m slm, i treni d'onda si distribuiscono sottocosta secondo due direzioni principali:

- $D_s=330^\circ N$  (Maestrale), rappresentativa delle onde del IV quadrante;
- $D_s=45^\circ N$  (Grecale), rappresentativa delle onde del I q quadrante.

Al fine di determinare il profilo trasversale assunto dai fondali a seguito del moto ondoso sono state impiegate, come stati di mare di calcolo, per i motivi già introdotti al paragrafo 4.6.5 e con le stesse modalità di calcolo, le mareggiate annuali per le due direzioni principali sottocosta:

- $H_s=4,00\text{ m}$ ;  $T=9.2\text{ s}$ ;  $D_s=330^\circ N$ ;
- $H_s=3,20\text{ m}$ ;  $T=8.0\text{ s}$ ;  $D_s=45^\circ N$ .

La durata delle mareggiate è stata calcolata in base al concetto di "mareggiata triangolare equivalente" (Boccotti, 2004) e posti pari a 30 ore.

Di seguito si riportano i diagrammi temporali delle mareggiate di calcolo.

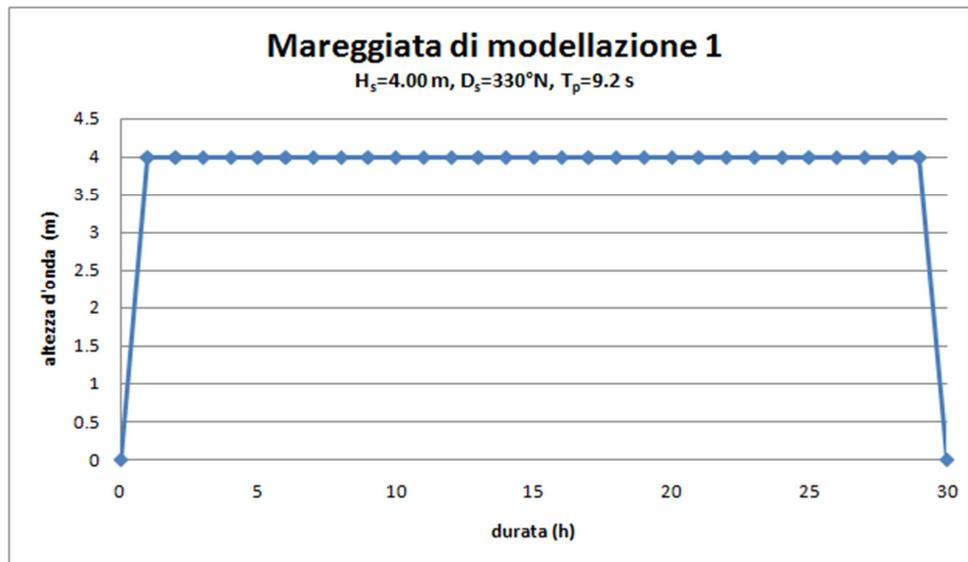


Figura 4.33 – Diagramma temporale della mareggiata di calcolo 1

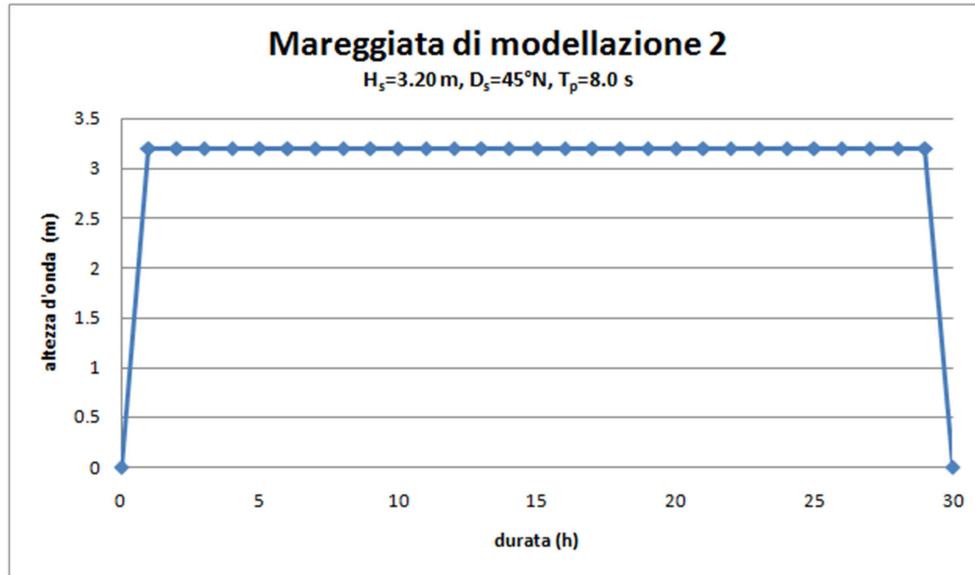


Figura 4.34 – Diagramma temporale della mareggiata di calcolo 2

Inoltre, è stato considerato il fatto che la direzione di propagazione non è normale alla linea di riva, ed è stato quindi applicato un angolo di inclinazione.

Infine è stata considerata la variazione media dei livelli idrici, in considerazione degli effetti dovuti alla marea astronomica, alle variazioni di pressione, al moto ondoso e all'azione anemologica, implementando un'escursione di livello tra -30 e +30 cm sul l.m.m., con andamento temporale semidiurno.

#### 4.9.1.3 Caratteristiche dei sedimenti e della spiaggia

Il modello di calcolo presenta un limite relativo alla tipologia di sedimento soggetto ai fenomeni di trasporto cross-shore; esso è capace di simulare sedimenti caratterizzati da  $D_{50}$  compreso tra 0,1 e 1,0 mm (sabbie).

Dai dati sedimentologici forniti è emerso che i sedimenti presenti sul sito di Termini Imerese presentano i seguenti diametri caratteristici:

- $D_{50}=0,05$  mm in prossimità del molo di sottoflutto;
- $D_{50}=0,15$  mm in prossimità della testa del molo di sopraflutto;
- $D_{50}=0,5$  mm presso la spiaggia sommersa a ovest del porto;
- $D_{50}=1,0$  mm presso la spiaggia emersa a ovest del porto.

Sono state, quindi, implementate 3 differenti granulometrie di modellazione:

- sedimenti fini:  $D_{50} = 0,1$  m;
- sedimenti medi:  $D_{50} = 0,5$  mm;
- sedimenti grossolani:  $D_{50} = 1,0$  mm.

Altri parametri caratteristici, ai fini dell'analisi cross-shore, sono rappresentati da:

- profondità di transito  $D$  tra la "surf zone" e la "swash zone";
- angolo di massima pendenza del profilo  $P$ , caratteristico del movimento incipiente dei sedimenti.

Per le applicazioni inerenti a questo studio, tali grandezze sono state fissate pari a:

- $D = 0,5$  m;
- $P = 15^\circ$ .

Inoltre, le scogliere di protezione sono state implementate con elementi inerodibili.

#### 4.9.2 SIMULAZIONI EFFETTUATE

Di seguito si riportano, i diagrammi rappresentativi dell'evoluzione dei profili.

##### 4.9.2.1 Granulometria con $D_{50} = 0,1 \text{ mm}$ .

Si riportano, per  $D_{50} = 0,1 \text{ mm}$ , i diagrammi di sovrapposizione tra la posizione iniziale e finale dei profili sotto le mareggiate in analisi. È stato riportato in blu il profilo iniziale, in rosso il profilo finale.

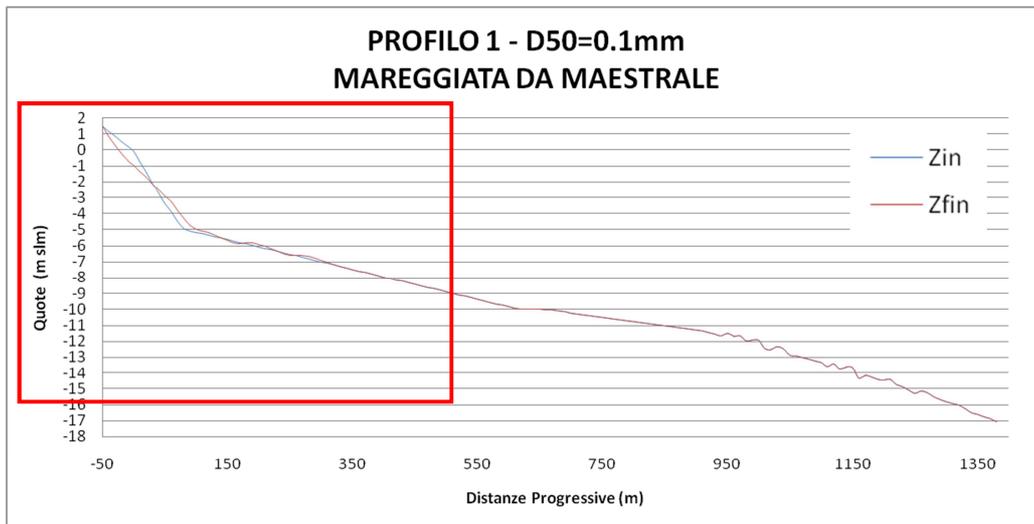


Figura 4.35 – Evoluzione del profilo per trasporto solido cross-shore: profilo 1,  $D_{50} = 0,1 \text{ mm}$ ; mareggiata annuale da maestrale

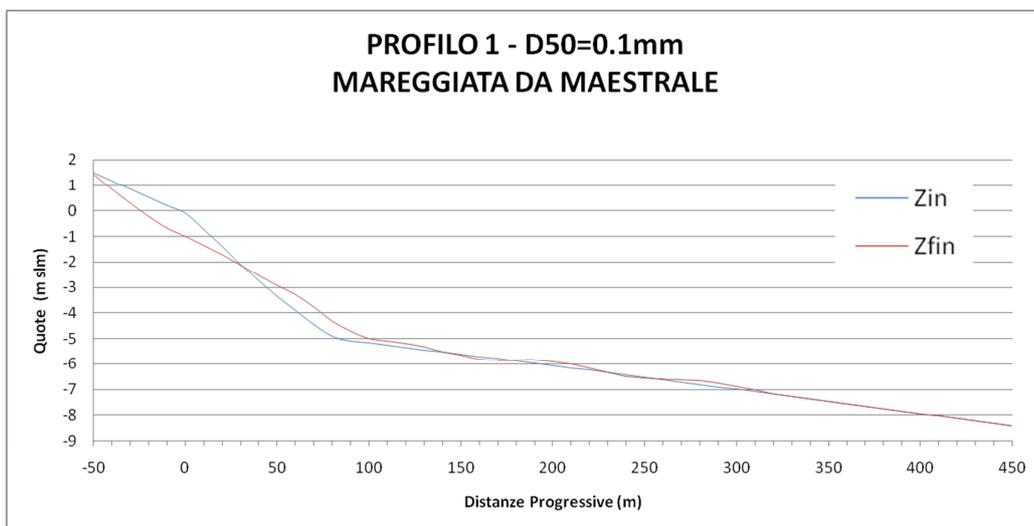
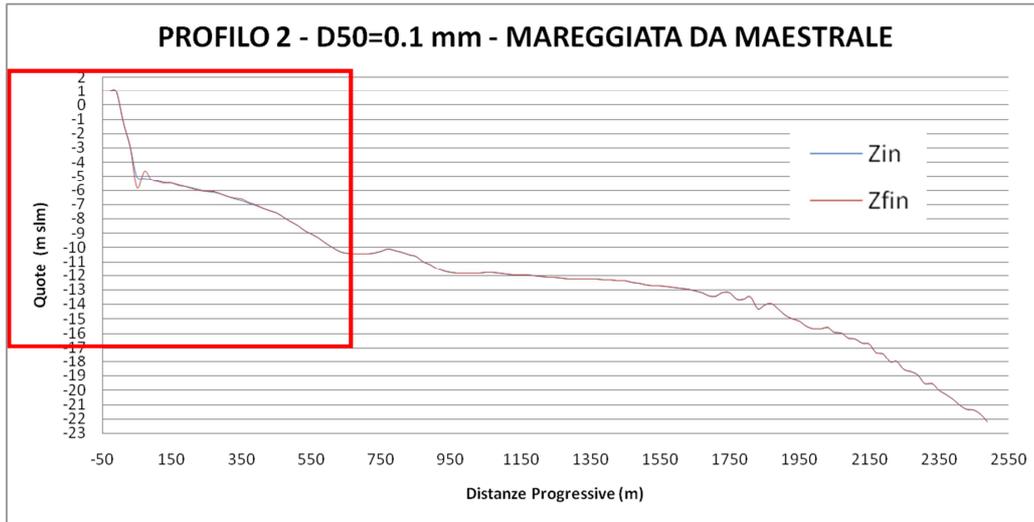


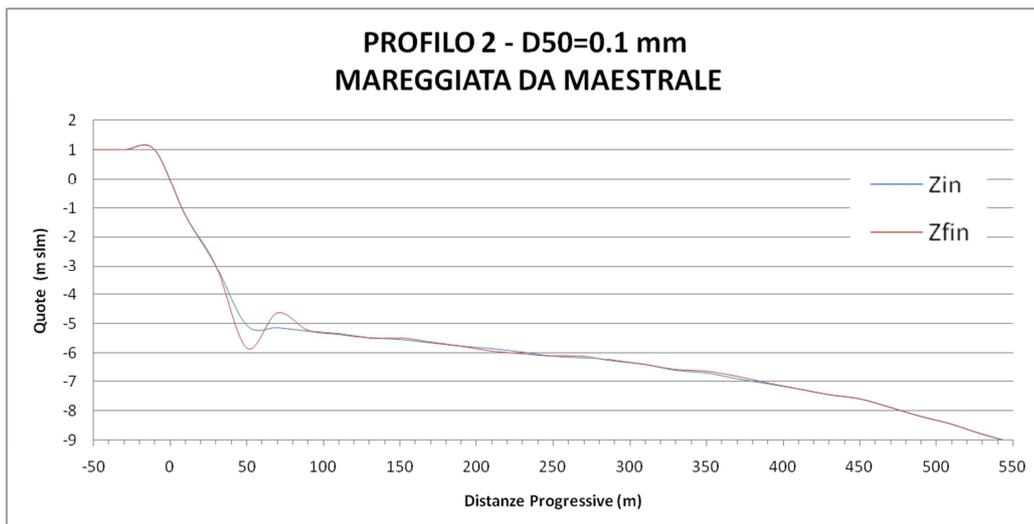
Figura 4.36 – Particolare dell'evoluzione del profilo per trasporto solido cross-shore: profilo 1,  $D_{50} = 0,1 \text{ mm}$ ; mareggiata annuale da maestrale.

I risultati sopra riportati mostrano che, per il profilo 1 e mareggiata sottocosta annuale da maestrale, la zona di rimaneggiamento dei sedimenti si localizza tra la linea di riva e la batimetrica dei  $-7,00 \text{ m}$  sul l.m.m.; l'estensione della surf zone è circa  $300 \text{ m}$ .

Sotto la mareggiata di calcolo la linea di riva è in leggera erosione, con escursione di quota dell'ordine del metro ed un arretramento della linea di riva dello stesso ordine.



**Figura 4.37 – Evoluzione del profilo per trasporto solido cross-shore: profilo 2,  $D_{50} = 0,1$  mm; mareggiata annuale da maestrale**



**Figura 4.38 – Particolare dell'evoluzione del profilo per trasporto solido cross-shore: profilo 2,  $D_{50} = 0,1$  mm mareggiata annuale da maestrale**

Per il profilo 2 sotto la mareggiata da maestrale gli effetti di rimescolamento dei sedimenti, relativi alla mareggiata considerata sono evidenti sui fondali compresi tra la batimetrica dei - 6,00 m sul l.m.m. e la linea di riva; l'estensione della surf zone è circa 100 m.

Inoltre, per questo profilo, si osservano gli effetti di protezione indotti dalla scogliera emersa: infatti, tra la scogliera e la battigia non si osserva nessun fenomeno di evoluzione della linea di riva e gli effetti di rimescolamento si osservano al piede dell'opera di protezione.

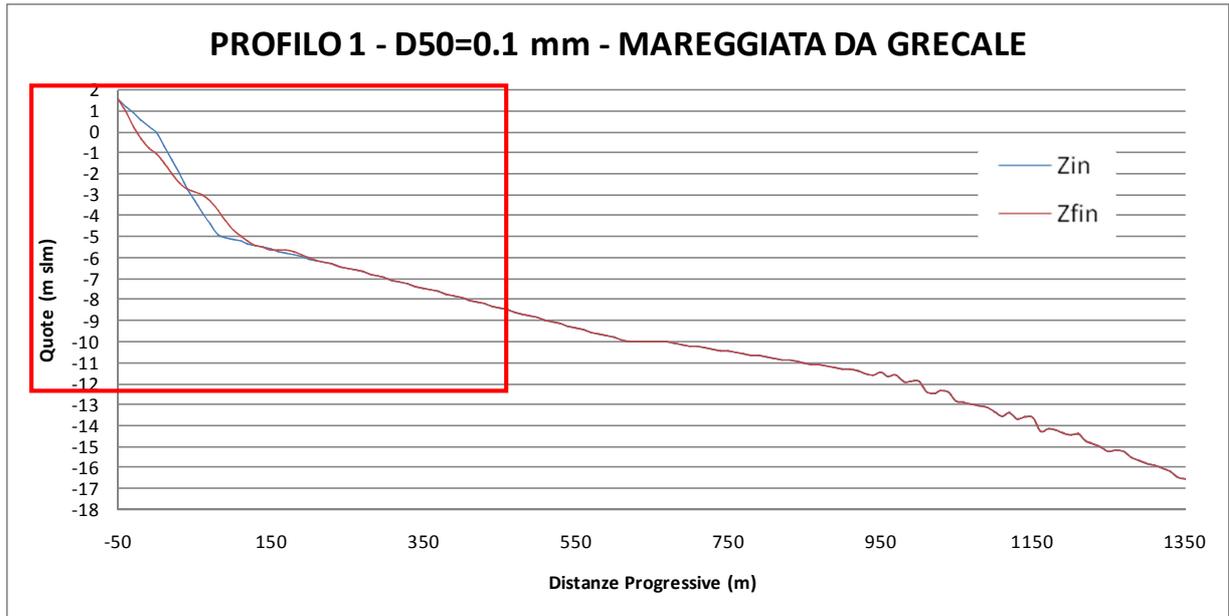


Figura 4.39 – Evoluzione del profilo per trasporto solido cross-shore: profilo 1,  $D_{50} = 0,1$  mm; mareggiata annuale da grecale

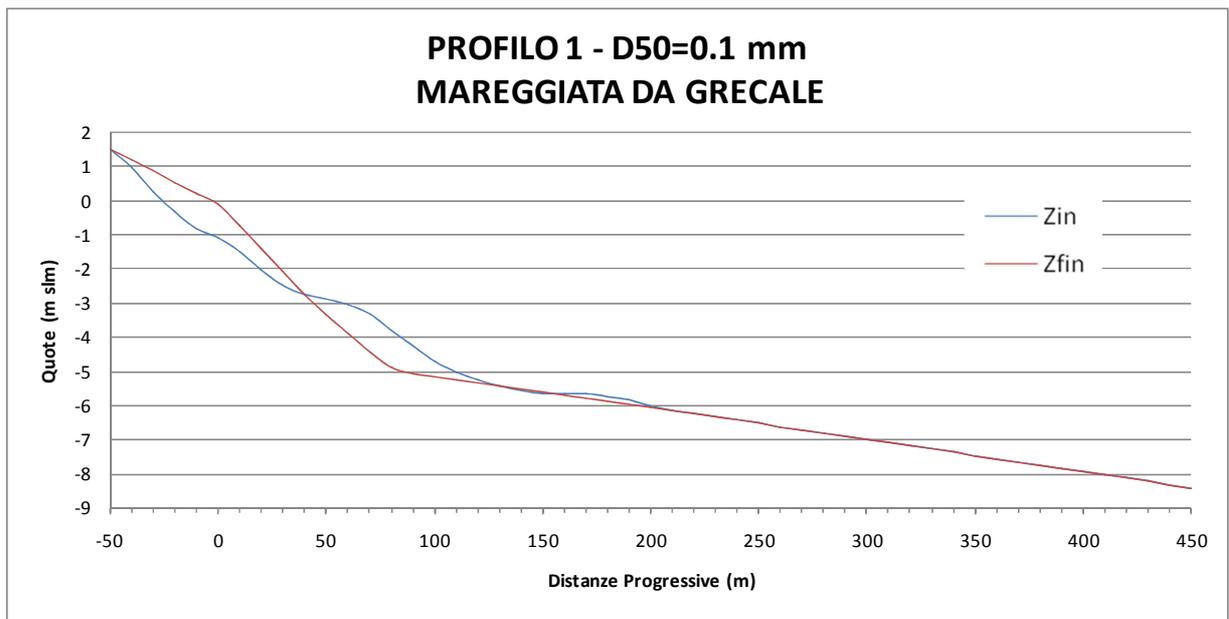


Figura 4.40 – Particolare dell'evoluzione del profilo per trasporto solido cross-shore: profilo 1,  $D_{50} = 0,1$ mm; mareggiata annuale da grecale.

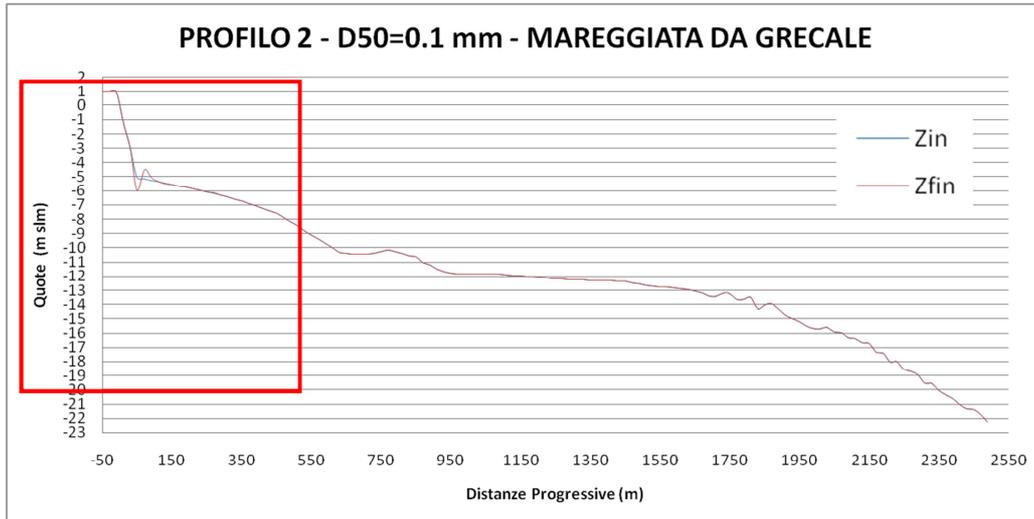


Figura 4.41 – Evoluzione del profilo per trasporto solido cross-shore: profilo 3,  $D_{50} = 0,1$  mm, mareggiata annuale da grecale

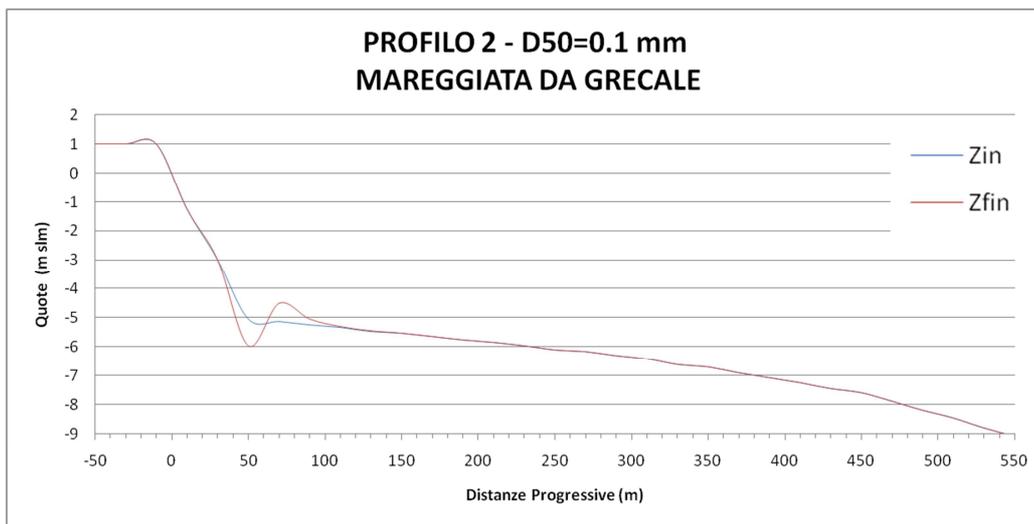


Figura 4.42 – Particolare dell'evoluzione del profilo per trasporto solido cross-shore: profilo 3,  $D_{50} = 0,1$  mm, mareggiata annuale da grecale

Sia per il profilo 1 che il profilo 2 sotto la mareggiata da grecale gli effetti sono simili a quelli descritti nel caso precedente.

#### 4.9.2.2 Granulometria con $D_{50} = 0,5$ mm

Si riportano, per  $D_{50} = 0,5$  mm, i diagrammi di sovrapposizione tra la posizione iniziale e finale dei profili sotto le mareggiate in analisi. È stato riportato in blu il profilo iniziale, in rosso il profilo finale.

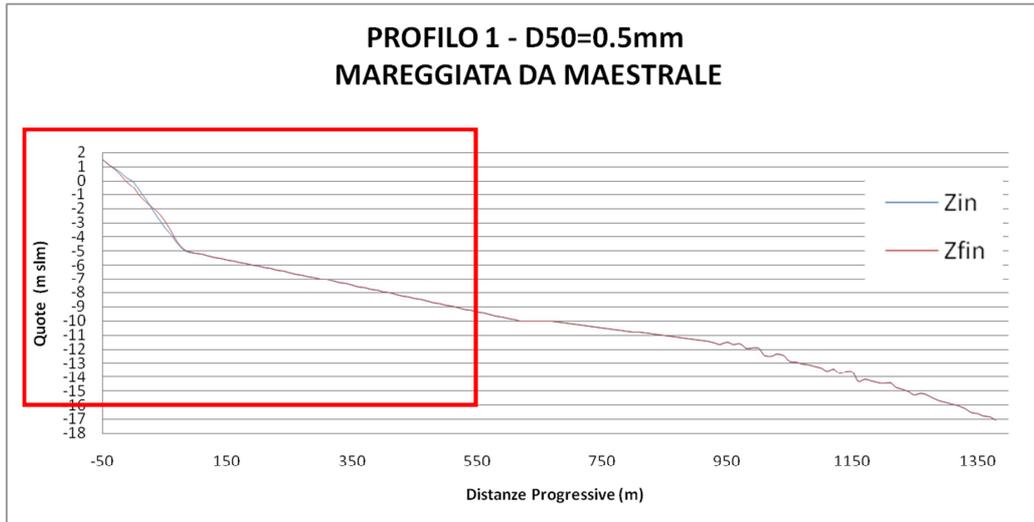


Figura 4.43 – Evoluzione del profilo per trasporto solido cross-shore: profilo 1,  $D_{50} = 0,5$  mm , mareggiata annuale da maestrale

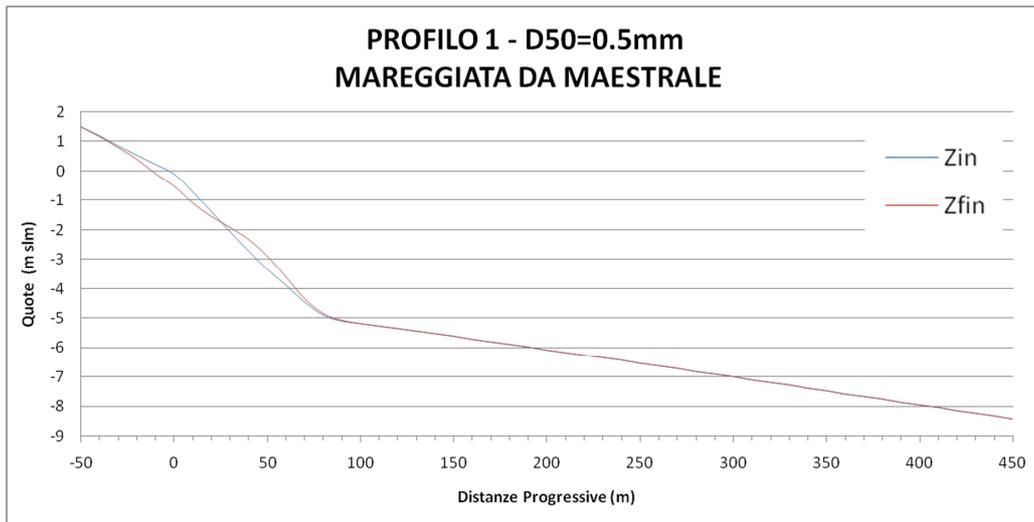


Figura 4.44 – Particolare dell'evoluzione del profilo per trasporto solido cross-shore: profilo 1,  $D_{50} = 0,5$  mm, mareggiata annuale da maestrale

I risultati sopra riportati mostrano per il profilo 1 una zona di rimaneggiamento dei sedimenti, localizzata tra la linea di riva e la batimetria dei -5,00 m sul l.m.m.; l'estensione della surf zone è circa 100 m.

Sotto la mareggiata di calcolo la linea di riva è ancora in leggera erosione, con escursione di quote dell'ordine di  $10^{-1}$  m ed un arretramento della linea di riva pari a qualche metro.

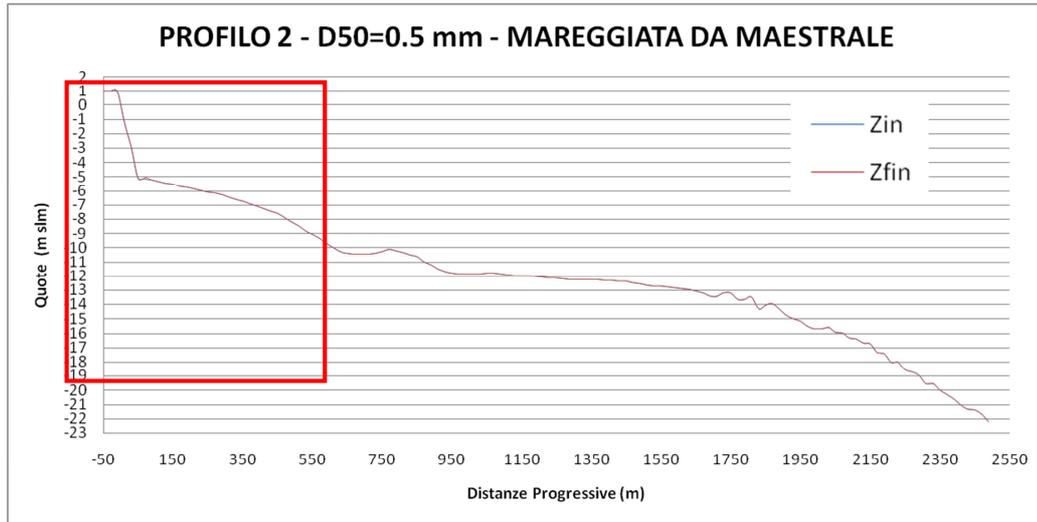


Figura 4.45 – Evoluzione del profilo per trasporto solido cross-shore: profilo 2,  $D_{50} = 0,5$  mm, mareggiata annuale da maestrale

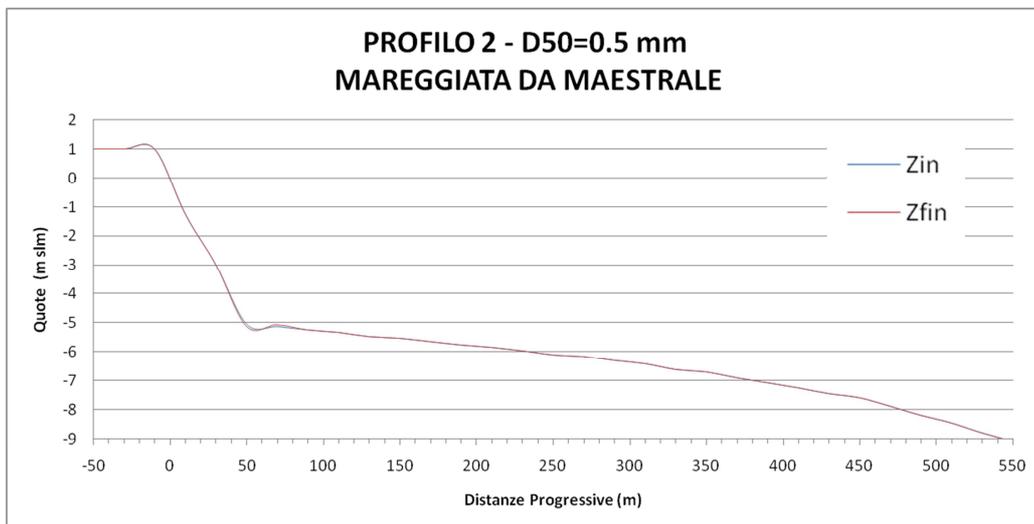


Figura 4.46 – Particolare dell'evoluzione del profilo per trasporto solido cross-shore: profilo 2,  $D_{50} = 0,5$  mm, mareggiata annuale da maestrale

Per il profilo 2 sotto mareggiata da maestrale si osservano gli effetti di rimescolamento sui sedimenti medi al piede della scogliera con escursione di quote dell'ordine di  $10^{-2}$ m.

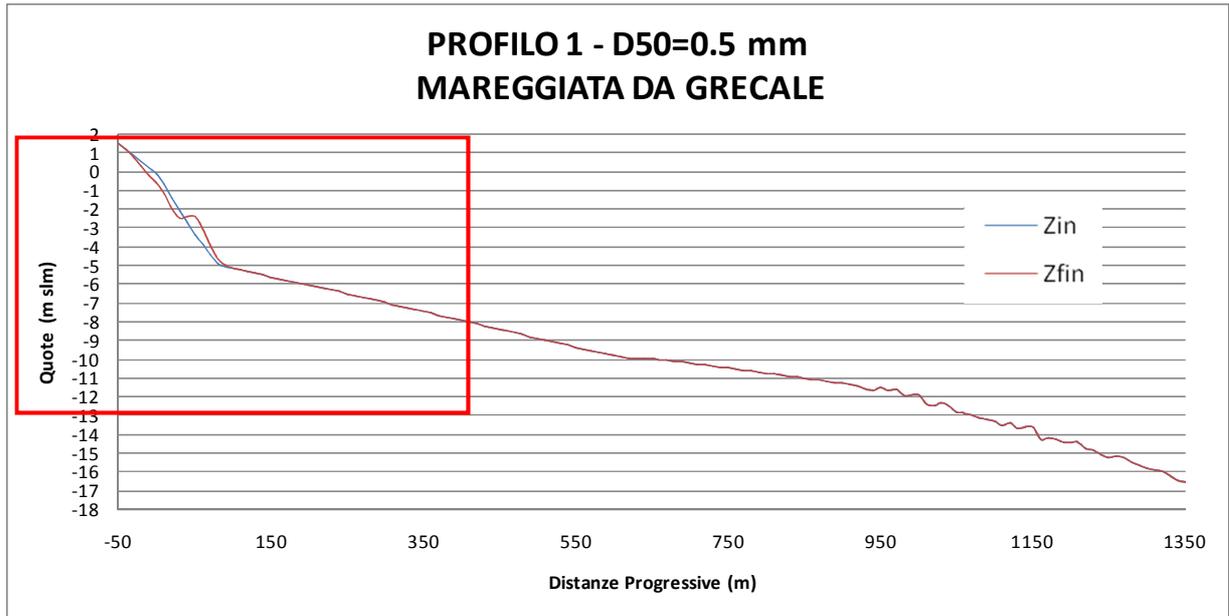


Figura 4.47 – Evoluzione del profilo per trasporto solido cross-shore: profilo 1,  $D_{50} = 0,5$  mm , mareggiata annuale da grecale

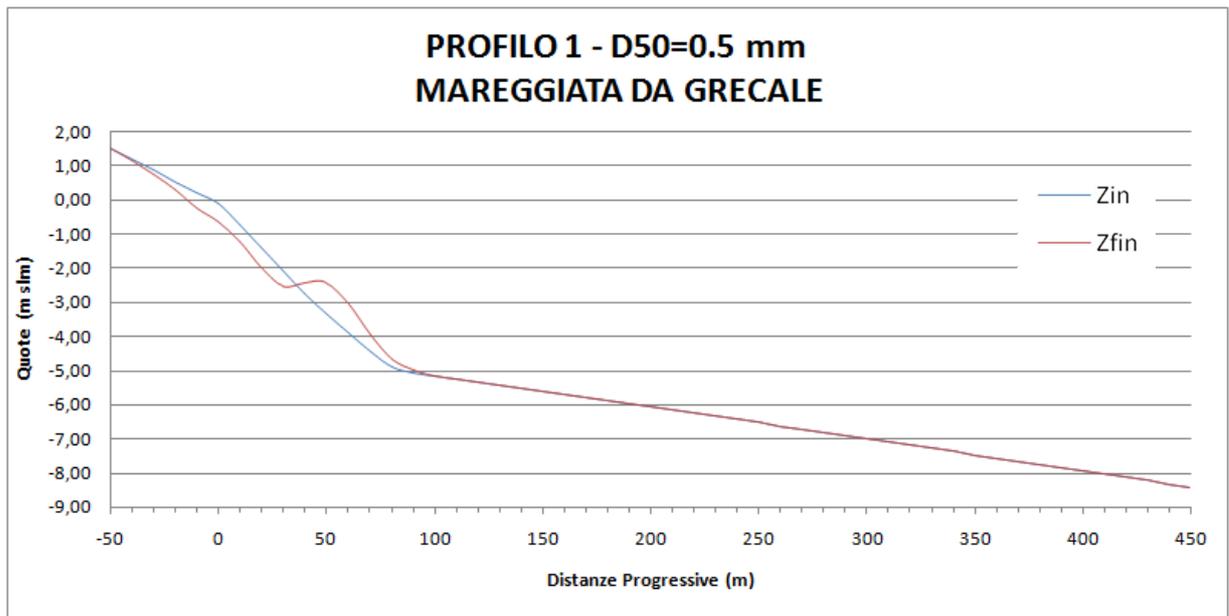


Figura 4.48 – Evoluzione del profilo per trasporto solido cross-shore: profilo 1,  $D_{50} = 0,5$  mm , mareggiata annuale da grecale

I risultati sopra riportati mostrano per il profilo 1 una zona di rimaneggiamento dei sedimenti, localizzata tra la linea di riva e le batimetrica dei -5,00 m sul l.m.m.; l'estensione della surf zone è circa 90 m.

Sotto la maraggiata di calcolo la linea di riva è ancora in leggera erosione, con escursione di quote ed arretramento della linea di riva dell'ordine di  $10^{-1}$  m.

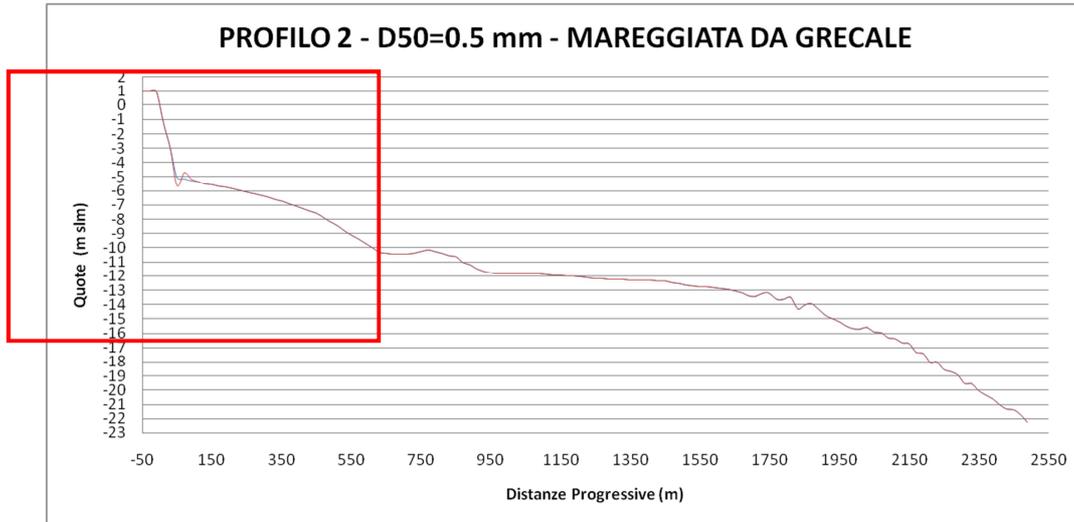


Figura 4.49 – Evoluzione del profilo per trasporto solido cross-shore: *profilo 3*,  $D_{50} = 0,5$  mm, mareggiata annuale da grecale

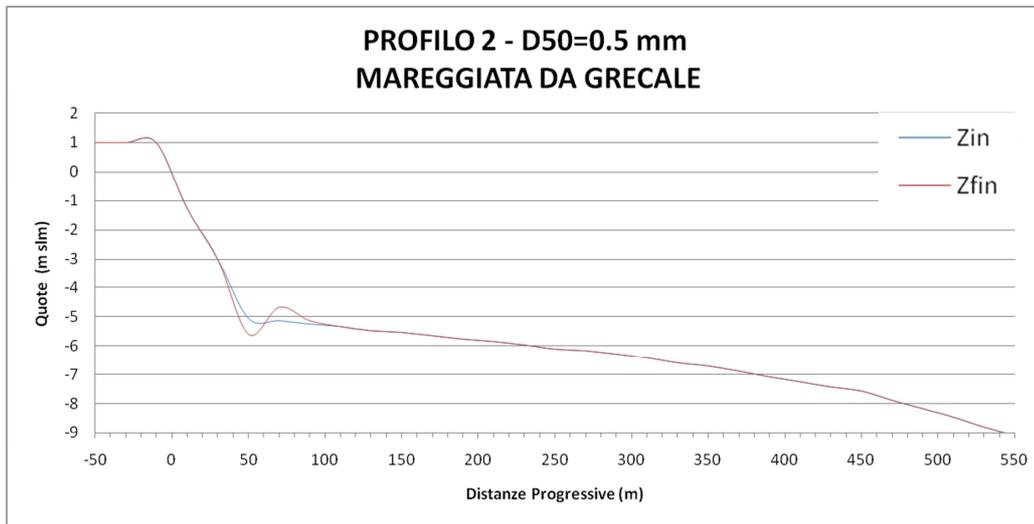


Figura 4.50 – Particolare dell'evoluzione del profilo per trasporto solido cross-shore: *profilo 3*,  $D_{50} = 0,5$  mm, mareggiata annuale da grecale

Per il profilo 2 sotto la mareggiata da grecale si osserva che gli effetti di rimescolamento dei sedimenti sono evidenti sui fondali prossimi ai -5,50 m sul l.m.m al piede della scogliera.

### 4.9.2.3 Granulometria con $D_{50} = 1,0 \text{ mm}$

Si riportano, per  $D_{50} = 1,0 \text{ mm}$ , i diagrammi di sovrapposizione tra la posizione iniziale e finale dei profili sotto le mareggiate in analisi. È stato riportato in blu il profilo iniziale, in rosso il profilo finale.

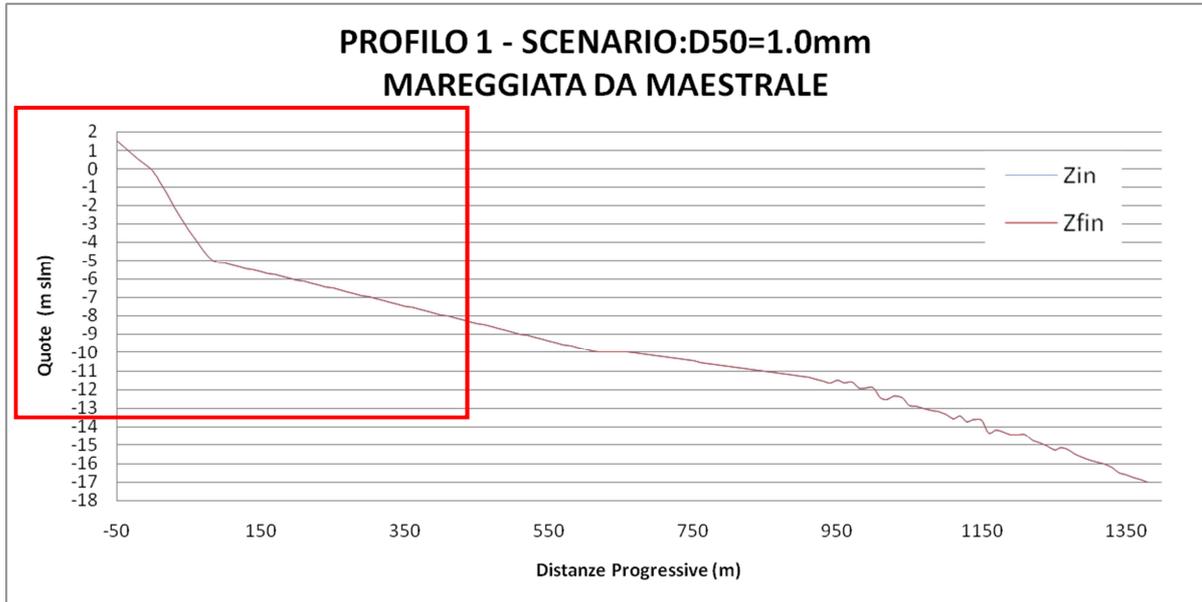


Figura 4.51 – Evoluzione del profilo per trasporto solido cross-shore: *profilo 1*,  $D_{50} = 1,0 \text{ mm}$ , mareggiata annuale da maestrale

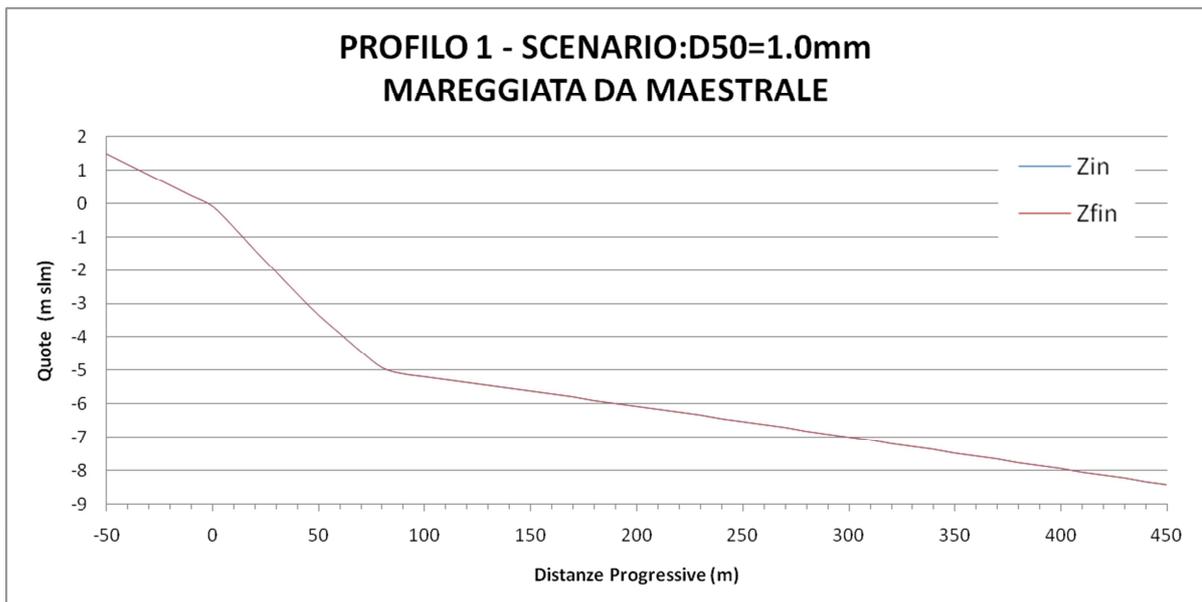


Figura 4.52 – Particolare dell'evoluzione del profilo per trasporto solido cross-shore: *profilo 1*,  $D_{50} = 1,0 \text{ mm}$ , mareggiata annuale da maestrale

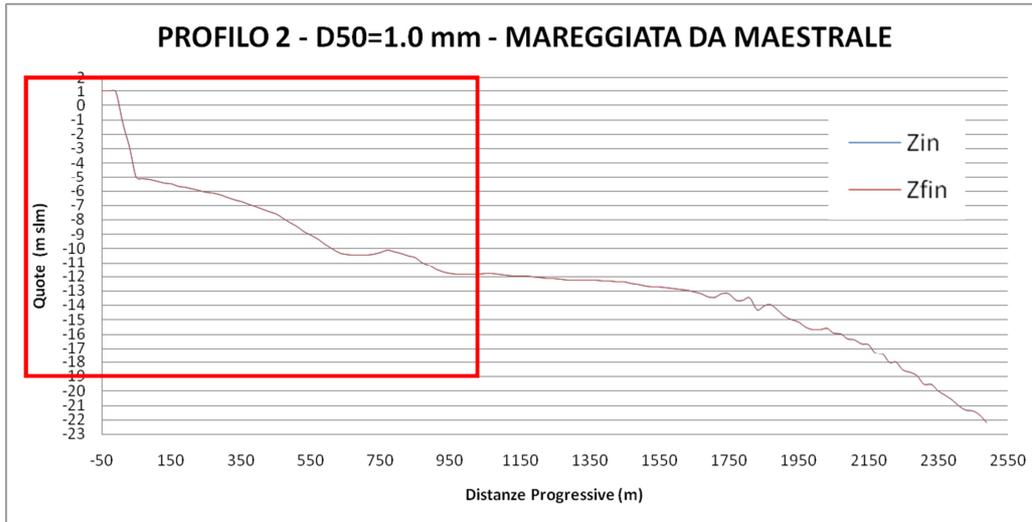


Figura 4.53 – Evoluzione del profilo per trasporto solido cross-shore: profilo 2,  $D_{50} = 1,0$  mm, mareggiata annuale da maestrale.

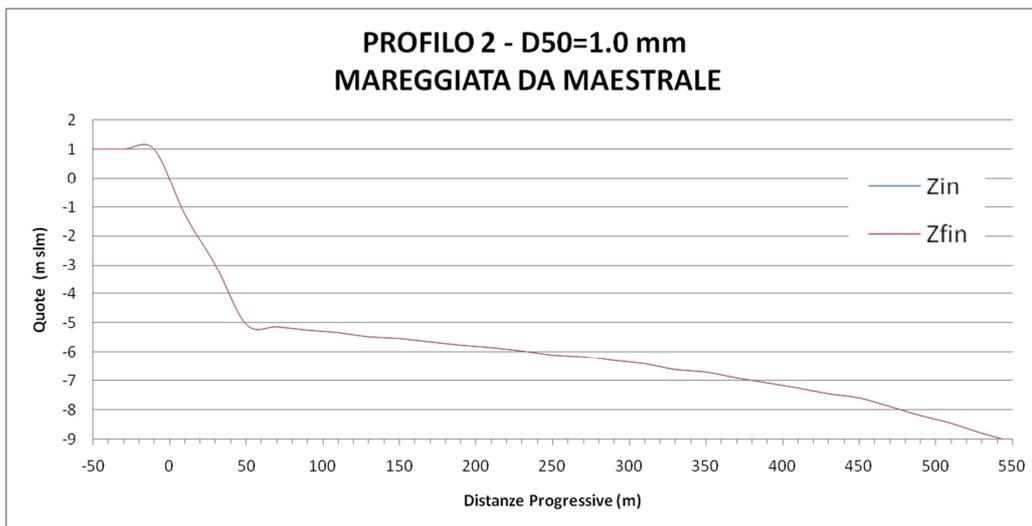


Figura 4.54 – Particolare dell'evoluzione del profilo per trasporto solido cross-shore: profilo 2,  $D_{50} = 1,0$  mm, mareggiata da maestrale.

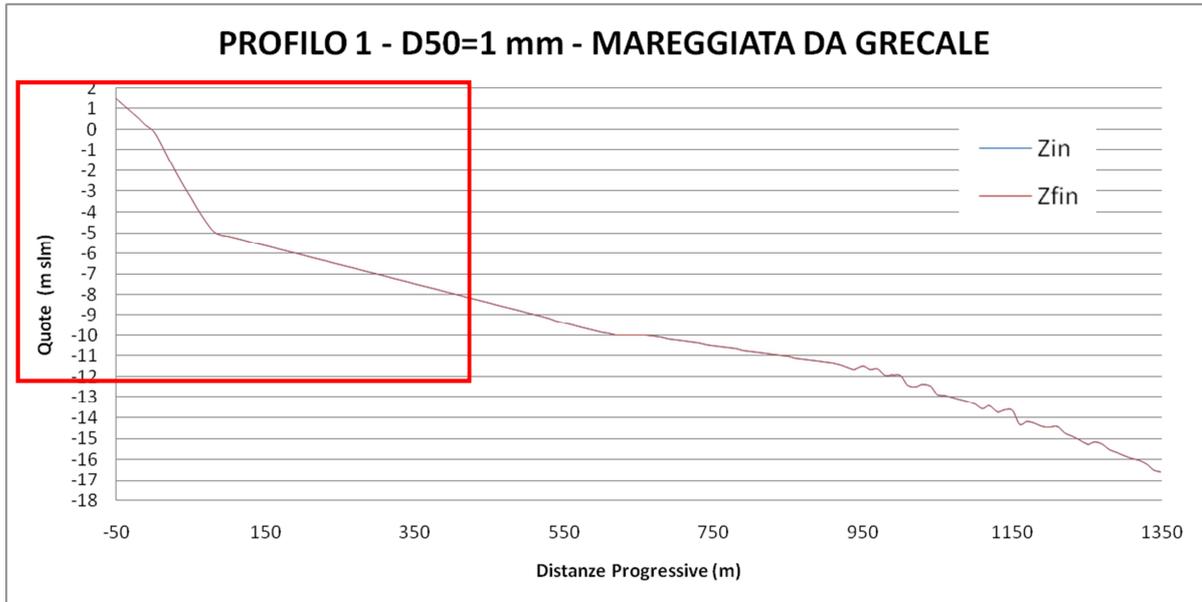


Figura 4.55 – Evoluzione del profilo per trasporto solido cross-shore: *profilo 1*,  $D_{50} = 1,0$  mm, mareggiata annuale da grecale

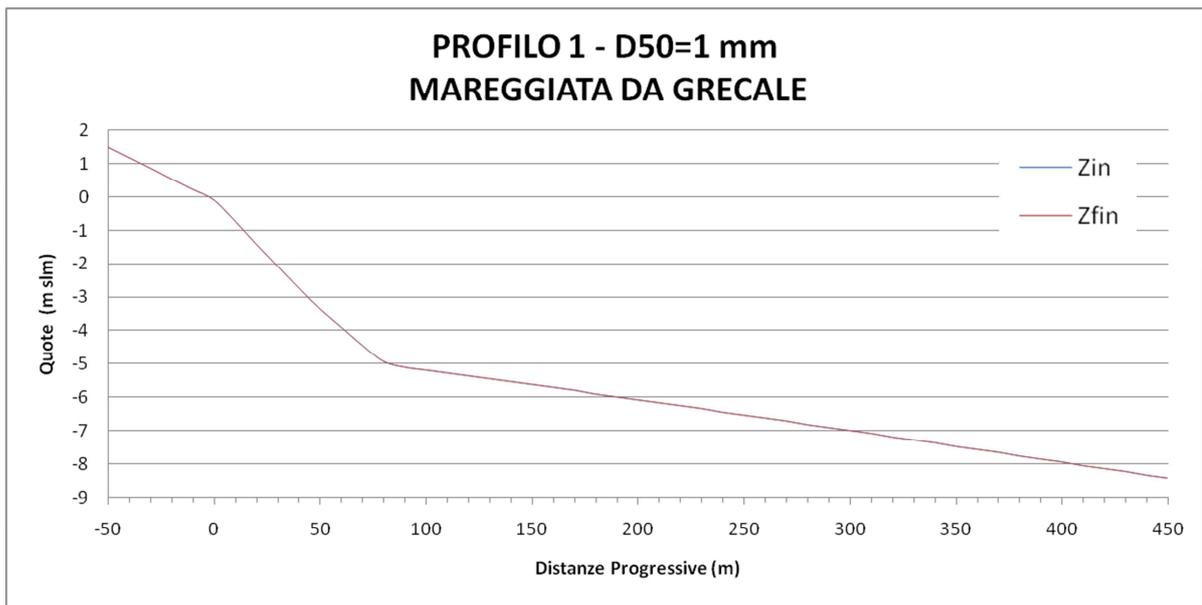


Figura 4.56 – Particolare dell'evoluzione del profilo per trasporto solido cross-shore: *profilo 1*,  $D_{50} = 1,0$  mm, mareggiata annuale da grecale

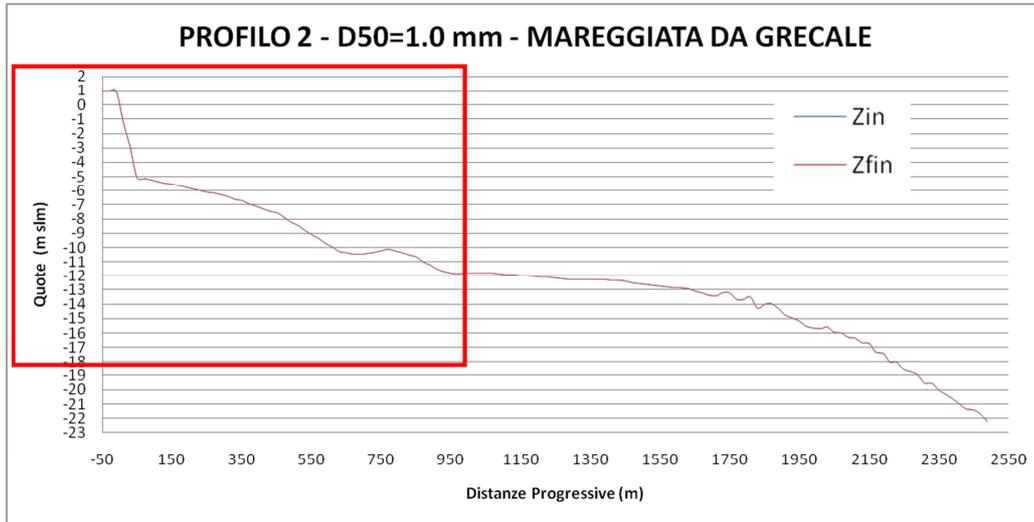


Figura 4.57 – Evoluzione del profilo per trasporto solido cross-shore: *profilo 3*,  $D_{50} = 1,0$  mm, mareggiata annuale da grecale

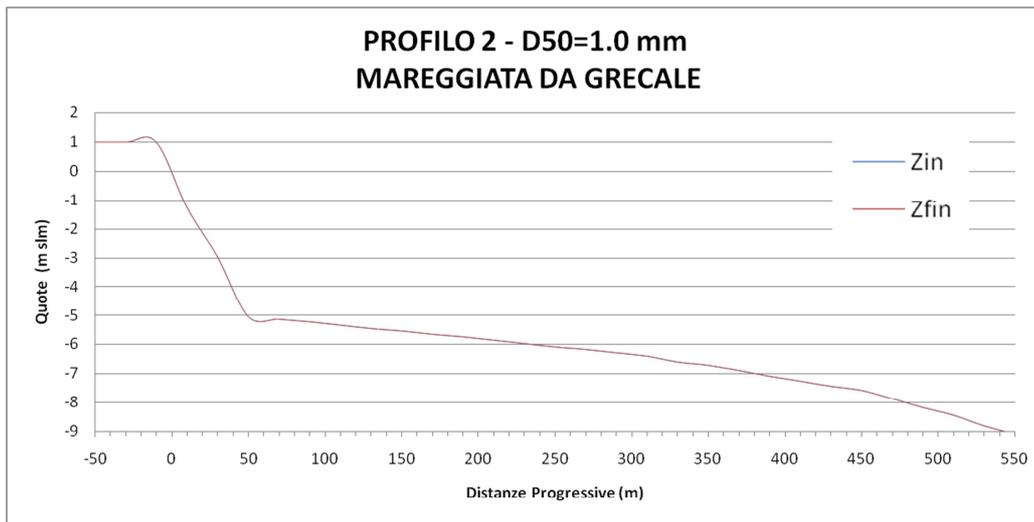


Figura 4.58 – Particolare dell'evoluzione del profilo per trasporto solido cross-shore: *profilo 3*,  $D_{50} = 1,0$  mm, mareggiata annuale da grecale

I risultati sopra riportati mostrano che, per tutti i profili in esame e in presenza di sedimenti grossolani, non sono riscontrabili effetti di rimescolamento degli stessi sedimenti, tantomeno variazioni sulla posizione plano-altimetrica della linea di riva.

#### 4.9.3 Conclusioni

Le analisi condotte mediante il codice SBEACH sono riferite al singolo evento di mareggiata e quindi sono caratteristiche dell'evoluzione dei litorali a breve termine.

I possibili scompensi indotti dal trasporto solido cross-shore sui sedimenti fini e medi lungo il litorale a O del porto sono costituiti da escursioni di quote del fondale pari, al massimo, al a qualche dm e con un potenziale arretramento della linea di riva pari, al massimo a qualche decina di m.

I possibili scompensi indotti dal trasporto solido cross-shore sui sedimenti grossolani lungo il litorale a O del porto sono nulli.

I rimaneggiamenti più significativi si presentano nella fascia costiera compresa tra la batimetrica -6,00 m sul l.m.m. e la linea di costa.

I possibili del trasporto solido cross-shore sui sedimenti fini e medi lungo il litorale a E del porto sono costituiti da escursione di quote del fondale dell'ordine di  $10^{-2}$ - $10^{-1}$  m, in prossimità del piede della scogliera di protezione della strada litoranea.

Inoltre, per i sedimenti grossolani, lungo i litorali a est del porto, non si osservano fenomeni di scompenso.

Gli effetti sul profilo trasversale indotti sul litorale a O del porto, indotti dalle singole mareggiate o dall'effetto cumulato delle stesse, sono compatibili qualitativamente con quelli esistenti così come individuati dagli studi sull'evoluzione della linea di riva eseguiti per la redazione sull'U.F. all'interno del P.A.I. (cfr. la sezione 4.8 del presente elaborato).

Si osserva che per ridurre i fenomeni erosivi lungo il litorale a O del porto tra la foce del Fiume San Leonardo e la radice del molo di sopraflutto, classificato dal P.A.I. come zona R4, il Comune di Termini Imerese sta conducendo l'iter per la realizzazione di interventi di recupero e stabilizzazione della spiaggia in erosione che prevedono la realizzazione di scogliere soffolte, da finanziare con sovvenzione del Ministero dell'Ambiente (cfr. la sezione 4.8 del presente elaborato).

#### 4.10 ANALISI DEL TRASPORTO SOLIDO LONG-SHORE

---

##### 4.10.1 Finalità

---

Questa sezione ha lo scopo di identificare il comportamento della componente long-shore del vettore traspo-deposizionale che caratterizza il trasporto solido presso il sito portuale di Termini Imerese. Determinare tale comportamento è fondamentale, essendo il trasporto solido long-shore fondamentale per lo studio dell'evoluzione dei litorali a lungo termine.

Il codice di calcolo utilizzato in questa sezione è *PTM*, sviluppato dall'U.S. Army Engineering Research and Development Center (ERDC), al fine di verificare quale sia il regime sedimentario esistente in situ.

##### 4.10.2 Il modello di calcolo PTM

---

Il modello *PTM* simula i processi di trasporto dei sedimenti ed evoluzione dei fondali generati dall'azione combinata di onde, correnti ed apporti solidi di qualsiasi natura (fluviali, dragaggi).

Di seguito saranno descritti i principi e le funzionalità del modello, mentre si rimanda al report *ERDC/CHL TR-06-20 (Settembre 2006)* per la descrizione dei fondamenti scientifici e le formulazioni numeriche del modello.

La dinamica dei sedimenti in aree costiere risente del trasporto idrodinamico, a sua volta conseguenza dell'interazione di una serie di fattori quali correnti, venti, moto ondoso, immissioni fluviali e interazioni col fondale.

Il modello matematico *PTM* è in grado di analizzare i fenomeni della dinamica dei sedimenti in aree litoranee risolvendo il set di "equazioni primitive" costituito dalle equazioni complete del moto, alla base dei principi della fluidodinamica che governano i moti nel mare.

I domini di calcolo possono assumere qualsiasi geometria, discretizzati con una maglia di elementi triangolari con dimensioni variabili, in funzione delle caratteristiche locali del fondale. A ciascun nodo della mesh così definita vengono associate le informazioni riguardanti la batimetria e la sedimentologia nativa del fondale, nonché le forzanti in grado di generare il trasporto dei sedimenti.

Le forzanti principali sono:

- serie temporale di *livelli idrici marini e campi di velocità di correnti* ottenibili attraverso il codice di calcolo *ADCIRC*;
- serie temporale di *campi di distribuzione di moto ondoso* in frangenza (caratteristiche ondamiche di breaking) ottenibili con il codice di calcolo *STWAVE* (cfr. l'elaborato "*Studio Meteomarinò*").

Ulteriori condizioni al contorno necessarie al modello sono la profondità minima di calcolo e i parametri riguardanti la diffusione, turbolenza, caratteristiche sedimentologiche e tipologiche del fondale. E' inoltre possibile tenere in considerazione i gradienti di salinità e di temperatura.

La soluzione al problema della dinamica dei sedimenti viene determinata per un fissato intervallo temporale e per ciascun step di calcolo è in grado di fornire due differenti tipologie di analisi: *euleriana* e *lagrangiana*.

Nell'*analisi euleriana*, per ciascun step, vengono determinate le caratteristiche locali della dinamica dei sedimenti e del trasporto solido (evoluzione del fondale, erosione e deposizione) dovuta all'interazione dei sedimenti nativi con le forzanti e i sedimenti in sospensione; in particolare devono essere fornite le informazioni relative alle caratteristiche granulometriche dei sedimenti costituenti i fondali ( $D_{35}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{90}$ ).

Nell'*analisi lagrangiana* viene analizzato, per ciascun step, il comportamento (avvezione, diffusione, deposizione, risospensione, seppellimento, intrappolamento) di una serie di particelle rilasciate all'interno del dominio di calcolo, in base alle caratteristiche fisiche delle stesse (peso specifico, dimensione caratteristica, quantità rilasciata e posizione di immissione). La quantità di particelle all'interno del dominio è rappresentata da una determinata massa rilasciata istantaneamente o distribuita in un fissato intervallo di tempo.

Di seguito si riportano le definizioni dei parametri ritenuti più significativi, nonché le equazioni ritenute fondamentali alla base del presente modello di calcolo.

La *resistenza di fondo* è misurata in funzione della granulometria dei sedimenti, in particolare il modello richiede l'immissione dei diametri caratteristici  $D_{50}$ ,  $D_{30}$  e  $D_{90}$ .

Lo *shear stress*  $T''_o$  è calcolato tramite il metodo di *Van Rijn* (1993).

$$T''_o = \frac{\rho \bar{U}^2}{C^{*2}} \quad (1)$$

in cui:

- $\rho$ : densità dell'acqua;
- $C^*$ : coefficiente di Chezy in regime puramente turbolento;
- $U$ : velocità media lungo la colonna idrica.

La soglia del movimento incipiente delle particelle solide segue la teoria di Shields (cfr. *Yalin, 1977*), per la quale il moto ha inizio se viene superato il valore

$$\theta_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{\rho g (s-1) D} \quad (2)$$

in cui:

- $\theta_{cr}$ : numero di Shields per il movimento incipiente;
- $\tau_{cr}$ : soglia del movimento incipiente;
- $\rho$ : densità dell'acqua;
- $g$ : accelerazione di gravità;
- $D$ : dimensione caratteristica adimensionale dei grani;
- $s$ : rapporto tra la densità dell'acqua e quello dei grani.

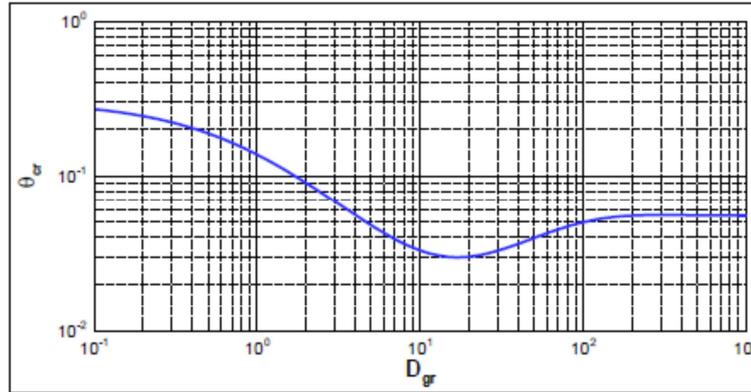


Figura 4.59 – Curva di Shields

In particolare  $D$ , secondo la teoria di *Soulby e Whitehouse* (1997), è funzione del parametro  $D_{50}$  del sedimento secondo la seguente relazione:

$$D_{gr} = D_{50} \sqrt[3]{\frac{(s-1)g}{v^2}} \quad (3)$$

in cui  $v$  è la viscosità cinematica.

Per valutare l'aliquota relativa alla resistenza dovuta alla forma dei grani sul fondo occorre valutare la cosiddetta "altezza di equilibrio" dei grani  $\eta_b$  tramite la formula di *Van Rijn* (1984) e *Mogridge* (1994), funzione della mobilità  $M$ , della profondità  $Z$  e della granulometria ( $D_{50}$ ):

$$\begin{aligned} \eta_b &= 0 & M &\leq 1 \\ \eta_b &= 0.11 h \left(\frac{D_{50}}{h}\right)^{0.3} [1 - e^{-0.5(M-1)}] (24 - M) & 1 < M \leq 24 \\ \eta_b &= 0 & M &> 24 \end{aligned} \quad (4)$$

Se  $D_{50} < 0,05$  mm tale aliquota è definita esclusivamente dagli effetti di attrito sul fondo secondo la seguente relazione:

$$k'_s = 3 D_{90} \quad (5)$$

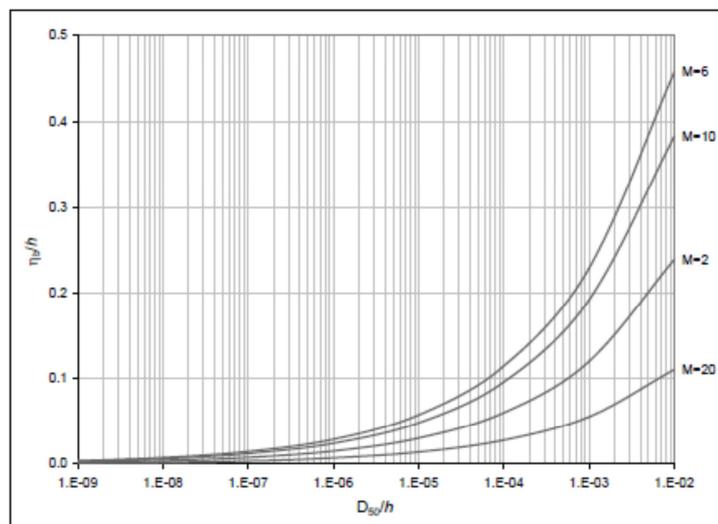


Figura 4.60 – Curva per la valutazione della resistenza dovuta ai grani

Per valutare i gradienti di trasporto e il potenziale fenomeno di di erosione/accumulo del sedimento sul fondo, il modello fa ricorso alle seguenti grandezze:

- *indice di mobilità (M);*
- *indice di trasporto solido ( $q_t$ );*

L'indice di mobilità M è adimensionale e pari al rapporto tra la forza di taglio su fondo T' e quella critica  $T_{cr}$ :

$$M = \frac{T'}{T_{cr}} = \frac{\theta}{\theta_{cr}} \quad (6)$$

Lo sforzo di taglio critico  $\tau_{cr}$  è così definito:

$$\tau_{cr} = \theta_{cr} \rho (s-1) g D \quad (7)$$

L'*indice di trasporto solido* rappresenta il flusso solido per larghezza del fondale, calcolato secondo il metodo *Soulby-Van Rijn* (1997):

$$q_t = A_s \bar{U} \left[ \left( \bar{U}^2 + \frac{0.018}{C_D} \bar{U}_{ms}^2 \right)^{1/2} - U_{cr} \right]^{2.4} \quad (8)$$

dove:

$$A_s = A_{sb} + A_{ss}$$

$$A_{sb} = \frac{0.005 h \left( \frac{D_{50}}{h} \right)^{1.2}}{\left[ g(s-1) D_{50} \right]^{1.2}}$$

$$A_{ss} = \frac{0.012 D_{50} D_{gr}^{-0.8}}{\left[ g(s-1) D_{50} \right]^{1.2}} \quad (9)$$

$$C_D = \frac{0.4}{\left[ \ln \left( \frac{h}{z_0} \right) - 1 \right]^2}$$

$$U_{cr} = \begin{cases} 0.19 D_{50}^{0.1} \log_{10} \left( \frac{4h}{D_{90}} \right) & D_{50} < 0.5 \text{ mm} \\ 8.5 D_{50}^{0.8} \log_{10} \left( \frac{4h}{D_{90}} \right) & D_{50} \geq 0.5 \text{ mm} \end{cases} \quad (10)$$

L'indice di trasporto solido ha dimensioni  $[L^3 t^{-1} L^{-1}]$ .

La posizione di una particella in un istante è calcolata mediante la seguente espressione:

$$x' = x_n + \frac{1}{2} (u_A dt + u_D dt) \quad (11)$$

dove  $u_A$  e  $u_D$  sono le velocità di avvezione e di diffusione al tempo  $n$ .

All'istante successivo la posizione della particella sarà:

$$x_{n+1} = x_n + u'_A dt + u'_D dt \quad (12)$$

dove  $u'_A$  e  $u'_D$  sono le velocità di avvezione e diffusione nella posizione  $x'$  e al time step  $n+1$ .

#### 4.10.3 APPLICAZIONE DEL MODELLO PTM

Il modello PTM è stato applicato al litorale in esame per l'analisi dei gradienti relativi al trasporto solido litoraneo. Per le simulazioni condotte si è scelta una durata pari a 2 giorni, in conformità a quanto scelto per le simulazioni correntometriche con il codice di calcolo ADCIRC.

##### 4.10.3.1 Condizioni al contorno

I dati di input sono stati estratti dalle simulazioni relativi alla propagazione del moto ondoso (codice di calcolo *STWAVE*, cfr. elaborato *Studio Meteomarinò*) e quelle sul regime idrodinamico (codice di calcolo *ADCIRC*) indotto dal regime del moto ondoso stesso.

Si è scelto di simulare gli effetti dovuti alla mareggiata annuale con direzione 330°N, ritenuta identificativa del eventi ondosi provenienti del IV quadrante, settore a cui è associata l'aliquota maggiore di occorrenza tra gli eventi del clima d'onda individuato e, pertanto, il maggior contenuto energetico.

E' stato ritenuto trascurabile ai fini del trasporto solido longshore, in base alle simulazioni sul regime idrodinamico condotte con ADCIRC e alla distribuzione del clima d'onda sottocosta, il contributo degli eventi ondosi provenienti dal I quadrante.

In questo studio, in base ai dati sedimentologici ricevuti, sono state implementate le seguenti granulometrie:

- $D_{50}=0,05$  mm, rappresentativo dei sedimenti molto fini;
- $D_{50}=0,15$  mm, rappresentativo dei sedimenti fini;
- $D_{50}=0,50$  mm, rappresentativo dei sedimenti medi e grossolani.

#### 4.10.3.2 Risultati

I campi di colore sono relativi alla distribuzione dell'*indice di trasporto solido*, definito dalla formula (8) di questo elaborato. Il bianco indica un vettore del trasporto solido trascurabile; il giallo è associato un valore maggiore o uguale all'unità e il colore rosso a valori maggiore o uguali a 1,5. I vettori, invece, rappresentano la *mobilità*, come definita dalla formula (6) quindi sono identificativi del vettore traspo-deposizionale.

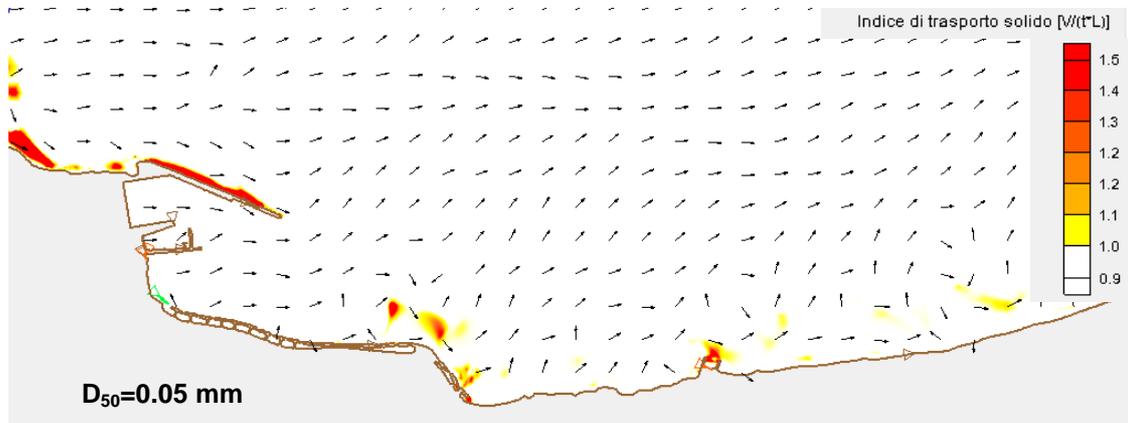


Figura 4.61 – Trasporto solido litoraneo. Mareggiata annuale da maestrale  $D_{50} = 0,05$  mm. Layout 0



Figura 4.62 – Trasporto solido litoraneo. Mareggiata annuale da maestrale  $D_{50} = 0,05$  mm. Layout 0. Particolare.

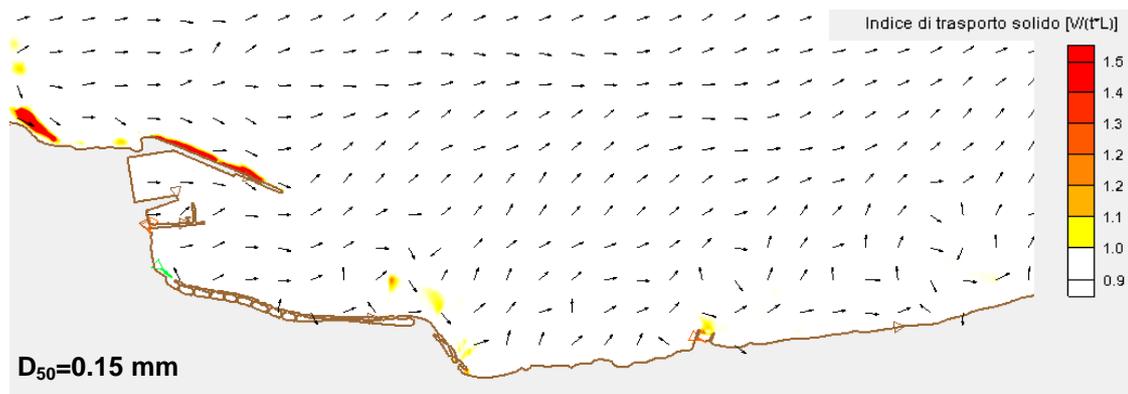


Figura 4.63 – Trasporto solido litoraneo. Mareggiata annuale da maestrale  $D_{50} = 0,15$  mm. Layout 0.

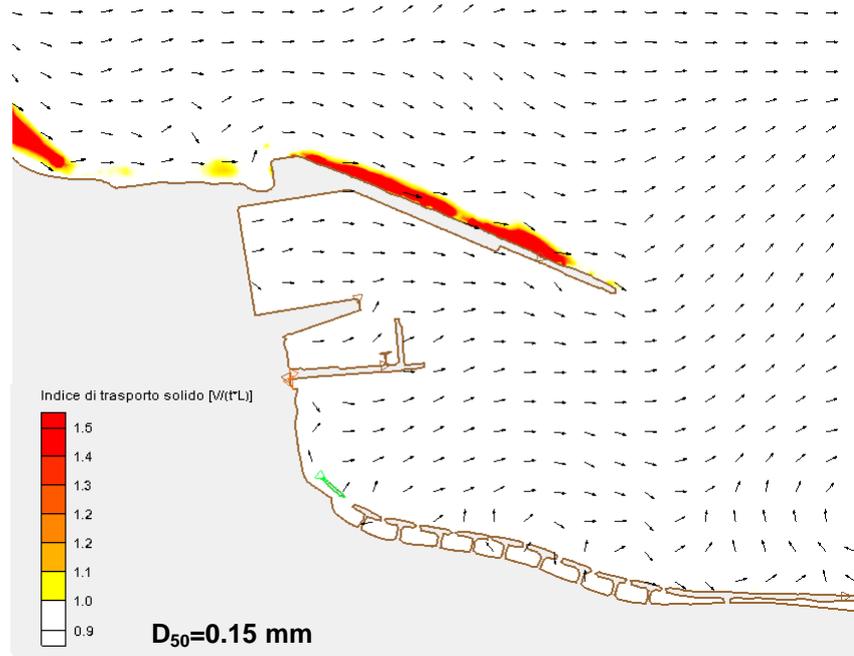


Figura 4.64 – Trasporto solido litoraneo. Mareggiata annuale da maestrale  $D_{50} = 0,15$  mm. Layout 0. Particolare.

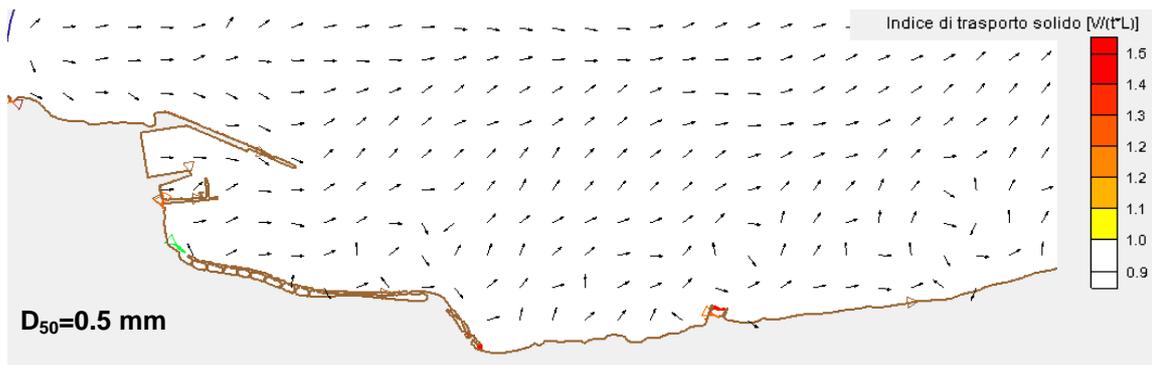


Figura 4.65 – Trasporto solido litoraneo. Mareggiata annuale da maestrale  $D_{50} = 0,50$  mm. Layout 0.

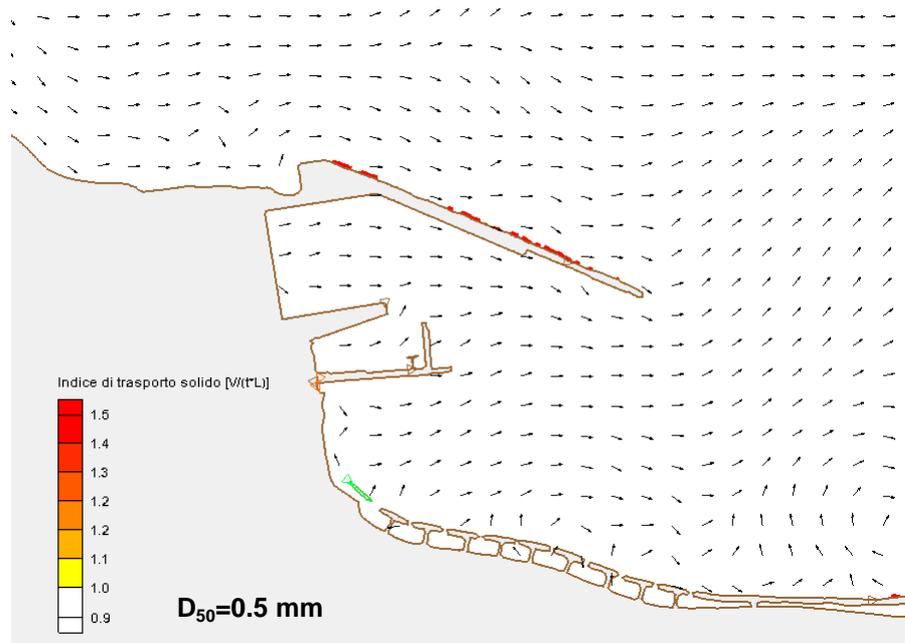


Figura 4.66 – Trasporto solido litoraneo. Mareggiata annuale da maestrale  $D_{50} = 0,5$  mm. Layout 0. Particolare.

Lungo il tratto di litorale in analisi il vettore del flusso sedimentario è molto debole ed è diretto secondo la direzione O-E. In prossimità della testata del molo di sopraflutto, dove i fondali sono più alti si osserva una brusca riduzione del trasporto solido. Il flusso sedimentario va diminuendo all'aumentare della granulometria.

Tramite il codice di calcolo sono stati estratte le possibili tendenze evolutive del fondale, a seguito dei fenomeni simulati; è stato possibile determinare:

- la tendenza ai fenomeni di deposito ( $dz/dt > 0$ );
- la tendenza ai fenomeni di erosione ( $dz/dt < 0$ ).

in cui  $dz$  rappresenta la variazione della profondità del fondale nell'intervallo di tempo di riferimento  $dt$ .

Si osserva che i valori metrici giornalieri di evoluzione dei fondali sono valutati come buoni indicatori idonei ad identificare le tendenze ai fenomeni di accumulo e/o erosione per le analisi di tipo evolutivo. Con la scala cromatica del rosso è stata identificata la tendenza ai fenomeni di accumulo, mentre con scala cromatica del verde è stata visualizzata la tendenza ai fenomeni di erosione; il giallo è associato alle variazioni del fondale trascurabili.

Dapprima viene riportata l'immagine relativa a  $D_{50}=0,05$  mm, inseguito quella relativa a  $D_{50}=0,15$  mm, infine quella relativa a  $D_{50}=0,50$  mm.

Le immagini successive confermano che lungo i litorali in esame il trasporto solido litoraneo sia alquanto debole; lungo il molo di sopraflutto è possibile osservare che i fenomeni di trasporto longshore, si riducono notevolmente di intensità alla testata del molo di sopraflutto, ove i fondali sono più profondi, determinando possibili fenomeni di siltaggio proprio a ridosso della testata dell'opera.

Tali fenomeni sono comunque di ridotta entità per via del mancato apporto sedimentario.

In prossimità delle opere di sottoflutto si osservano velocità della corrente molto ridotte tali da permettere la sedimentazione e il permanere dei sedimenti pelitici.

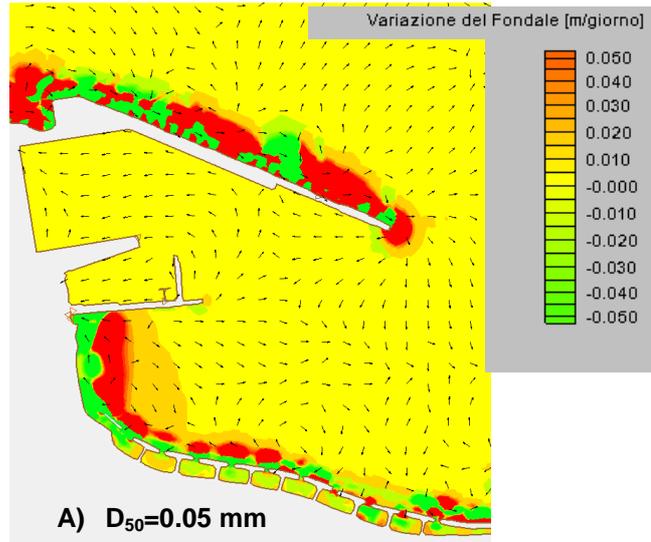


Figura 4.67 – Evoluzione del fondale. Mareggiata annuale da Maestrale.. Layout 0.  $D_{50}=0,05$  mm

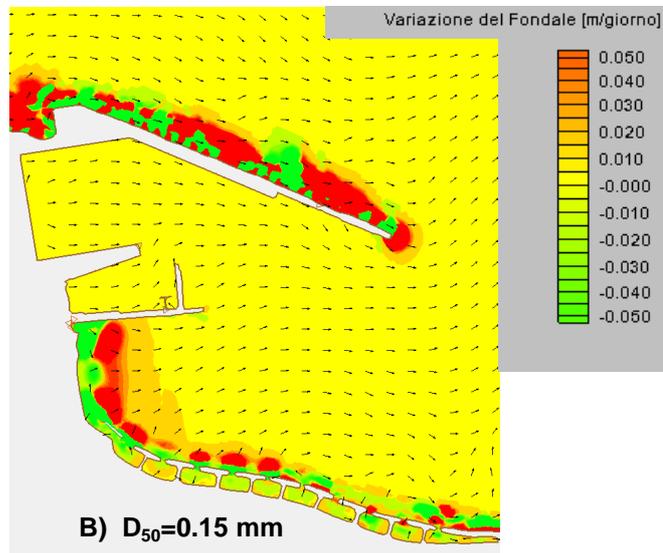


Figura 4.68 – Evoluzione del fondale. Mareggiata annuale da Maestrale.. Layout 0.  $D_{50}=0,15$  mm

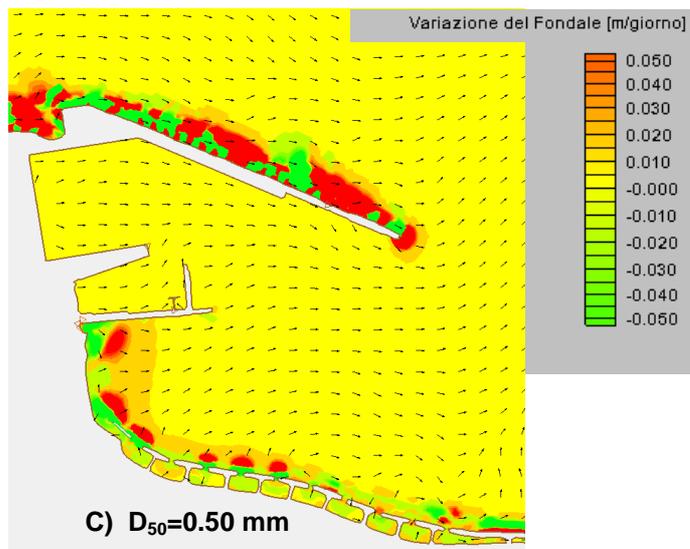


Figura 4.69 – Evoluzione del fondale. Mareggiata annuale da Maestrale. Layout 0.  $D_{50}=0,55$  mm

#### 4.11 TENDENZE EVOLUTIVE NELLA SITUAZIONE ATTUALE

---

Il flusso sedimentario litoraneo diretto da O verso E è indotto principalmente dal moto ondoso del IV quadrante. Gli effetti del moto ondoso dal I quadrante sul flusso sedimentario litoraneo sono trascurabili.

Da quanto emerso dagli studi sull'analisi cross-shore, il litorale compreso tra la foce del fiume San Leonardo e il porto di Termini Imerese può essere soggetto a modificazioni del profilo trasversale per effetto dei singoli fenomeni di mareggiata o per l'effetto cumulativo degli stessi.

Negli anni si è osservato il depauperamento degli apporti solidi fluviali e marini, dovuta alla realizzazione di manufatti ed infrastrutture sia lungo la costa che all'interno nei bacini imbriferi tributari.

Tra le opere che hanno inciso maggiormente sul mancato apporto di materiali è da considerarsi lo sbarramento della diga di Rosamarina sul Fiume S.Leonardo.

Per comprendere l'ordine di grandezza di tale riduzione di materiale solido, basti pensare che a seguito della realizzazione della diga Rosamarina, la cosiddetta Secca di San Giovanni", localizzata in prossimità della testata del molo foraneo, è oggi completamente scomparsa.

La morfologia attuale è stata fortemente influenzata anche dallo sviluppo degli insediamenti abitativi ed allo sfruttamento agricolo ed industriale della fascia retrostante la spiaggia. Le attività umane ed i manufatti costruiti hanno determinato in più punti l'interruzione dei cordoni dunali determinando una grave alterazione del regime degli apporti sedimentari e del loro trasporto e distribuzione. Le caratteristiche tessiturali dei sedimenti di spiaggia emersa corrispondono oggi a quelle dei sedimenti grossolani.

Ciò ha generato i fenomeni di erosione, che permangono ancora oggi.

Ai fini di limitare gli effetti causati dal continuo processo di erosione che coinvolge le coste sono stati realizzati, nel corso degli anni, o sono in corso di approvazione, alcuni interventi di protezione.

La presenza del porto di Termini Imerese sull'evoluzione della linea di costa ha contribuito in modo secondario per la riduzione del vettore traspo-deposizionale.

Da quanto emerso dagli studi sull'analisi long-shore, il vettore traspo-deposizionale è in grado di movimentare le particelle più leggere e trasportarle lungo il molo di sopraflutto. La mobilità dei sedimenti si riduce all'aumentare della granulometria delle particelle solide.

In prossimità della testa del molo di sopraflutto vi è l'abbattimento dei gradienti di velocità, con presenza di locali fenomeni di insabbiamento, di entità minima per via del ridotto trasporto solido.

In prossimità delle opere di sottoflutto si osservano velocità della corrente molto ridotte tali da permettere la sedimentazione e il permanere dei sedimenti pelitici.

## 5. EFFETTI DEL PROGETTO SULLA DINAMICA DEI SEDIMENTI

Nelle sezioni precedenti di questo elaborato si è visto che il flusso sedimentario long-shore è dovuto principalmente agli effetti del moto ondoso proveniente dal IV quadrante, direzione a cui compete la maggior aliquota di occorrenza negli eventi del clima d'onda sottocosta.

Inoltre, è stato osservato che i sedimenti litoranei in prossimità del sito di Termini Imerese sono ben rappresentabili nell'intervallo  $0,05 \text{ mm} < D_{50} < 1,0 \text{ mm}$  e che all'aumentare della granulometria dei sedimenti la mobilità degli stessi si riduce.

Si è quindi ritenuto esaustivo verificare il comportamento della configurazione progettuale, denominata layout A, dal punto di vista dei fenomeni di trasporto solido e di erosione/accumulo, sotto la mareggiata annuale da 330<sup>th</sup>N, ritenuta ben rappresentativa dei fenomeni ondosi provenienti dal IV quadrante e considerando, per i sedimenti, i seguenti diametri:

- $D_{50}=0,05 \text{ mm}$ , rappresentativo dei sedimenti molto fini;
- $D_{50}=0,15 \text{ mm}$ , rappresentativo dei sedimenti fini;
- $D_{50}=0,50 \text{ mm}$ , rappresentativo dei sedimenti medi e grossolani.

A tale scopo sono stati utilizzati in serie i modelli di calcolo STWAVE, ADCIRC e PTM già descritti ed utilizzati in precedenza e sono state elaborate mesh di calcolo con caratteristiche simili a quelle usate per le condizioni di stato di fatto in questo elaborato.

Il dominio scelto ha una forma semicircolare, simmetrica rispetto alla sub unità fisiografica individuata; la profondità di mare aperto è circa 100,00 m sul l.m.m. Esso si estende dalla foce del Fiume San Leonardo sino alla foce del Fiume Hymera settentrionale. La configurazione portuale analizzata denominata "Layout A", è conforme a alla configurazione progettuale proposta a meno della geometria di alcuni sporgenti interni, fatto ritenuto verosimilmente trascurabile al fine dell'individuazione dei gradienti di trasporto solido litoraneo. Nella ricostruzione dei fondali si è avuto cura di implementare le batimetrie di progetto in funzione degli interventi previsti per i prolungamenti del molo di sopraflutto e del molo di sottoflutto.

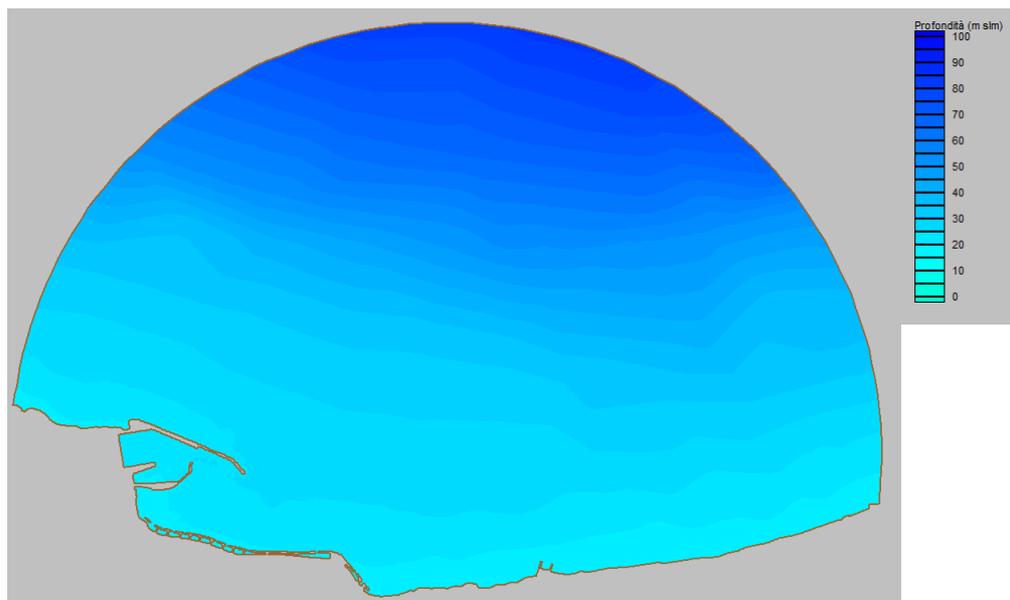


Figura 5.1 – Dominio generale ADCIRC per la configurazione progettuale con relative batimetrie

La mesh è caratterizzata da elementi triangolari, di dimensioni e densità variabili, al fine di ottenere una maggiore risoluzione in specifiche zone, ad esempio vicino la costa e le opere portuali. In queste analisi si è scelto di utilizzare sottocosta una risoluzione di elementi con lato di dimensione pari a 10 m, mentre al largo la dimensione della maglia è pari a 50 m.

Per le simulazioni condotte, la durata è stata posta pari a 2 *giorni*, secondo quanto argomentato durante la descrizione delle simulazioni idrodinamiche.

Si riporta l'immagine relativa alle simulazioni sul regime idrodinamico indotto dalla mareggiata sottocosta, con tempo di ritorno annuale e proveniente da 330°N. Si è assegnato al rosso il valore di velocità di 1,0 m/s, al blu il valore di 0,00 m/s, per meglio rappresentare e distinguere i campi di velocità.

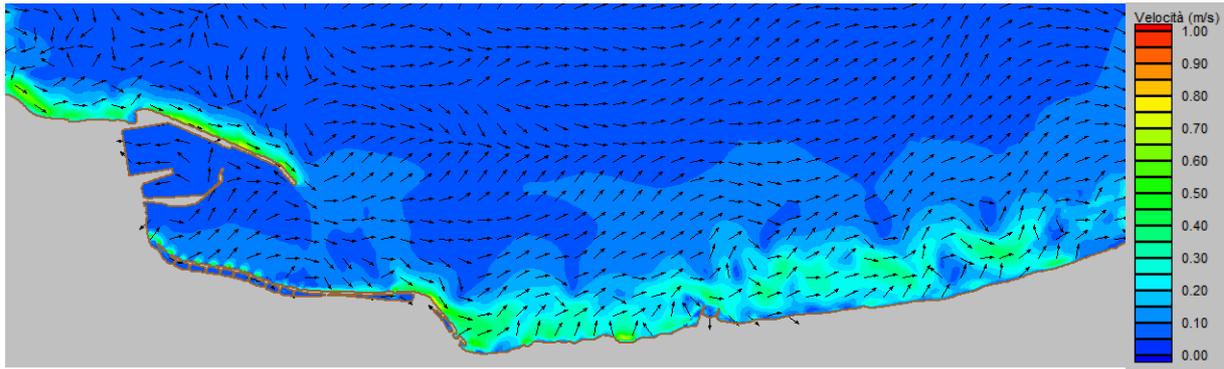


Figura 5.2– Regime idrodinamico indotto dalla mareggiata annuale da Maestrale. Layout A

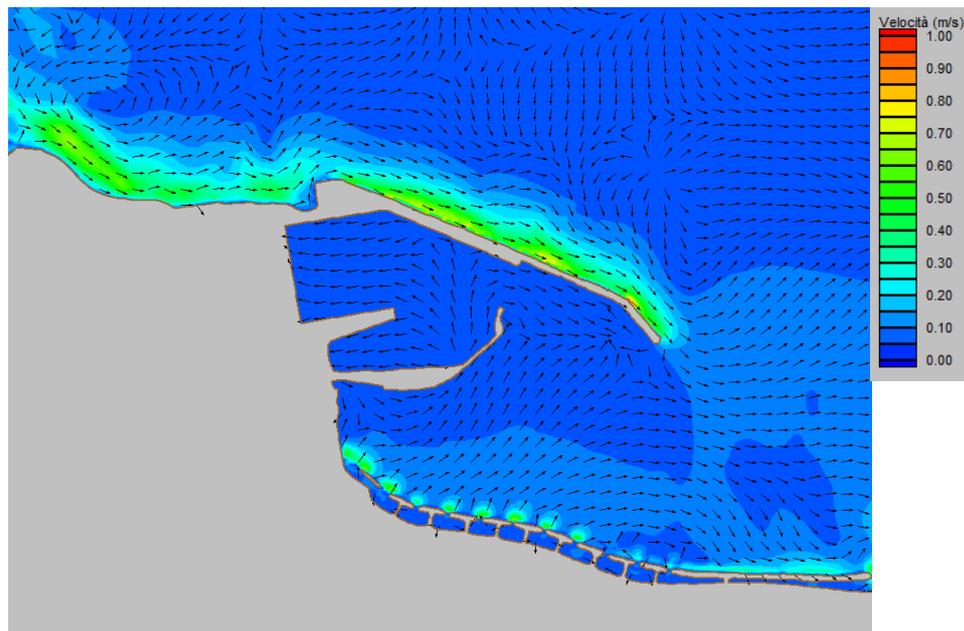


Figura 5.3– Regime idrodinamico indotto dalla mareggiata annuale da Maestrale. Layout A. Particolare.

Anche per il Layout A, le condizioni idrodinamiche indotte dal moto ondoso dal IV quadrante, comportano la formazione di una corrente litoranea con direzione O-E, lungo il molo di sopraflutto.

Di seguito sono riportate le immagini ritenute significative per lo studio del trasporto solido per sedimenti finissimi ( $D_{50} = 0,05 \text{ mm}$ ) fini ( $D_{50} = 0,15 \text{ mm}$ ) e medi ( $D_{50} = 0,5 \text{ mm}$ ) e indotto dalla mareggiata con  $D_s = 330 \text{ N}$ .

Nelle immagini i campi di colore sono relativi alla distribuzione dell'indice di trasporto solido, mentre i vettori all'indice di mobilità, ovvero, alla direzione del vettore traspo-

deposizionale. La scala cromatica utilizzata si articola come segue: il bianco indica un vettore del trasporto solido nullo o trascurabile; al giallo è associato il valore unitario, al rosso valori superiori o uguali 1,5; inoltre le dimensioni dei vettori sono direttamente proporzionali alla mobilità del sedimento.

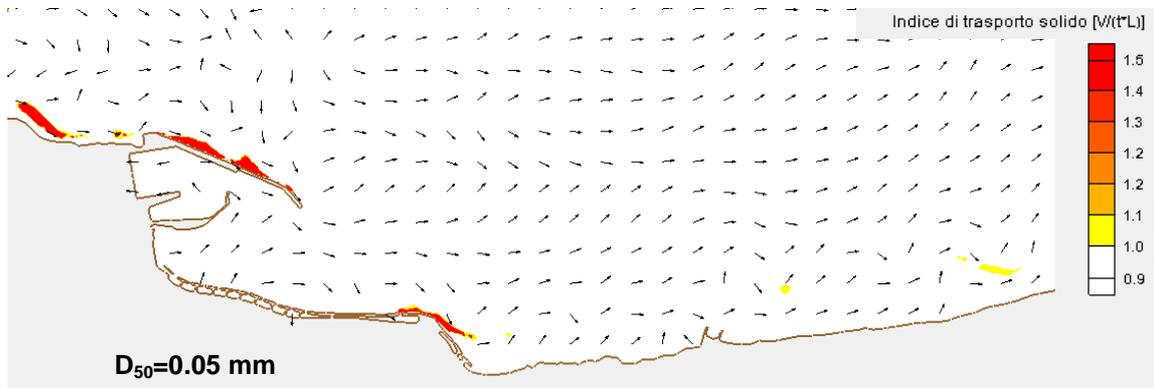


Figura 5.4 – Trasporto solido litoraneo. Mareggiata annuale da maestrale  $D_{50} = 0,05$  mm. Layout A.

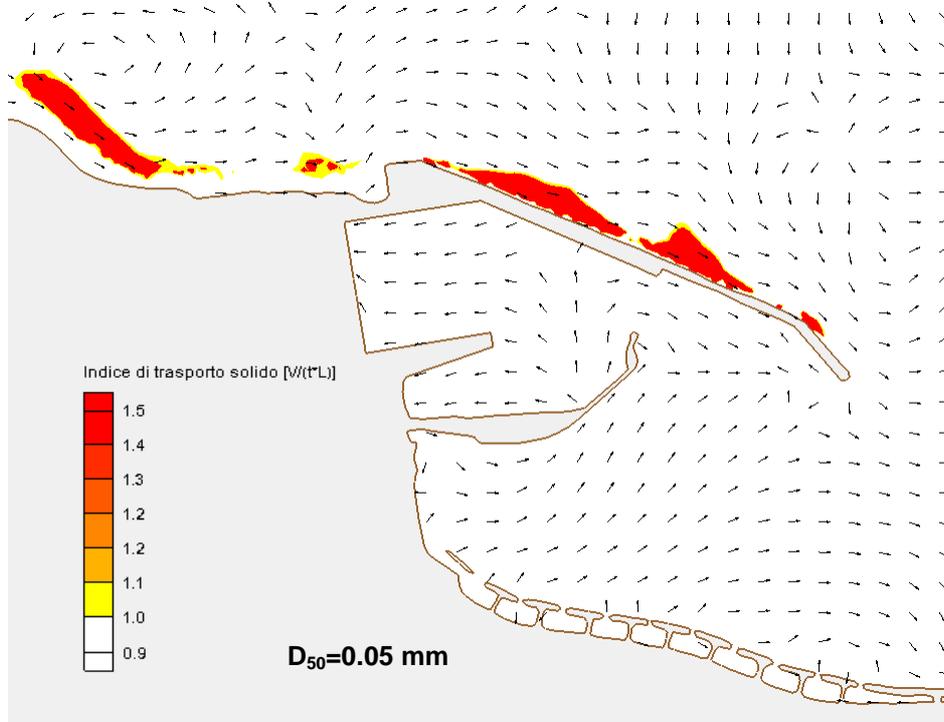


Figura 5.5–Trasporto solido litoraneo.Mareggiata annuale da maestrale  $D_{50}=0,05$  mm. Layout A.Particolare.

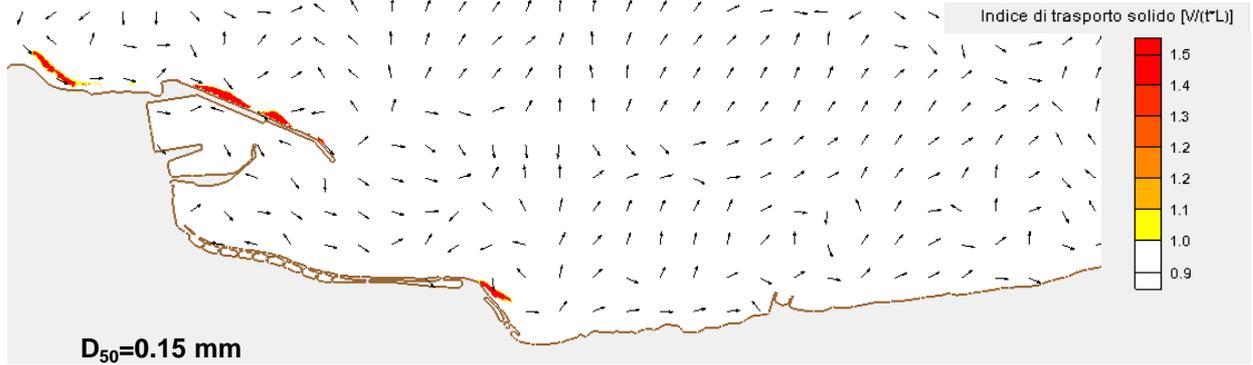


Figura 5.6 – Trasporto solido litoraneo. Mareggiata annuale da maestrale  $D_{50} = 0,15$  mm. Layout A.

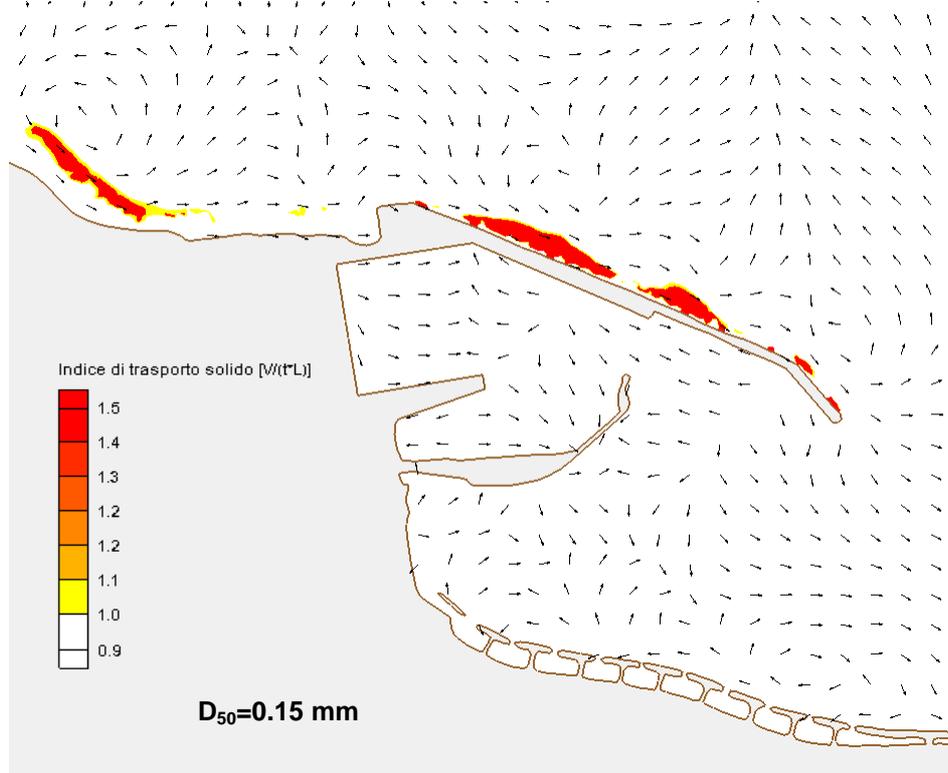


Figura 5.7–Trasporto solido litoraneo.Mareggiata annuale da maestrale  $D_{50}=0,15$  mm. Layout A.Particolare.

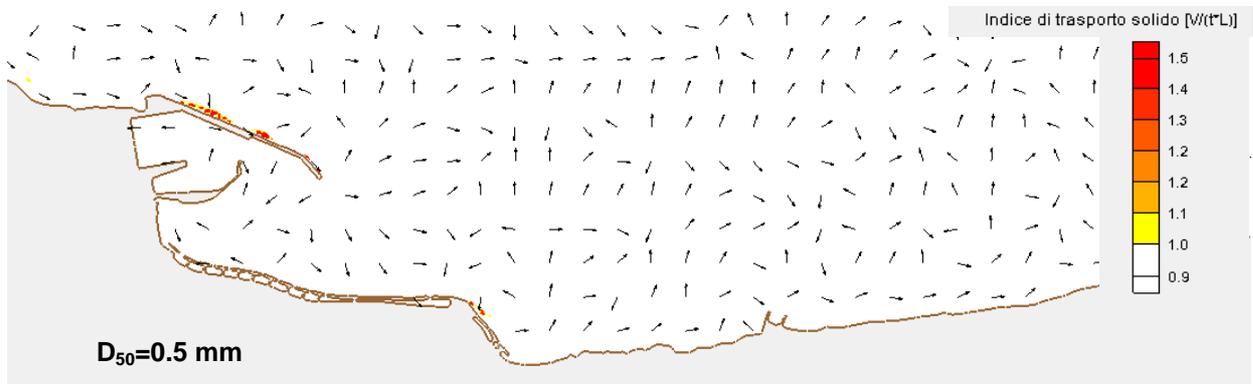


Figura 5.8–Trasporto solido litoraneo.Mareggiata annuale da maestrale  $D_{50}=0,05$  mm. Layout A.Particolare.

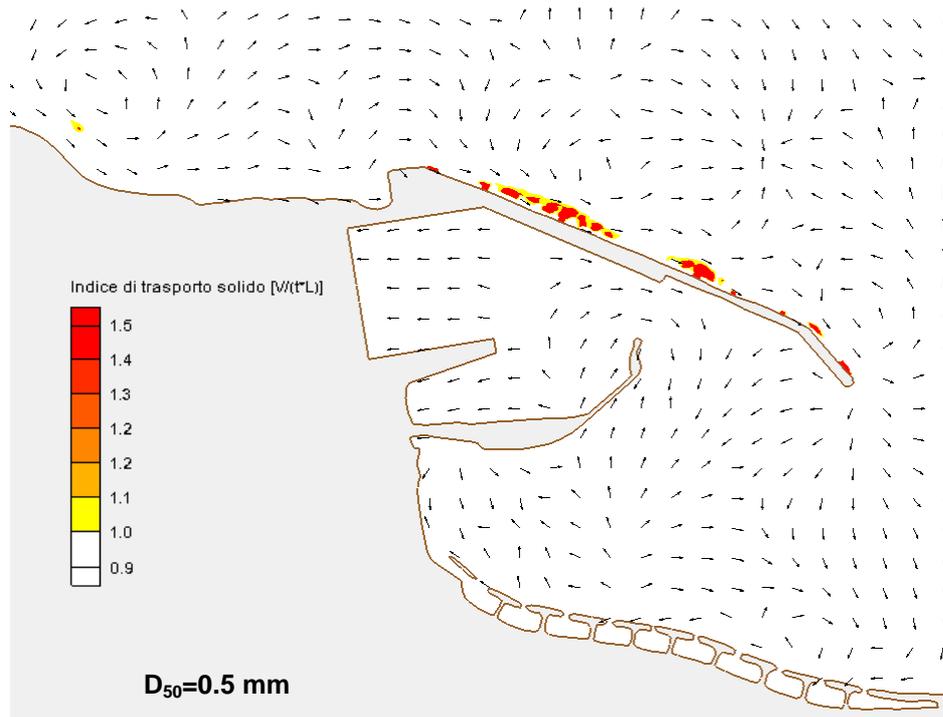


Figura 5.9–Trasporto solido litoraneo.Mareggiata annuale da maestrale  $D_{50}=0,50 \text{ mm}$ . Layout A.Particolare.

In conformità ai risultati ottenuti per le condizioni attuali, lungo il tratto di litorale in analisi il vettore del flusso sedimentario in direzione O-E è molto debole. In prossimità della nuova testata del molo di sopraflutto, dove i fondali sono più alti si osserva una brusca riduzione del trasporto solido. Il flusso sedimentario va diminuendo all'aumentare della granulometria.

Come si evince dalle simulazioni condotte, la realizzazione delle nuove portuali, non modifica i gradienti di trasporto solido esistenti.

Di seguito si riportano le immagini ritenute identificative delle tendenze al deposito ed accumulo dei sedimenti .

Con la scala cromatica del rosso è stata identificata la tendenza ai fenomeni di accumulo, mentre con scala cromatica del verde è stata visualizzata la tendenza ai fenomeni di erosione; il giallo è associato alle variazioni del fondale trascurabili.

Dapprima viene riportata l'immagine relativa a  $D_{50}=0,05 \text{ mm}$ , quindi quella relativa a  $D_{50}=0,15 \text{ mm}$ , infine quella relativa a  $D_{50}=0,05 \text{ mm}$ .

Nelle immagini successive si osserva la netta riduzione dell'entità dei fenomeni di insabbiamento in prossimità della nuova testata del molo di sopraflutto rispetto a quanto riscontrato nelle condizioni attuali.

Le nuove opere si sottoflutto, ricadendo in una zona a basso dinamismo, non intervengono sul regime del trasporto solido locale. La nuova configurazione portuale anzi è tale da ridurre le variazioni di fondale in prossimità della radice del molo di sottoflutto, presso la foce del torrente Barratina.

L'inserimento delle nuove opere portuali non incide sul trasporto solido longitudinale diretto da O verso E, in quanto tali interventi sono localizzati a ridosso delle attuali opere foranee del porto di Termini Imerese, all'interno della zona a trasporto solido ridotto, senza peggiorare le condizioni attuali.

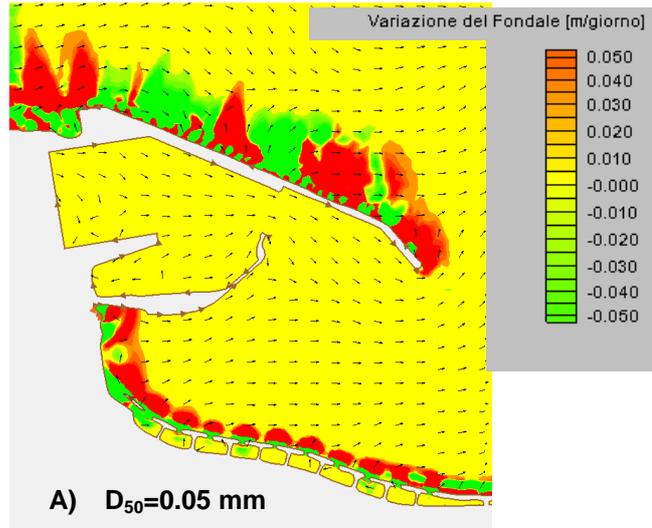


Figura 5.10– Evoluzione del fondale. Mareggiata annuale da Maestrale. Layout A.  $D_{50}=0,05$  mm

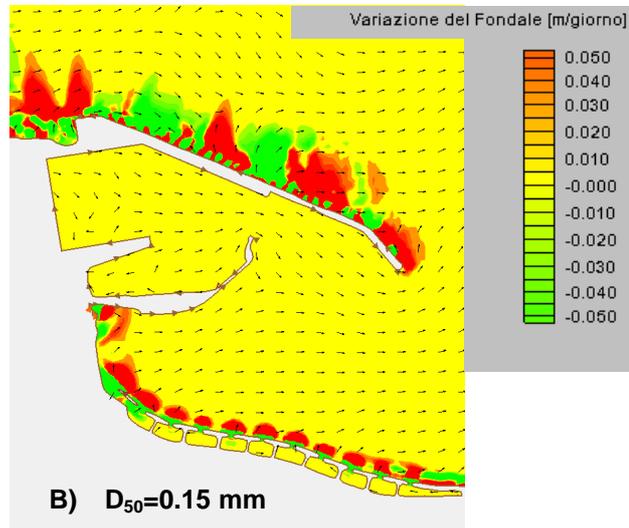


Figura 5.11– Evoluzione del fondale. Mareggiata annuale da Maestrale. Layout A.  $D_{50}=0,15$  mm

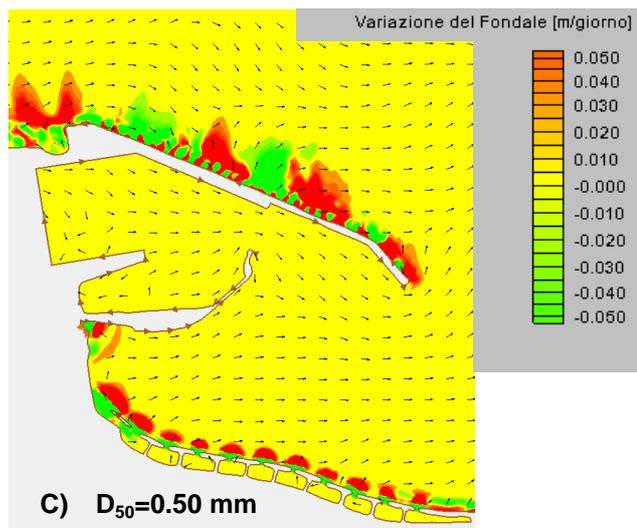


Figura 5.12– Evoluzione del fondale. Mareggiata annuale da Maestrale. Layout A.  $D_{50}=0,50$  mm

## 6. CONCLUSIONI

---

Il presente studio è stato redatto allo scopo di chiarire le dinamiche relative al trasporto solido litoraneo in prossimità del sito di Termini Imerese, ed in particolare nel tratto interessato dalle opere portuali da realizzare, stimando gli effetti che possono derivare dalla realizzazione delle opere sulla linea di riva interessata.

Dopo aver raccolto le informazioni di tipo climatico, ondometrico, correntometrico, idrologico-idraulico, sedimentologico (cfr. elabb. B.1, B.2, B.4, B.6) e sulla posizione storica della linea di riva, è stato evidenziato che le caratteristiche del trasporto solido litoraneo sono prevalentemente quelle di un flusso di tipo longitudinale con direzione O-E (dalla foce del fiume San Leonardo verso quella del fiume Imera), indotto prevalentemente dal moto ondoso proveniente dal IV quadrante.

Tale trasporto risulta oggi molto ridotto a causa del depauperamento degli apporti solidi fluviali provenienti dal F. San Leonardo come dagli altri corsi d'acqua. Tra le opere che hanno inciso maggiormente nel mancato apporto di materiali sono da considerare gli sbarramenti (come la diga di Rosamarina sul Fiume S.Leonardo), le briglie e traverse fluviali (su tutti i fiumi principali afferenti all'unità fisiografica) che catturano i sedimenti, ed infine le opere di sistemazioni delle foci che determinano la loro deviazione ed allontanamento verso il lago (foce del Torto e dell'Imera Settentrionale).

Per comprendere l'ordine di grandezza di tale riduzione di materiale solido, basti pensare che fino alla realizzazione della diga Rosamarina, il San Leonardo era in grado di fornire quantità di materiale solido tali da indurre elevati fenomeni di interrimento in prossimità della testata del molo foraneo, formando la cosiddetta "Secca di San Giovanni". Essa veniva utilizzata come spiaggia balneare dagli abitanti della zona. A seguito della realizzazione della diga Rosamarina, tale secca è completamente scomparsa, proprio per via del mancato apporto solido e della ininterrotta azione dei flutti.

La morfologia costiera attuale è stata fortemente influenzata anche dallo sviluppo degli insediamenti abitativi ed allo sfruttamento agricolo ed industriale della fascia retrostante la spiaggia. Le attività umane ed i manufatti costruiti hanno determinato in più punti l'interruzione dei cordoni dunali determinando una grave alterazione del regime degli apporti sedimentari e del loro trasporto e distribuzione.

La riduzione degli apporti solidi fluviali del Fiume San Leonardo e degli altri corsi d'acqua ha comportato una generalizzata tendenza ai fenomeni di erosione, aggravando lo stato delle spiagge limitrofe. Ai fini di limitare gli effetti causati dal continuo processo di erosione che coinvolge le coste sono stati realizzati, nel corso degli anni, numerosi interventi di protezione rigida delle coste.

Stante la conformazione orogenetica e la disposizione delle mareggiate prevalenti, la presenza delle opere foranee del porto di Termini Imerese ha contribuito in modo secondario sull'evoluzione della linea di costa, incidendo principalmente sulla costa immediatamente adiacente sottoflutto, oggi completamente armata.

Per le conferme e le verifiche di maggior dettaglio lo studio si è avvalso delle usuali metodologie riscontrabili in letteratura.

Le considerazioni sedimentologiche sugli indici statistici di Folk e Ward (1957), sui diagrammi di Shepard, sulle curve di Balsillie e sulla mineralogia dei sedimenti marini hanno consentito di confermare l'influenza delle correnti litoranee indotte dal moto ondoso sulla dinamica dei sedimenti all'interno dell'unità fisiografica in esame. L'affinità mineralogica tra i sedimenti prelevati alla testata del molo foraneo di sopraflutto con i suoli del bacino del fiume San Leonardo evidenzia che le correnti prevalenti siano orientate principalmente da ovest verso est.

Sono state condotte verifiche sulle potenziali modifiche del profilo di spiaggia a breve termine mediante il codice SBEACH. E' stato così confermato che i possibili scompensi cross-shore indotti dalle singole mareggiate o dall'effetto cumulato delle stesse, si possono manifestare tra la foce del fiume San Leonardo e il porto, con l'arretramento temporaneo della riva di qualche decina di metri al massimo e con un'escursione dei fondali pari a qualche decimetro al massimo. Tali risultati sono compatibili qualitativamente con quelli valutati dai redattori del P.A.I. per il litorale in esame. I risultati confermano d'altronde quanto riscontrabile sui luoghi soprattutto durante le mareggiate invernali.

Per ridurre tali effetti il Comune di Termini Imerese sta realizzando interventi di recupero e stabilizzazione della spiaggia che prevedono la realizzazione di scogliere soffolte, da finanziare con sovvenzione del Ministero dell'Ambiente.

Sono state inoltre condotte verifiche sui trend evolutivi di medio periodo valutando la componente long-shore del trasporto litoraneo. Dalle modellazioni numeriche della componente idrodinamica, realizzate con l'ausilio dei codici di calcolo STWAVE e ADCIRC, è stato confermato che il regime correntometrico litoraneo prevalente si sviluppa secondo la direzione longitudinale O-E, indotto dalla mareggiate del IV quadrante.

In presenza del moto ondoso del I quadrante, settore di traversia secondario, la corrente litoranea si inverte e ha direzione E-O.

Anche lo studio del clima d'onda e del contenuto energetico associato agli eventi ondosi ha confermato le informazioni presenti in letteratura sul regime idrodinamico, ovvero, che il contributo dovuto alle mareggiate del I quadrante è ridotto e trascurabile rispetto a quello del IV quadrante.

Dalle simulazioni condotte con l'ausilio del codice PTM sulla componente long-shore si è osservato che lungo il litorale in esame il regime del trasporto solido è effettivamente caratterizzato da una debole componente secondo la direttrice O-E.

Il vettore traspo-deposizionale è comunque in grado movimentare le particelle più leggere e trasportarle lungo il molo di sopraflutto. La mobilità dei sedimenti si riduce all'aumentare della granulometria delle particelle solide. Le particelle più grossolane permangono in situ.

Il trasporto solido O-E praticamente si annulla alla testata del molo di sopraflutto, ove i fondali sono più profondi, generando locali fenomeni di modesto insabbiamento. L'entità di tali fenomeni di insabbiamento è minima per via del mancato apporto solido primario.

In prossimità delle opere di sottoflutto si osservano gradienti correntometrici molto ridotti tali da permettere la sedimentazione e il permanere in situ dei sedimenti pelitici.

Sono state eseguite ulteriori simulazioni al fine di verificare con maggior dettaglio gli effetti indotti dalla nuova configurazione portuale dal punto di vista della dinamica dei sedimenti.

L'inserimento delle nuove opere portuali non incide significativamente sul trasporto solido longitudinale diretto da O verso E, in quanto tali interventi sono localizzati in continuità delle attuali opere foranee del porto di Termini Imerese, all'interno della zona di diffrazione dei flutti prevalenti, senza peggiorare le condizioni attuali.

Anzi si osserva la netta riduzione dell'entità di insabbiamento in prossimità della nuova testata del molo di sopraflutto, rispetto a quella, già ridotta, riscontrabile nelle condizioni attuali.

Le nuove opere di sottoflutto, ricadendo in una zona a basso dinamismo, non intervengono sul regime del trasporto solido locale.

Le evidenze riscontrate sul trasporto solido litoraneo e sul gradiente di accumulo/erosione consentono di affermare che la realizzazione delle nuove opere non comporta preoccupazioni per eventuali effetti negativi sulle coste adiacenti.