

PONTE SULLO STRETTO DI MESSINA



PROGETTO DEFINITIVO ALTERNATIVE AI SITI DI DEPOSITO

(Richieste CTVA del 22/12/2011 Prot. CTVA/2011/4534 e del 16/03/2012 Prot. CTVA/2012/1012)

EUROLINK S.C.p.A.

IMPREGILO S.p.A.
SOCIETÀ ITALIANA PER CONDOTTE D'ACQUA S.p.A.
COOPERATIVA MURATORI E CEMENTISTI - C.M.C. DI RAVENNA SOC. COOP. A.R.L.
SACYR S.A.U.
ISHIKAWAJIMA - HARIMA HEAVY INDUSTRIES CO. LTD
A.C.I. S.C.P.A. - CONSORZIO STABILE

IL PROGETTISTA

 SIGMA INGEGNERIA s.r.l.
Via della Libertà 201/A
90143 PALERMO
Tel. 091.8254162 Fax 091.307899
e-mail: sgmangr@gmail.com
Ing. Fausto Giordano Direttore Tecnico

(Dott. Ing. F. Giordano)



Ing. E. Pagani
Ordine Ing. Milano n°15408

IL CONTRAENTE GENERALE
PROJECT MANAGER
(Ing. P.P. Marcheselli)

STRETTO DI MESSINA
Direttore Generale
Ing. G. Fiammenghi

STRETTO DI MESSINA
Amministratore Delegato
Dott. P. Ciucci

Firmato digitalmente ai sensi dell' "Art.21 del D.Lgs. 82/2005"

CZV0927_F0

Unità Funzionale COLLEGAMENTI VERSANTE SICILIA
Tipo di sistema CANTIERI
Raggruppamento di opere/attività RIPASCIMENTO
Opera - tratto d'opera - parte d'opera ELEMENTI DI CARATTERE GENERALE
Titolo del documento STUDIO TRASPORTO SOLIDO LITORANEO A SEGUITO REALIZZAZIONE OPERE

CODICE

C G 0 0 0 0 P S D V S C Z C 3 G O 0 0 0 0 0 0 0 6 F 0

REV	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
F0	08/06/2012	EMISSIONE FINALE	DICA CATANIA	E. FOTI	F. GIORDANO

NOME DEL FILE: CZV0927_F0

revisione interna: __



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CATANIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE (DICA)

CONVENZIONE TRA LA SOCIETA' EUROLINK S.C.p.A. E IL
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE DELL'UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI CATANIA



Studi propedeutici relativi alla possibilità di impiego dei materiali di scavo per il ripascimento delle coste e analisi rischio idraulico dei bacini interessati dalle opere previste nel Progetto Definitivo del Collegamento Stabile dello Stretto di Messina sul versante Sicilia

Studio del trasporto solido litoraneo a seguito della realizzazione delle opere

Il Responsabile Scientifico
(Prof. Ing. Enrico FOTI)

Il Direttore del DICA
(Prof. Ing. Enrico FOTI)

Catania, Maggio 2012

Indice

Indice	1
1 Introduzione	2
2 Fonti di informazione	6
3 Descrizione dei modelli utilizzati	7
3.1 CMS-Wave	7
3.2 CMS-FLOW	11
4 Dominio di calcolo	20
5 Condizioni al contorno	21
6 Analisi dei risultati	25
7 Sintesi dei risultati e conclusioni	31
Bibliografia	34
Elenco delle Figure	36
Elenco delle Tabelle	39
Appendice A	41
Appendice B	45
Appendice C	49

1 Introduzione

Durante la fase approvativa del Progetto Definitivo del Collegamento Stabile dello Stretto di Messina sul versante Sicilia è emersa la necessità di verificare un diverso impiego di parte del materiale di scavo derivante dalla realizzazione della citata opera. In particolare, si è individuata la possibilità di utilizzare parte di tale materiale per la realizzazione di opere di riqualificazione del litorale tirrenico comprese tra la foce del Torrente Niceto e la foce del torrente Calvaruso realizzando un ripascimento protetto.

In particolare, è prevista la realizzazione di cinque lunghi tratti di barriere soffolte, interrotte solo in corrispondenza delle foci dei torrenti Caracciolo, Senia, Pietra e Saponara, a protezione di un ripascimento artificiale a tergo di dette barriere (dalla Figura 1.1 alla Figura 1.4 si riportano una planimetria del progetto e alcune sezioni tipo).

Il progetto di riqualificazione prevede, altresì, il salpamento delle numerose scogliere, perlopiù del tipo emerso, che negli ultimi decenni sono state realizzate a protezione del litorale in oggetto e che non solo non hanno conseguito l'obiettivo desiderato ma, perlomeno in taluni casi, hanno prodotto effetti indesiderati. Infatti, sebbene le suddette scogliere fossero state realizzate al fine di salvaguardare il territorio posto immediatamente a ridosso della spiaggia e fortemente antropizzato, la probabile mancanza di un approccio con riguardo all'intera unità fisiografica ha talvolta amplificato i processi erosivi nei tratti di costa immediatamente sottoflutto, contribuendo a determinare litorali fortemente degradati.

In tale contesto, la scelta effettuata da Eurolink S.C.p.A. di realizzare una riqualificazione dei litorali in oggetto tramite un

ripascimento protetto da una barriera soffolta, piuttosto che un più immediato ripascimento libero, è certamente da condividere. Tale soluzione, infatti, si rivela appropriata non solo a fronte della considerazione che il ripascimento libero non interviene sulle cause di erosione né, pertanto, sul tasso di arretramento della linea di riva, ma altresì con riferimento alle ulteriori circostanze che un ripascimento protetto:

- richiede una minore quantità di volumi a parità di avanzamento della linea di riva;
- favorisce l'intrappolamento dei sedimenti che pertanto non tendono a disperdersi verso il largo per effetto delle correnti di ritorno;
- interviene sulle cause dell'erosione causando uno smorzamento dell'energia del moto ondoso incidente e delle correnti litoranee responsabili del trasporto solido.

Tali circostanze, in definitiva, consentono l'incremento della stabilità della spiaggia e, dunque, riducono fortemente la necessità di ulteriori ripascimenti periodici.

Appare opportuno evidenziare il fatto che, per quanto concerne il ripascimento, è previsto l'uso di sedimenti provenienti dagli scavi delle opere di collegamento al Ponte opportunamente selezionati granulometricamente. Detta selezione, essendo per lo più rivolta alla rimozione della frazione fine, unitamente alla realizzazione della protezione al piede del ripascimento che, come detto, favorisce l'intrappolamento dei sedimenti e lo smorzamento del moto ondoso incidente, consentirà di limitare al massimo, se non annullare del tutto, spiacevoli fenomeni di intorbidamento delle acque.

È importante, infine, rilevare, soprattutto nel caso in oggetto, come lo smorzamento dell'energia del moto ondoso sulle barriere soffolte abbia l'ulteriore vantaggio di ridurre drasticamente la risalita del moto ondoso sulla spiaggia e, dunque, di mitigare il rischio da

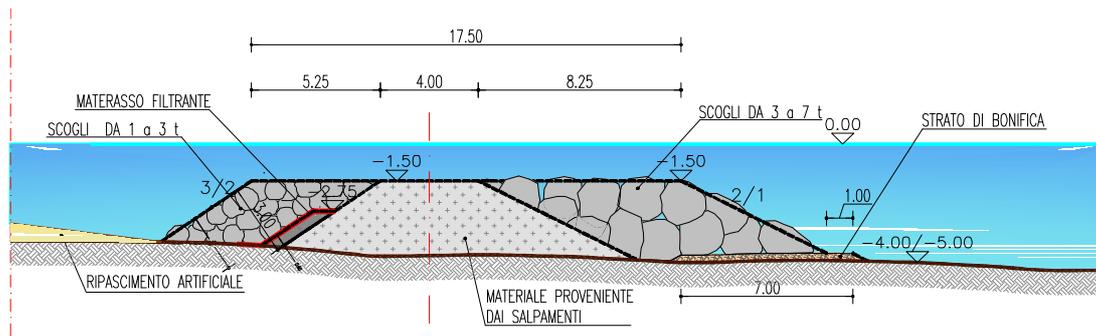


Figura 1.3 Esempio di sezione tipo della barriera soffolta realizzata in massi naturali e materiale proveniente dai salpamenti

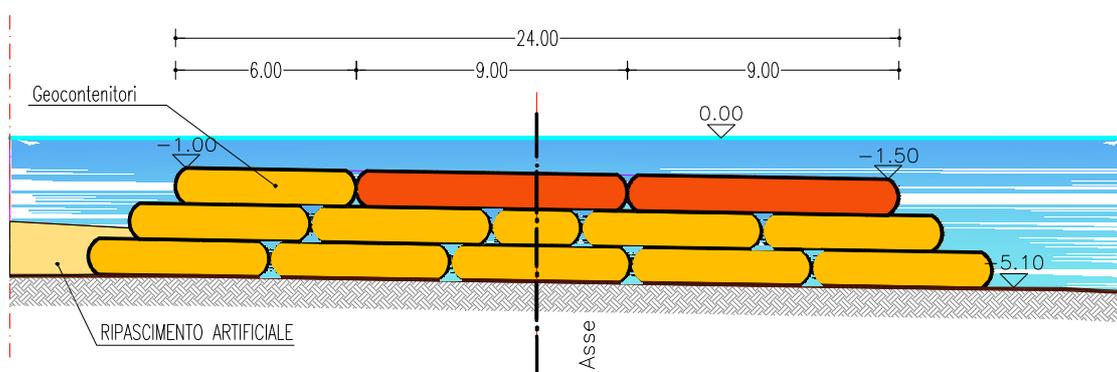


Figura 1.4 Esempio di sezione tipo della barriera soffolta realizzata in geocontentitori

Il presente studio riporta le analisi condotte per la valutazione del trasporto solido costiero in corrispondenza del previsto ripascimento protetto (analisi post-operam).

In dettaglio, il presente elaborato è organizzato come segue: il capitolo 2 riporta le fonti di informazioni utilizzate nella stesura dello studio; il capitolo 3 fornisce una sintetica descrizione dei modelli di calcolo utilizzati; il capitolo 4 descrive il dominio di calcolo; il capitolo 5 descrive le condizioni al contorno utilizzate; nel capitolo 6 vengono presentati i risultati delle simulazioni condotte; infine il capitolo 7 riporta alcune considerazioni conclusive.

2 Fonti di informazione

Il presente studio è stato redatto sulla base delle informazioni desunte dalle fonti di seguito riportate. In particolare, le informazioni cartografiche necessarie per la stesura del presente studio sono state desunte dalle seguenti carte:

- Carta Nautica dell'Istituto Idrografico della Marina Militare Italiana "Da Capo Milazzo a Roccella Ionica" (scala 1:100000, 2007);
- Rilievi topo-batrimetrici appositamente condotti per il presente studio dalla società SIGMA S.r.l. per conto di Eurolink S.c.p.A.;

Lo studio del clima meteomarinò è stato redatto sulla base delle seguenti informazioni:

- Dati ondametrici ricavati dal modello l'European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF);
- Mappa sedimentologica rilevata nell'ambito delle indagini propedeutiche al presente studio e fornita dal committente.

Si precisa che le informazioni relative l'intervento di ripascimento protetto nel tratto di litorale tirrenico compreso tra il torrente Calvaruso e il torrente Niceto sono state fornite dalla SIGMA S.r.l.. In particolare, ai fini del presente studio sono state utilizzate le informazioni relative sia al ripascimento che alla geometria delle previste barriere soffolte.

3 Descrizione dei modelli utilizzati

Il presente studio è stato condotto utilizzando in sequenza due moduli del modello bidimensionale CMS prodotto da U.S. Corps of Engineering.

Il primo modello, denominato CMS-Wave, consente di propagare il moto ondoso dal largo alla riva e utilizzando una maglia di dettaglio, consente di ottenere nel dominio di calcolo le caratteristiche del moto ondoso (altezza, periodo, direzione e radiation stress) necessarie per la valutazione delle correnti litoranee indotte dal moto ondoso stesso e del relativo trasporto solido.

Utilizzando tali dati e integrandoli con la distribuzione dei sedimenti presenti e previsti nel dominio di calcolo, il secondo modello, denominato CMS-Flow, consente di valutare le correnti litoranee e il relativo trasporto solido.

Di seguito si riporta una sintetica descrizione dei citati modelli. Ulteriori dettagli potranno essere ottenuti dal lettore dai manuali dei citati software.

3.1 CMS-Wave

Il modello CMS-Wave creato da Lin et al. (2006) e da Demirbilek et al. (2007) è un modello bidimensionale per la propagazione dello spettro d'onda, formulato a partire da una equazione ad approssimazione parabolica, contenente termini che tengono in considerazione la dissipazione dell'energia e la diffrazione. Tale modello simula una trasformazione stazionaria spettrale di onde direzionali casuali, coesistenti con le correnti litoranee. Il modello agisce su un semipiano d'onda, ciò implica che le onde possono

propagare solo dal contorno al largo verso la costa, ed include caratteristiche quali la generazione d'onda causata dal vento, la riflessione e la dissipazione dovuta alle interazioni con il fondale.

Alcuni studi eseguiti dai succitati autori hanno validato il presente modello, dimostrando che esso è applicabile per la propagazione di onde casuali sopra batimetrie complesse e sottocosta, dove i fenomeni di rifrazione, diffrazione, riflessione, shoaling a frangimento agiscono simultaneamente, come per esempio nelle insenature.

Come accennato in precedenza, il modello CMS-Wave è basato sulla equazione del bilancio della azione ondosa, che può essere espressa come:

$$\frac{\partial(C_x N)}{\partial x} + \frac{\partial(C_y N)}{\partial y} + \frac{\partial(C_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{\kappa}{2\sigma} \left[(CC_g \cos^2 \theta N_y)_y - \frac{CC_g}{2} \cos^2 \theta N_{yy} \right] - \varepsilon_b N - S$$

dove $N = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma}$ è la densità di azione ondosa da risolvere e risulta essere funzione della frequenza σ e della direzione θ . $E(\sigma, \theta)$ è la densità dello spettro d'onda, che rappresenta l'energia dell'onda per unità di superficie e per intervallo di frequenza. In presenza di correnti la densità di azione ondosa si conserva, al contrario di quanto avviene per la densità spettrale. Nella presente formulazione vengono inoltre considerate sia la diffrazione che la dissipazione d'energia. C e C_g sono, rispettivamente, la celerità dell'onda e la celerità di gruppo; x e y sono le coordinate orizzontali; C_x , C_y e C_θ sono le velocità caratteristiche rispetto a x , y , e θ . N_y e N_{yy} rappresentano la prima e la seconda derivata di N rispetto a y ; κ è un parametro empirico che rappresenta l'intensità dell'effetto di diffrazione; ε_b rappresenta la parametrizzazione della dissipazione di energia dovuta al frangimento; S indica ulteriori sorgenti di energia, siano esse entranti o dissipanti (la forzante dovuta al vento, le perdite per attrito con il fondo etc.), ed il termine di interazione non lineare tra le onde.

Il primo termine a secondo membro nella equazione descritta in precedenza rappresenta il termine di diffrazione formulato a partire da una approssimazione parabolica della teoria dell'onda. Nelle applicazioni, i valori del parametro di intensità della diffrazione κ (≥ 0) devono essere calibrati ed ottimizzati per le strutture. Dalla comparazione dei risultati del modello con alcuni dati misurati (in campo ed in laboratorio) è possibile definire due casi tipo per la individuazione del corretto coefficiente da utilizzare. In particolare per la stima della diffrazione delle onde a tergo di un frangiflutti semi-infinito, o in corrispondenza di una apertura stretta, con un varco avente lunghezza al più uguale ad una lunghezza d'onda, viene raccomandato l'uso di un valore pari a 4 per il coefficiente κ (massimo valore consigliato). Invece, per una apertura più ampia di una lunghezza d'onda viene raccomandato l'uso di un valore pari a 3.

L'energia d'onda riflessa dalla superficie di una struttura (o da una spiaggia) viene calcolata sotto l'ipotesi che gli angoli che formano l'onda incidente e quella riflessa, con la direzione normale alla costa, sono uguali in ampiezza e che l'energia riflessa è pari ad una data frazione dell'energia dell'onda incidente. Il modello in esame calcola tale energia riflessa dalla costa e dalle strutture in essa presenti all'interno della procedura di calcolo della distribuzione della densità di azione ondosa (forward reflection). E' anche possibile calcolare la riflessione dovuta al fondo, come per esempio quella che si verifica ad una certa distanza dalla spiaggia o dal frangiflutti, tramite un metodo di calcolo a ritroso (backward reflection). Questo metodo causa però un notevole aumento dei tempi di calcolo, che possono arrivare a raddoppiarsi.

La simulazione del frangimento dell'onda causato dalla sua interazione con il fondale è essenziale nei modelli d'onda costieri. Nel codice di calcolo CMS-Wave la dissipazione di energia dovuta al frangimento può essere stimata tramite quattro possibili formulazioni:

(i) formula del Goda estesa (extended Goda formulation) sviluppata da Sakai et al. (1989), (ii) Miche estesa (Battjes 1972), (iii) Battjes e Jensen (1978), (iv) Chawla e Kirby (2002). Queste formule possono essere divise in due generiche categorie. La prima classe di formulazioni ha come scopo quello di simulare l'energia dissipata dal frangimento troncando la coda della distribuzione di Rayleigh dell'altezza d'onda sulla base di un determinato criterio di frangimento. Le formulazioni estese di Goda e Miche appartengono a tale classe. La seconda categoria di formule usano l'analogia di un modello ad onde periodiche regolari (bore) al fine di stimare l'energia totale dissipata dal frangimento (Battjes e Janssen 1978). Le formule di Battjes e Janssen e di Chawla e Kirby appartengono a questa classe.

Il modello in esame può considerare anche l'effetto del vento sulla superficie libera. L'evoluzione delle onde su uno specchio acqueo molto esteso è infatti causato in modo sostanziale dalla interazione del vento con le onde. Il risultato è un campo d'onde non lineari ottenuto dall'equilibrio della forzante legata al vento, dal frangimento delle onde in fase di generazione (whitecapping) e dalla crescita delle onde stesse. Nel modello CMS-Wave il processo di "whitecapping" e la forzante legata al vento vengono tenuti in considerazione tramite due termini aggiuntivi: uno dissipante ed uno sorgente di energia.

Per quanto concerne la stima della trasmissione delle onde in corrispondenza di strutture presenti lungo la costa, il presente modello utilizza delle formule piuttosto semplici. In particolare, con riferimento a frangiflutti galleggianti rigidi, il coefficiente di trasmissione K_t (pari al rapporto tra l'altezza d'onda trasmessa a tergo dell'opera e l'altezza dell'onda incidente) viene calcolato tramite la formula analitica sviluppata da Macagno (1953), derivante dalla teoria di Stokes al primo ordine di approssimazione:

$$K_t = \left[1 + \left(\frac{kB_c \sinh \frac{kh}{2\pi}}{2 \cosh k(h - D_c)} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

in cui B_c è la larghezza del frangiflutti e D_c è il suo pescaggio.

La trasmissione delle onde sopra una struttura o un frangiflutti a gettata è causata principalmente dallo stramazzo della massa d'acqua che tracima al di là della struttura stessa. Quindi, il rapporto tra la quota della cima della struttura e l'altezza d'onda incidente rappresenta il principale parametro che governa la trasmissione dell'onda. Il modello CMS-Wave calcola il tasso di tracimazione al di sopra di un frangiflutti verticale basandosi sulla espressione sviluppata da Goda (1985):

$$K_t = 0.3 \left(1.5 - \frac{h_c}{H_i} \right)$$

dove h_c è la quota della cresta della struttura, misurata rispetto al livello di quiete, H_i è l'altezza d'onda incidente. Tale equazione risulta valida per strutture emerse ($h_c \geq 0$). Nel caso di frangiflutti costituiti da dighe a gettata, in materiale lapideo o in calcestruzzo, il coefficiente di trasmissione è invece espresso dalla seguente equazione:

$$K_t = 0.3 \left(1.1 - \frac{h_c}{H_i} \right)$$

3.2 CMS-FLOW

Il modello CMS- FLOW permette la risoluzione dell'equazione di continuità integrata sulla profondità e dell'equazione di bilancio dell'azione ondosa applicando il metodo dei volumi finiti in campo bidimensionale.

Le equazioni di continuità e di bilancio che il modello numerico risolve sono espresse come segue:

$$\frac{\partial(h + \eta)}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial u q_x}{\partial x} + \frac{\partial v q_x}{\partial y} + \frac{1}{2} g \frac{\partial(h + \eta)^2}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} D_x \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} D_y \frac{\partial q_x}{\partial y} + f q_y - \tau_{bx} + \tau_{wx} + \tau_{sx}$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial u q_y}{\partial x} + \frac{\partial v q_y}{\partial y} + \frac{1}{2} g \frac{\partial(h + \eta)^2}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} D_x \frac{\partial q_y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} D_y \frac{\partial q_y}{\partial y} + f q_x - \tau_{by} + \tau_{wy} + \tau_{sy}$$

dove:

h è la profondità relativa rispetto ad una data verticale;

η è la deviazione della superficie libera rispetto il livello idrico in quiete;

t è il tempo;

q_x è il flusso per unità di larghezza lungo l'asse x;

q_y è il flusso per unità di larghezza lungo l'asse y;

u è la componente della velocità lungo l'asse x;

v è la componente della velocità lungo l'asse y ad una profondità media;

g è l'accelerazione di gravità;

D_x è il coefficiente di diffusione lungo l'asse x;

D_y è il coefficiente di diffusione lungo l'asse y;

f è il parametro di Coriolis;

$\tau_{bx}, \tau_{wx}, \tau_{sx}$ e $\tau_{by}, \tau_{wy}, \tau_{sy}$ sono la tensione al fondo, la tensione in superficie e la tensione dell'onda rispetto l'asse x e y rispettivamente.

Le componenti della velocità sono relative alla portata per unità di larghezza e formulate nel modo seguente:

$$u = \frac{q_x}{h + \eta}$$

$$v = \frac{q_y}{h + \eta}$$

In assenza di onde le componenti della tensione al fondo possono essere espresse come:

$$\tau_{bx} = C_b u |U|$$

$$\tau_{by} = C_b v |U|$$

dove U è la velocità totale della corrente ($|U| = \sqrt{u^2 + v^2}$) e C_b è un coefficiente empirico della tensione al fondo ($C_b = g/c^2$ con c coefficiente di Chezy).

In presenza di onde, la tensione al fondo contiene i contributi della corrente quasi-stazionaria e del moto orbitale al fondo delle onde. Allo scopo di valutare la tensione media al fondo, il modello applica un'approssimazione circolare dell'onda che ne consente una stima analitica in riferimento ad un tempo medio.

A tal fine, vengono utilizzate le seguenti approssimazioni (Nishimura, 1988):

$$\tau_{bx} = C_b \left\{ \left(U_{wc} + \frac{\omega_b^2}{U_{wc}} \cos^2 \alpha \right) u + \left(\frac{\omega_b^2}{U_{wc}} \cos \alpha \sin \alpha \right) v \right\}$$

$$\tau_{by} = C_b \left\{ \left(\frac{\omega_b^2}{U_{wc}} \cos \alpha \sin \alpha \right) u + \left(U_{wc} + \frac{\omega_b^2}{U_{wc}} \cos^2 \alpha \right) v \right\}$$

dove α è l'inclinazione dell'onda relativa all'asse x.

Le tensioni superficiali sono invece espresse mediante le relazioni:

$$\tau_{wx} = C_d \frac{\rho_a}{\rho_w} W^2 \sin \theta$$

$$\tau_{wy} = C_d \frac{\rho_a}{\rho_w} W^2 \cos \theta$$

dove C_d è il coefficiente di Drag, ρ_a è la densità dell'aria, ρ_w è la densità dell'acqua, W è la velocità del vento e θ è la sua direzione (convenzionalmente la direzione del vento è 0° partendo da est con angoli crescenti in senso antiorario).

Le tensioni dell'onda vengono calcolate in funzione dei gradienti spaziali della distribuzione di tensione attraverso le relazioni:

$$\tau_{Sx} = -\frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right)$$

$$\tau_{Sy} = -\frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right)$$

dove S_{xx} , S_{xy} , S_{yy} sono le componenti del radiation stress.

Il parametro di Coriolis è dato dalla seguente espressione:

$$f = 2\Omega \sin\varphi$$

dove Ω è la velocità angolare di rotazione della Terra e φ è la latitudine.

Il coefficiente di viscosità turbolenta (D), se le onde non contribuiscono all'agitazione, può essere calcolato in funzione della profondità totale dell'acqua, della velocità della corrente e della scabrezza del fondo attraverso la relazione (Falconer, 1980):

$$D_o = \frac{1}{2} \left[1.156g(h + \eta) \frac{|U|}{C^2} \right]$$

Nella surf zone, le onde contribuiscono significativamente alle turbolenze laterali e il coefficiente di viscosità dovuto ai vortici risulta essere in funzione delle caratteristiche delle onde.

In questo caso, nel modello CMS-M2D la surf zone è rappresentata dalla condizione:

$$D_w = \varepsilon_L$$

dove ε_L descrive la turbolenza laterale in profondità (Smith, J.M., Larson M. e Kraus, N.C., 1993) ed è espressa dalla relazione (Kraus, N.C. e Larson, M., 1991):

$$\varepsilon_L = \Lambda u_m H$$

dove Λ è un coefficiente empirico che rappresenta l'intensità della turbolenza laterale e u_m è l'ampiezza della componente orizzontale della velocità orbitale dell'onda al fondo espressa dalla formula:

$$u_m = \frac{gHT}{\left[2\lambda \cosh\left(\frac{2\pi(h+\eta)}{\lambda}\right) \right]}$$

dove T indica il periodo dell'onda.

Inoltre, il CMS- FLOW utilizza un coefficiente di turbolenza ponderato allo scopo di rappresentare la zona di transizione tra le turbolenze della surf zone e quelle oceaniche; il coefficiente viene calcolato con la relazione:

$$D = (1 - \theta_m)D_o + \theta_m D_w$$

dove il parametro θ_m è:

$$\theta_m = \left(\frac{H}{h+\eta}\right)^3$$

in cui la dipendenza cubica della profondità introduce il volume del fluido.

Gli apporti del vento vengono quantificati facendo riferimento ad un profilo parabolico espresso dalla relazione proposta da Charnock (1995). In genere è d'uso fare riferimento alla velocità del vento all'altezza di 10 m s.l.m.m.

Il modello CMS- FLOW è anche in grado di determinare l'entità dei sedimenti trasportati e i conseguenti cambiamenti del fondo.

In particolare il trasporto di materiale può essere quantificato dal modello utilizzando tre differenti formule applicabili sia in presenza che in assenza di onde:

- la formula di Watanabe (1987);
- la formula Lund-CIRP (Camenen e Larson 2007) che combina il trasporto al fondo con quello in sospensione;
- l'equazione di Avvezione-Diffusione (AD).

Nel presente studio è stata scelta la formulazione Lund-CIRP poiché permette di ottenere una graduale transizione tra l'area del frangimento delle onde e la zona in cui questo non è ancora avvenuto

e tra le zone interessate dalla sola corrente e quelle caratterizzate da corrente e onde.

La formulazione Lund-CIRP calcola il trasporto totale nella direzione della corrente e, allo scopo di ottenere il trasporto bidimensionale, effettua una suddivisione del vettore del trasporto dei sedimenti nelle componenti x e y.

In CMS-FLOW, la formula Lund-CIRP può essere implementata determinando il trasporto totale come combinazione del trasporto al fondo e di quello in sospensione.

La scabrezza al fondo k_s viene stimata sommando tre componenti: la scabrezza relativa dei grani ($k_{sd} = 2.5d_{50}$), la scabrezza di forma ($k_{sf} = 7.5H_r^2/L_r$) e la scabrezza relativa dei sedimenti ($k_{ss} = 5d_{50}\theta_i$ con θ_i parametro di Shields); la scabrezza totale è espressa quindi dalla relazione:

$$k_s = k_{sd} + k_{sf} + k_{ss}$$

Il trasporto solido al fondo q_b può essere stimato utilizzando la formula proposta da Camenen e Larson (2005) riferita sia alla corrente che alle onde:

$$\frac{q_{bw}}{\sqrt{(s-1)gd_{50}^3}} = a_w \sqrt{\theta_{ncr}} \theta_{cw,m} \exp\left(-b \frac{\theta_{cr}}{\theta_{cw}}\right)$$

$$\frac{q_{bn}}{\sqrt{(s-1)gd_{50}^3}} = a_n \sqrt{\theta_{cn}} \theta_{cw,m} \exp\left(-b \frac{\theta_{cr}}{\theta_{cw}}\right)$$

dove i pedici w ed n indicano rispettivamente la direzione dell'onda e la direzione normale all'onda, a e b sono dei coefficienti, $\theta_{cw,m}$ e θ_{cw} sono il valore medio e il valore massimo del parametro di Shields trascurando la scabrezza del fondo; nel caso in cui il trasporto abbia direzione normale alla direzione dell'onda il coefficiente a_n viene assunto pari a 12.

Il coefficiente b descrive l'inizio del movimento del materiale ed è posto pari a 4.5. I termini θ_{ncr} e θ_{cn} rappresentano il contributo della tensione di taglio alla velocità di trasporto durante un ciclo dell'onda in direzione parallela e normale alle onde stesse.

I valori dei coefficienti di trasporto vengono ottenuti mediante la calibrazione di un ampio set di dati ottenuti in laboratorio e gli esperimenti di campo possono essere riferiti alla corrente media, ad onde oscillatorie (sinusoidali e asimmetriche) e all'unione tra corrente e onde. Al fine di determinare il coefficiente di trasporto nella direzione dell'onda, è possibile utilizzare la seguente relazione (Camenen, B. e Larson, M., 2005):

$$a_w = 6 + 6X_f$$

$$X_f = \frac{\theta_c}{\theta_c + \theta_w}$$

In molte applicazioni, si considerano le onde sinusoidali senza asimmetrie; ciò comporta che il contributo delle onde stesse alla velocità di trasporto risulti trascurabile e che solo la corrente provochi lo spostamento di materiale. Per questo motivo si può fare riferimento alla seguente formula:

$$\frac{q_{bc}}{\sqrt{(s-1)gd_{50}^3}} = a_n \sqrt{\theta_c} \theta_{cw,m} \exp\left(-b \frac{\theta_{cr}}{\theta_{cw}}\right)$$

dove la portata q_{bc} è ottenuta nella direzione della corrente e il trasporto nella direzione normale alla corrente è considerato nullo.

Il trasporto in sospensione q_s viene calcolato considerando un profilo esponenziale della concentrazione e velocità costante

lungo l'intera colonna d'acqua (Camenen, B. e Larson, M., 2006):

$$q_s = U_c c_R \frac{\varepsilon}{w_s} \left(1 - \exp \left(- \frac{w_f d'}{\varepsilon} \right) \right)$$

dove w_f è la velocità di caduta del sedimento, c_R è la concentrazione di riferimento e ε è la diffusività del sedimento. La portata q_s è valutata nella direzione della corrente in quanto le onde non contribuiscono al trasporto. I termini c_R e ε vengono calcolati in funzione della tensione totale e considerando la scabrezza al fondo. La concentrazione di riferimento è data dalla seguente relazione:

$$c_R = A_{cR} \theta_{cw,m} \exp \left(-b \frac{\theta_{cr}}{\theta_{cw}} \right)$$

dove il coefficiente A_{cR} è pari a:

$$A_{cR} = 3.5 \cdot 10^{-3} \exp(-0.3d_*)$$

e la dimensione dei grani adimensionalizzata è $d_* = ((s - 1)g/v^2)^{1/3} d_{50}$.

La diffusività del sedimento risulta essere in funzione della dissipazione di energia in accordo con la trattazione di Battjes (1975):

$$\varepsilon = \left(\frac{D_g}{\rho} \right)^{1/3} d$$

dove D_g è la dissipazione totale effettiva di energia data dalla somma delle dissipazioni dovute alla corrente, alle onde e al frangimento delle onde.

Entrambe le tipologie di trasporto di materiale, al fondo e in sospensione, assumono valore nullo all'inizio della simulazione e aumentano ad ogni incremento del passo temporale.

4 Dominio di calcolo

Per entrambi i modelli si è utilizzato il medesimo dominio a maglia rettangolare regolare con risoluzione di 4 m in direzione ortogonale alla linea di riva e 5 m nella direzione parallela alla stessa.

E' stata definita una griglia di calcolo di dimensioni pari a 10500m×952m ed è orientata in modo che l'asse delle ascisse parallelo alla linea di riva formi un angolo di 19° rispetto alla direzione corrispondente all' Est Geografico (vedere Figura 4.1).

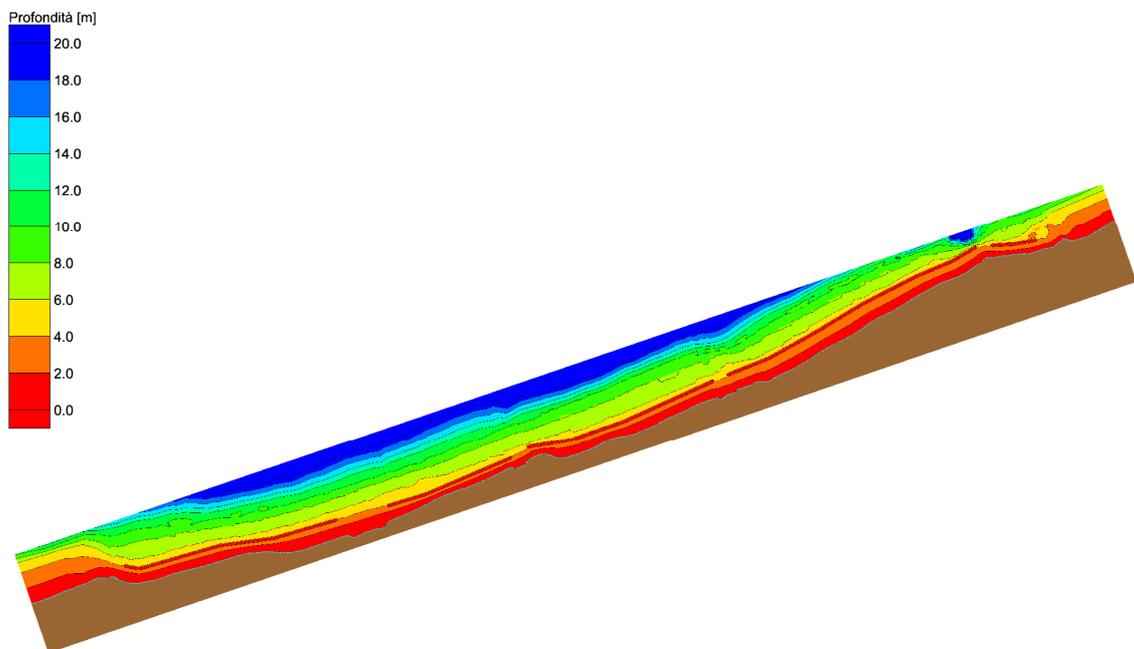


Figura 4.1 Griglia di calcolo avente l'asse lungo la direzione parallela alla linea di costa che forma un angolo di 19° con la direzione Est

5 Condizioni al contorno

Le forzanti idrodinamiche fornite al modello ondametrico, i cui risultati sono stati successivamente utilizzati per la determinazione delle correnti e del trasporto solido, sono state desunte sulla base dei risultati dello studio idraulico marittimo allegato al presente progetto.

Più in dettaglio sulla base della distribuzione dell'energia del moto ondoso nel punto 2 indicato nel citato studio idraulico marittimo, posto a una profondità di circa 20 m, e riportata nella Tabella 5.1, e della relativa distribuzione dell'energia del moto ondoso riportata in Tabella 5.2, si sono valutate cinque condizioni di moto ondoso al contorno energeticamente equivalenti all'intera distribuzione del moto ondoso medio annuale.

In particolare la Tabella 5.3 riporta le caratteristiche del clima ondoso (altezza d'onda H_s , periodo di picco T_p , e direzione di provenienza Dir) energeticamente equivalente sul contorno al largo del dominio di calcolo unitamente alla frequenza che le stesse onde devono possedere su base annua e al contributo all'energia complessiva.

Inoltre al fine di valutare il trasporto solido è stata considerata la distribuzione di sedimenti riportata in Figura 5.1. Tale distribuzione deriva dalla mappa dei sedimenti rilevata oggi in situ modificata al fine di tenere in considerazione la presenza della barriera soffolta e del ripascimento artificiale.

Tabella 5.1

Frequenza di apparizione del moto ondoso in corrispondenza del contorno lato mare del dominio di calcolo posto a una profondità di 20 m.

Dir [°N]	Hs [m]						
	0-0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	2.5-3.0	3.0-3.5
0	0.537	0.359	0.041	0.019	0.007	-	-
10	0.218	0.074	0.011	-	-	-	-
20	0.229	0.056	0.022	0.007	-	-	-
30	0.518	0.196	0.033	-	-	-	-
40	-	-	-	-	-	-	-
50	-	-	-	-	-	-	-
60	-	-	-	-	-	-	-
70	-	-	-	-	-	-	-
80	-	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-
100	-	-	-	-	-	-	-
110	-	-	-	-	-	-	-
120	-	-	-	-	-	-	-
130	-	-	-	-	-	-	-
140	-	-	-	-	-	-	-
150	-	-	-	-	-	-	-
160	-	-	-	-	-	-	-
170	-	-	-	-	-	-	-
180	-	-	-	-	-	-	-
190	-	-	-	-	-	-	-
200	-	-	-	-	-	-	-
210	-	-	-	-	-	-	-
220	-	-	-	-	-	-	-
230	-	-	-	-	-	-	-
240	-	-	-	-	-	-	-
250	-	-	-	-	-	-	-
260	-	-	-	-	-	-	-
270	-	-	-	-	-	-	-
280	-	-	-	-	-	-	-
290	-	-	-	-	-	-	-
300	-	-	-	-	-	-	-
310	34.238	8.075	2.135	0.400	0.015	-	-
320	16.110	8.457	1.184	0.381	0.218	0.044	-
330	7.306	0.725	0.581	0.340	0.093	0.011	0.004
340	0.896	0.411	0.200	0.067	0.059	-	-
350	0.518	0.292	0.163	0.081	0.007	-	-

Tabella 5.2

Energia media annua del moto ondoso espressa in MW per classi di altezza d'onda e direzione di provenienza del moto ondoso in corrispondenza del contorno lato mare del dominio di calcolo posto a una profondità di 20 m (Sono evidenziate con colore uguali i valori utilizzati per determinare le classi energeticamente equivalenti).

Dir [°N]	Hs [m]					
	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	2.5-3.0	3.0-3.5
0	360	146	154	115	-	-
10	74	40	-	-	-	-
20	56	80	62	-	-	-
30	196	120	-	-	-	-
40	-	-	-	-	-	-
50	-	-	-	-	-	-
60	-	-	-	-	-	-
70	-	-	-	-	-	-
80	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-
100	-	-	-	-	-	-
110	-	-	-	-	-	-
120	-	-	-	-	-	-
130	-	-	-	-	-	-
140	-	-	-	-	-	-
150	-	-	-	-	-	-
160	-	-	-	-	-	-
170	-	-	-	-	-	-
180	-	-	-	-	-	-
190	-	-	-	-	-	-
200	-	-	-	-	-	-
210	-	-	-	-	-	-
220	-	-	-	-	-	-
230	-	-	-	-	-	-
240	-	-	-	-	-	-
250	-	-	-	-	-	-
260	-	-	-	-	-	-
270	-	-	-	-	-	-
280	-	-	-	-	-	-
290	-	-	-	-	-	-
300	-	-	-	-	-	-
310	8089	7670	3327	231	-	-
320	8471	4254	3173	3401	1135	-
330	727	2087	2834	1441	284	142
340	411	718	554	922	-	-
350	293	585	678	115	-	-

Tabella 5.3

Caratteristiche del clima ondoso energeticamente equivalente sul contorno al largo del dominio di calcolo.

Hs	Tp	Dir	freq	E/Etot
[m]	[s]	[°N]	[%]	
0.90	4.0	23	0.4	1.2%
0.95	4.2	317	22.3	76.7%
1.06	4.4	347	1.6	7.4%
2.34	6.5	322	0.4	12.5%
2.25	6.4	343	0.1	2.2%

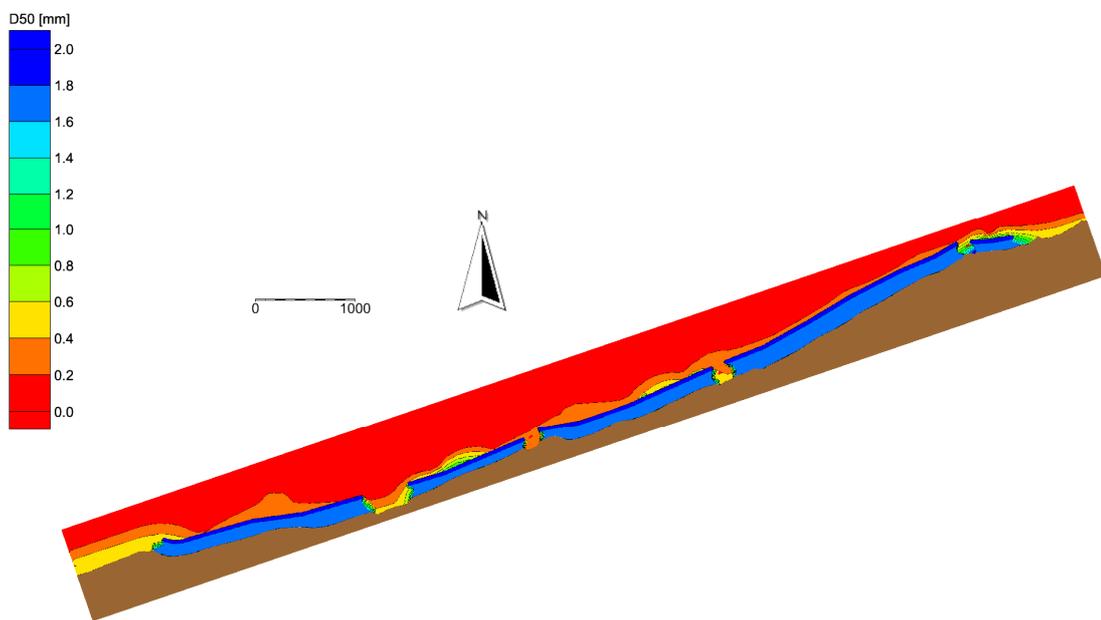


Figura 5.1 Distribuzioni dei sedimenti utilizzati per il calcolo della portata solida.

6 Analisi dei risultati

Al fine di determinare la distribuzione spaziale del trasporto solido medio annuo dopo la realizzazione delle opere in progetto si sono determinati il campo di velocità e di trasporto solido indotte dal moto ondoso per ognuna delle condizioni di clima ondose riportate in Tabella 5.3.

Utilizzando il modello di propagazione del moto ondoso CMS-Wave sono state determinate per ognuna delle celle del dominio in esame l'altezza d'onda, il periodo d'onda, la direzione di propagazione, la dissipazione dovuta al frangimento e il radiation stress. In particolare dalla Figura A.1 alla Figura A.5 sono riportate le distribuzioni delle altezze d'onda nel dominio in studio, in cui si osserva, per i casi caratterizzati da onde con altezza d'onda maggiore, l'importante dissipazione di energia dovuta alla presenza delle barriere.

Sulla base delle condizioni di moto ondoso così determinato, utilizzando il modello CMS-Flow sono state determinate le velocità delle correnti indotte dal moto ondoso nel dominio in esame (vedere dalla Figura B.1 alla Figura B.5) e quindi le componenti del trasporto solido totale (vedere Figura C.1 alla Figura C.5).

In particolare si rileva come, sebbene per ognuna delle condizioni considerate si determinano a tergo delle barriere delle correnti modeste con direzioni dipendenti dall'angolo di attacco del moto ondoso, in ognuno dei citati casi si rileva sempre un forte flusso diretto verso il largo che ha origine in corrispondenza delle interruzioni della barriera poste in prossimità delle foci dei corsi d'acqua.

Per quanto concerne il trasporto solido, le simulazioni condotte hanno evidenziato l'importante effetto di attenuazione del trasporto solido longitudinale nei tratti di costa protetti, indotto sia dalla presenza della barriera soffolta sia dei sedimenti del ripascimento di diametro medio (1.7 mm) maggiore di quello nativo, rispetto alle aree esterne alle barriere. Al contempo le simulazioni condotte evidenziano come in corrispondenza delle interruzioni della barriera soffolta dovute alla presenza delle foci dei corsi d'acqua si localizzino i maggiori valori di trasporto solido.

Infine effettuando l'integrale su base annua delle portate solide così determinate pesate in relazione alla frequenza di accadimento del moto ondoso che le ha generate, è stata valutata la distribuzione della portata solida media annuale (vedere dalla Figura 6.1 alla Figura 6.4). I risultati ottenuti mostrano che a tergo delle barriere si osserva una deriva media dei sedimenti di modesta entità e diretta in direzione Nord-Est e che in corrispondenza delle interruzioni delle barriere localizzati in corrispondenza delle foci dei corsi d'acqua si rilevano valori di portata solida dirette verso il largo.

In particolare, la Tabella 6.1 riporta la stima delle portate solide medie annue che attraversano le interruzioni e la sezione terminale della barriera lato Est (vedere Figura 6.5) asportando sedimenti dall'area del ripascimento protetto unitamente alla stima degli apporti solidi degli stessi torrenti, come ricavati nello studio della dinamica costiera. In particolare, si rileva che:

- attraverso il varco della barriera soffolta localizzato in corrispondenza della foce del torrente Saponara e la sezione terminale della barriera la portata solida media annua che fuoriesce dall'area del ripascimento è sicuramente inferiore agli apporti del torrente Saponara;
- attraverso i varchi localizzati in corrispondenza del torrente Cocuzzaro e del torrente Pietra la portata solida media annua che

fuoriesce dall'area del ripascimento è dello stesso ordine di grandezza, seppur inferiore, degli apporti solidi dai bacini degli stessi torrenti;

- attraverso il varco localizzato in corrispondenza delle foci dei torrenti Caracciolo e Senia si riscontra una portata solida media annua in uscita dall'area delimitata dalla barriera soffolte certamente più elevata dei volumi solidi apportati dai bacini dei citati torrenti.

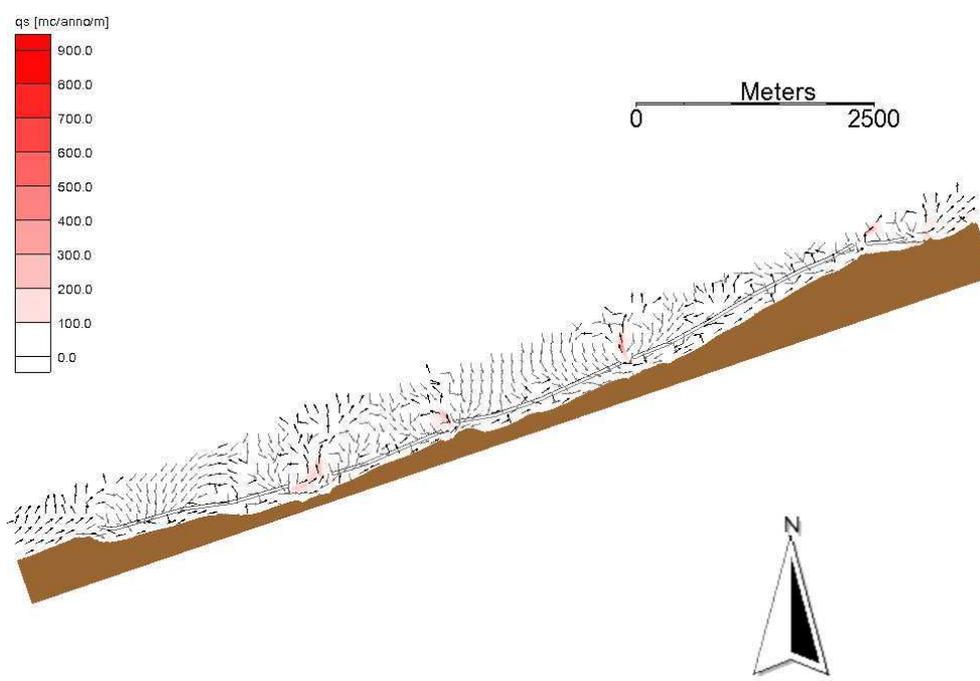


Figura 6.1 Distribuzione della portata solida media annua nel dominio di calcolo.

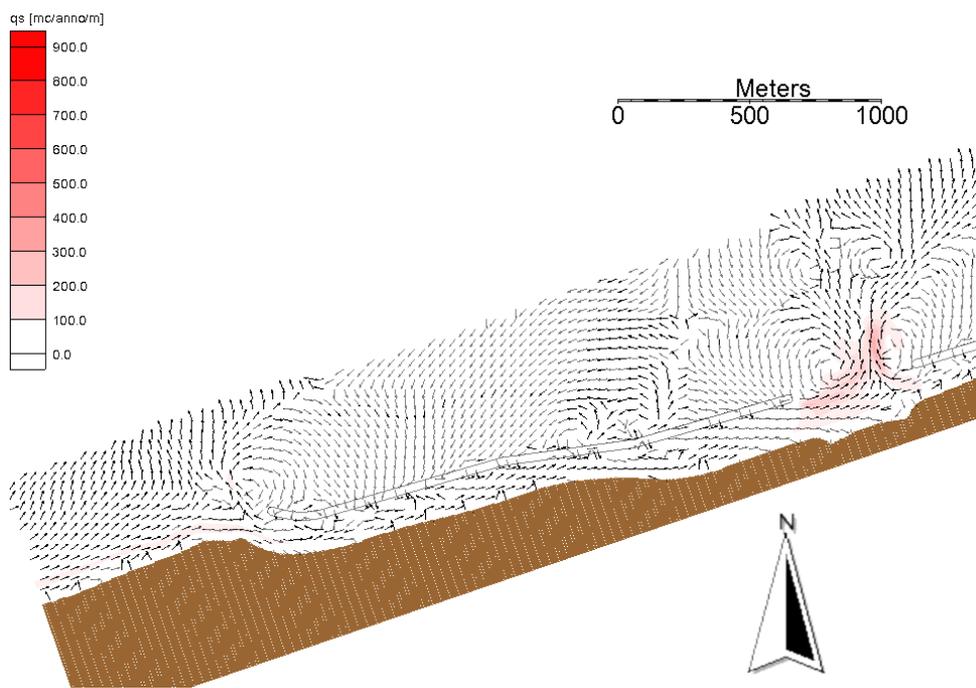


Figura 6.2 Distribuzione della portata solida media annua nel dominio di calcolo – Dettaglio tratto Ovest.

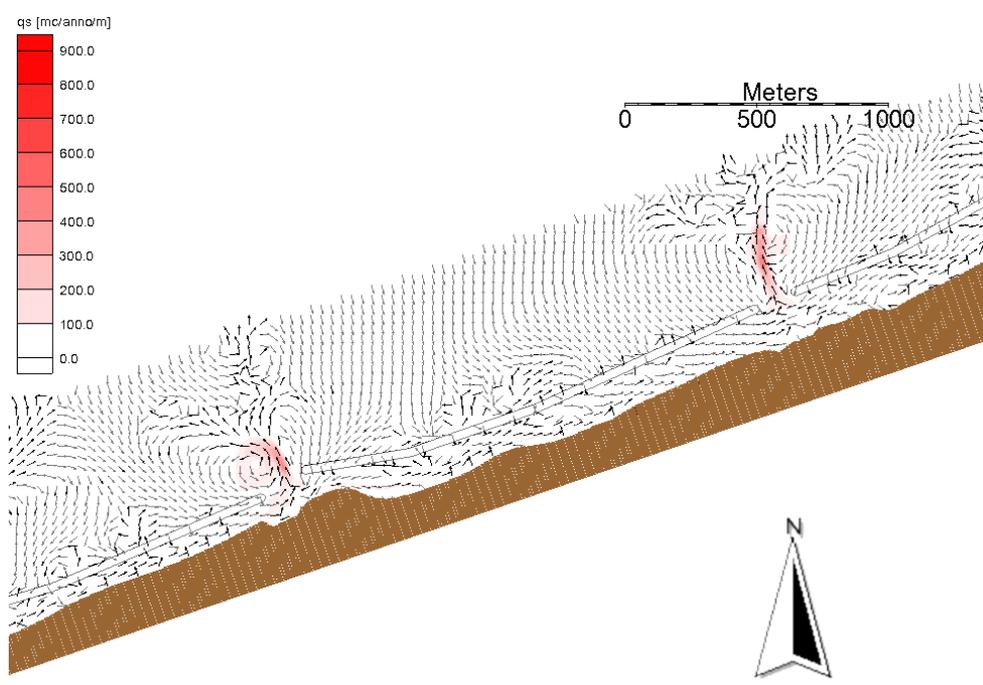


Figura 6.3 Distribuzione della portata solida media annua nel dominio di calcolo – Dettaglio tratto centrale

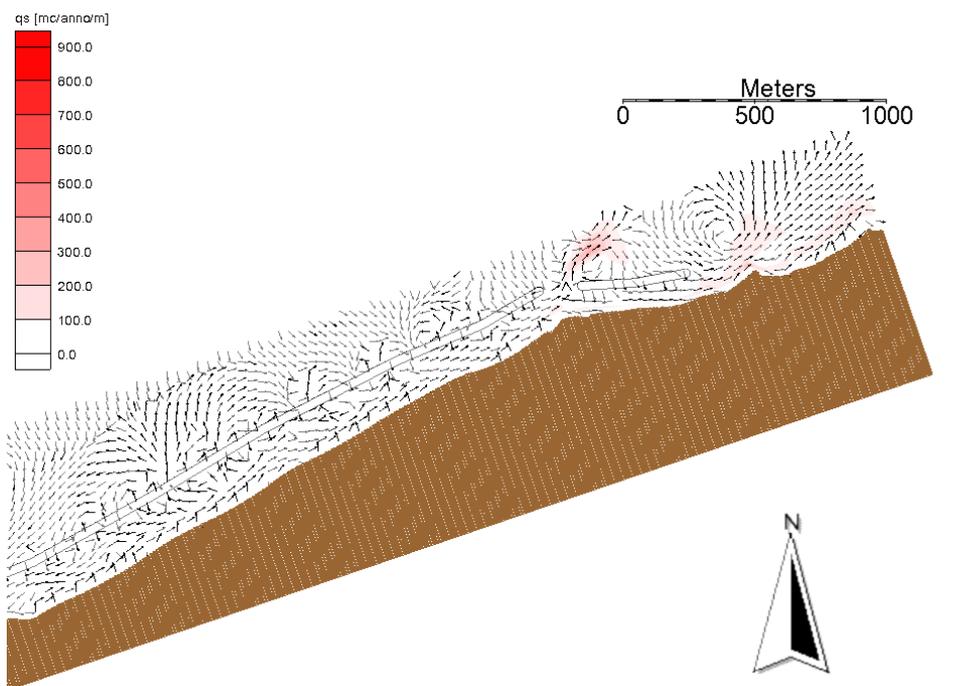


Figura 6.4 Distribuzione della portata solida media annua nel dominio di calcolo – Dettaglio tratto Est

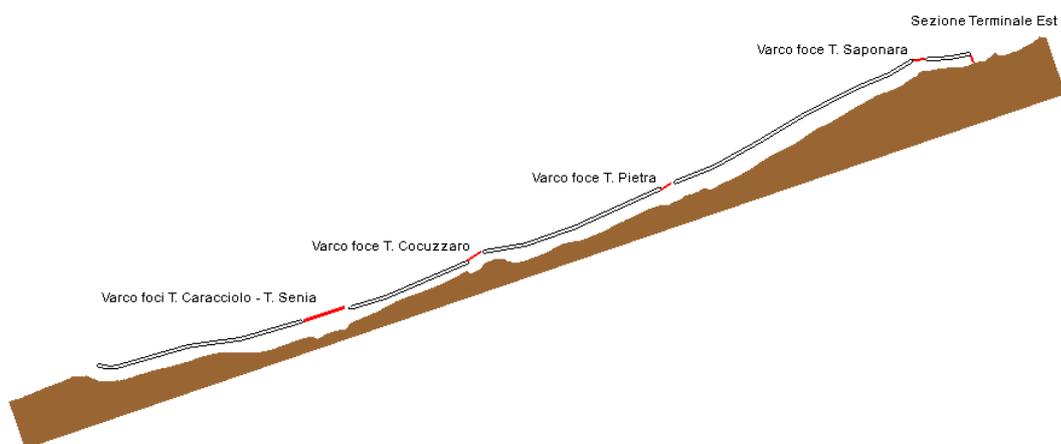


Figura 6.5 Localizzazione delle interruzioni della barriera soffolta in corrispondenza delle foci dei principali torrenti affluenti al litorale.

Tabella 6.1 Stima delle portate solide medie annue in uscita dall'area delimitata dalle barriere soffolte attraverso le interruzioni della barriera e attraverso la sezione finale a Est.

Varco	Portata solida in uscita [m ³ /anno]	Apporti solidi da bacino [m ³ /anno]
T. Caracciolo - T. Senia	10018	965
T. Cocuzzaro	2691	1296
T. Pietra	2031	1031
T. Saponara	967	5820
Finale	1493	

7 Sintesi dei risultati e conclusioni

Il presente studio ha avuto per oggetto la determinazione del trasporto solido litoraneo nel tratto di costa compreso tra la foce del Torrente Niceto e la foce del Torrente Calvaruso a seguito della realizzazione delle ripascimento protetto in progetto.

Sulla base del clima ondoso medio sottocosta alla profondità di 20 m determinato nell'elaborato 1, si sono valutate cinque condizioni di moto ondoso al contorno energeticamente equivalenti all'intera distribuzione del moto ondoso medio annuale. In particolare, si è rilevato come la maggiore porzione dell'energia del moto ondoso, pari a oltre il 70% del totale, è associata alla classe di moto ondoso proveniente da una direzione compresa tra 310 e 330°N e con altezza d'onda compresa tra 0.5 m e 2 m.

Utilizzando tali condizioni di clima ondoso su una batimetrica di circa 20 m si sono determinate, per mezzo del modello CMS-Wave, le condizioni del moto ondoso utili per la determinazione delle correnti indotte dal moto ondoso e del relativo trasporto solido (altezza d'onda, periodo d'onda, direzione di propagazione, dissipazione dovuta al frangimento e radiation stress).

Sulla base delle condizioni di moto ondoso così determinato, utilizzando il modello CMS-Flow sono state determinate le velocità delle correnti indotte dal moto ondoso nel dominio in esame e quindi le componenti del trasporto solido totale.

In particolare si è rilevato come, sebbene per ognuna delle condizioni considerate si determinano a tergo delle barriere delle correnti modeste con direzioni dipendenti dall'angolo di attacco del moto ondoso, in ognuno dei citati casi si rileva sempre un forte flusso diretto verso il largo che ha origine in corrispondenza delle

interruzioni della barriera poste in prossimità delle foci dei corsi d'acqua.

Per quanto concerne il trasporto solido, le simulazioni condotte hanno evidenziato l'importante effetto di attenuazione del trasporto solido longitudinale nei tratti di costa protetti, indotto sia dalla presenza della barriera soffolta sia dei sedimenti del ripascimento di diametro medio (1.7 mm) maggiore di quello nativo, rispetto alle aree esterne alle barriere. Al contempo le simulazioni condotte evidenziano come in corrispondenza delle interruzioni della barriera soffolta dovute alla presenza delle foci dei corsi d'acqua si localizzino i maggiori valori di trasporto solido.

Infine, effettuando l'integrale su base annua delle portate solide così determinate pesate in relazione alla frequenza di accadimento del moto ondoso che le ha generate, è stata valutata la distribuzione della portata solida media annuale. I risultati ottenuti mostrano che a tergo delle barriere si osserva una deriva media dei sedimenti di modesta entità e diretta in direzione Nord-Est e che in corrispondenza delle interruzioni delle barriere localizzati in corrispondenza delle foci dei corsi d'acqua si rilevano valori di portata solida dirette verso il largo. Al fine di valutare l'entità di futuri interventi manutentivi dell'arenile in studio, sulla base di tali risultati è stata effettuata una stima delle portate solide medie annue che attraversano le interruzioni e la sezione terminale della barriera lato Est asportando sedimenti dall'area del ripascimento protetto. Tale valutazione ha evidenziato che:

- attraverso il varco della barriera soffolta localizzato in corrispondenza della foce del torrente Saponara e la sezione terminale della barriera la portata solida media annua che fuoriesce dall'area del ripascimento è sicuramente inferiore agli apporti del torrente Saponara;

- attraverso i varchi localizzati in corrispondenza del torrente Cocuzzaro e del torrente Pietra la portata solida media annua che fuoriesce dall'area del ripascimento è dello stesso ordine di grandezza, seppur inferiore, degli apporti solidi dai bacini degli stessi torrenti;
- attraverso il varco localizzato in corrispondenza delle foci dei torrenti Caracciolo e Senia si riscontra una portata solida media annua in uscita dall'area delimitata dalla barriera soffolte certamente più elevata dei volumi solidi apportati dai bacini dei citati torrenti, con una perdita di volumi dell'ordine di circa 9.000 m³/anno.

A fine di ridurre le perdite di sedimenti verso il largo attraverso il varco della scogliera soffolta posta in corrispondenza delle foci dei torrenti Cucuzzaro e Senia potrebbe risultare opportuno mantenere la scogliera in massi artificiali (tetrapodi) oggi presente tra le foci dei due citati torrenti.

Bibliografia

- Battjes, J. A. 1972. Set-up due to irregular waves. Proceedings 13th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, 1993-2004.
- Battjes, J. (1975). Modeling of turbulence in the surf zone. *Proceedings Symposium on Modeling Techniques, ASCE* .
- Battjes, J. A., and J. Janssen. 1978. Energy loss and set-up due to breaking of random waves. Proceedings 16th International Conference Coastal Engineering, ASCE, 569-587.
- Camenen, B. e Larson, M. (2005). A bedload sediment transport formula for the nearshore. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 63 , 249-260.
- Camenen, B. e Larson, M. (2006). A suspended load sediment transport formula for nearshore. *Journal of Coastal Research (in review)* .
- Camenen, B., and Larson, M. (2007). "A unified sediment transport formulation for coastal inlet applications", ERDC/CHL-TR-06-7, US Army Engineer Research and Development Center, Coastal and Hydraulics Laboratory, Vicksburg, MS.
- Charnock, H. (1995). Wind stress on a water surface. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 81 , 639-640.
- Chawla A., and J. T. Kirby. 2002. Monochromatic and random wave breaking at blocking points. *Journal of Geophysical Research* 107(C7), 10.1029/2001JC001042.
- Falconer, R. A. (1980). Modelling of planform influence on circulation in harbors. *Proceeding 17th Coastal Engineering Conference, ASCEE, 2,726-2,744*.
- Goda, Y. 1985. Random seas and design of maritime structures. Tokyo: University of Tokyo Press.

- Kraus, N. C., and Larson, M. (1991). "NMLONG: Numerical model for simulating the longshore current: Report 1: Model development and tests," Dredging Research Report DRP-91-1, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Lin, L., H. Mase, F. Yamada, and Z. Demirbilek. 2006b. Wave-action balance equation diffraction (WABED) model: Tests of wave diffraction and reflection at inlets. Coastal and Hydraulics Engineering Technical Note ERDC/CHL CHETN-III-73. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center.
- Macagno, E. O. 1953. Houle dans un can presentent un passage en charge. *La Houille Blanche* 9(1):10-37.
- Nishimura, H. (1988). Computation of nearshore current. In *In Nearshore dynamics and coastal processes*. K. Horikawa, University of Tokyo Press, Tokyo, Japan, 271-291.
- Sakai, S., N. Kobayashi, and K. Koike. 1989. Wave breaking criterion with opposing current on sloping bottom: an extension of Goda's breaker index. *Annual Journal of Coastal Engineering* 36:56-59, JSCE.
- Smith, J. M., Larson, M., and Kraus, N. C. (1993). "Longshore current on a barred beach: Field measurements and calculation," *Journal of Geophysical Research* 98(C12), 22,717-22,731.
- Watanabe, A. (1987). "3-dimensional numerical model of beach evolution," *Proceedings Coastal Sediments '87*, ASCE, 802-817.

Elenco delle Figure

- Figura 4.1 Griglia di calcolo avente l'asse lungo la direzione parallela alla linea di costa che forma un angolo di 19° con la direzione Est
- Figura 5.1 Distribuzioni dei sedimenti utilizzati per il calcolo della portata solida.
- Figura 6.1 Distribuzione della portata solida media annua nel dominio di calcolo.
- Figura 6.2 Distribuzione della portata solida media annua nel dominio di calcolo – Dettaglio tratto Ovest.
- Figura 6.3 Distribuzione della portata solida media annua nel dominio di calcolo – Dettaglio tratto centrale
- Figura 6.4 Distribuzione della portata solida media annua nel dominio di calcolo – Dettaglio tratto Est
- Figura 6.5 Localizzazione delle interruzioni della barriera soffolta in corrispondenza delle foci dei principali torrenti affluenti al litorale.
- Figura A.1 Distribuzione delle altezze d'onda nel dominio di calcolo. Caratteristiche del moto ondoso al contorno $H_s = 0.90$ m – $T_p = 4.0$ s – $Dir = 23^\circ N$ – $f = 0.4\%$ – $E/E_{tot} = 1.2\%$.
- Figura A.2 Distribuzione delle altezze d'onda nel dominio di calcolo. Caratteristiche del moto ondoso al contorno $H_s = 0.95$ m – $T_p = 4.2$ s – $Dir = 317^\circ N$ – $f = 22.3\%$ – $E/E_{tot} = 76.7\%$.
- Figura A.3 Distribuzione delle altezze d'onda nel dominio di calcolo. Caratteristiche del moto ondoso al contorno

- Hs= 1.06 m - Tp= 4.4 s - Dir= 347°N - f = 1.6% - E/Etot=7.4%.
- Figura A.4 Distribuzione delle altezze d'onda nel dominio di calcolo. Caratteristiche del moto ondoso al contorno Hs= 2.34 m - Tp= 6.5 s - Dir= 322°N - f = 0.4% - E/Etot=12.5%.
- Figura A.5 Distribuzione delle altezze d'onda nel dominio di calcolo. Caratteristiche del moto ondoso al contorno Hs= 2.25 m - Tp= 6.4 s - Dir= 343°N - f = 0.1% - E/Etot=2.2%.
- Figura B.1 Distribuzione delle correnti indotte dal moto ondoso. Caratteristiche del moto ondoso al contorno Hs= 0.90 m - Tp= 4.0 s - Dir= 23 °N - f = 0.4% - E/Etot=1.2%.
- Figura B.1 Distribuzione delle correnti indotte dal moto ondoso. Caratteristiche del moto ondoso al contorno Hs= 0.95 m - Tp= 4.2 s - Dir= 317°N - f = 22.3% - E/Etot=76.7%.
- Figura B.1 Distribuzione delle correnti indotte dal moto ondoso. Caratteristiche del moto ondoso al contorno Hs= 1.06 m - Tp= 4.4 s - Dir= 347°N - f = 1.6% - E/Etot=7.4%.
- Figura B.1 Distribuzione delle correnti indotte dal moto ondoso. Caratteristiche del moto ondoso al contorno Hs= 2.34 m - Tp= 6.5 s - Dir= 322°N - f = 0.4% - E/Etot=12.5%.
- Figura B.5 Distribuzione delle correnti indotte dal moto ondoso. Caratteristiche del moto ondoso al contorno Hs= 2.25 m - Tp= 6.4 s - Dir= 343°N - f = 0.1% - E/Etot=2.2%.

- Figura C.1 Distribuzione del trasporto solido indotto dal moto ondoso. Caratteristiche del moto ondoso al contorno $H_s = 0.90 \text{ m}$ - $T_p = 4.0 \text{ s}$ - $\text{Dir} = 23^\circ \text{N}$ - $f = 0.4\%$ - $E/E_{\text{tot}} = 1.2\%$.
- Figura C.2 Distribuzione del trasporto solido indotto dal moto ondoso. Caratteristiche del moto ondoso al contorno $H_s = 0.95 \text{ m}$ - $T_p = 4.2 \text{ s}$ - $\text{Dir} = 317^\circ \text{N}$ - $f = 22.3\%$ - $E/E_{\text{tot}} = 76.7\%$.
- Figura C.3 Distribuzione del trasporto solido indotto dal moto ondoso. Caratteristiche del moto ondoso al contorno $H_s = 1.06 \text{ m}$ - $T_p = 4.4 \text{ s}$ - $\text{Dir} = 347^\circ \text{N}$ - $f = 1.6\%$ - $E/E_{\text{tot}} = 7.4\%$.
- Figura C.4 Distribuzione del trasporto solido indotto dal moto ondoso. Caratteristiche del moto ondoso al contorno $H_s = 2.34 \text{ m}$ - $T_p = 6.5 \text{ s}$ - $\text{Dir} = 322^\circ \text{N}$ - $f = 0.4\%$ - $E/E_{\text{tot}} = 12.5\%$.
- Figura C.5 Distribuzione del trasporto solido indotto dal moto ondoso. Caratteristiche del moto ondoso al contorno $H_s = 2.25 \text{ m}$ - $T_p = 6.4 \text{ s}$ - $\text{Dir} = 343^\circ \text{N}$ - $f = 0.1\%$ - $E/E_{\text{tot}} = 2.2\%$.

Elenco delle Tabele

- Tabella 5.1 Frequenza di apparizione del moto ondoso in corrispondenza del contorno lato mare del dominio di calcolo posto a una profondità di 20 m.
- Tabella 5.2 Energia media annua del moto ondoso espressa in MW per classi di altezza d'onda e direzione di provenienza del moto ondoso in corrispondenza del contorno lato mare del dominio di calcolo posto a una profondità di 20 m (Sono evidenziate con colore uguali i valori utilizzati per determinare le classi energeticamente equivalenti).
- Tabella 5.3 Caratteristiche del clima ondoso energeticamente equivalente sul contorno al largo del dominio di calcolo.
- Tabella 6.1 Stima delle portate solide medie annue in uscita dall'area delimitata dalle barriere soffolte attraverso le interruzioni della barriera e attraverso la sezione finale a Est.

Appendice A

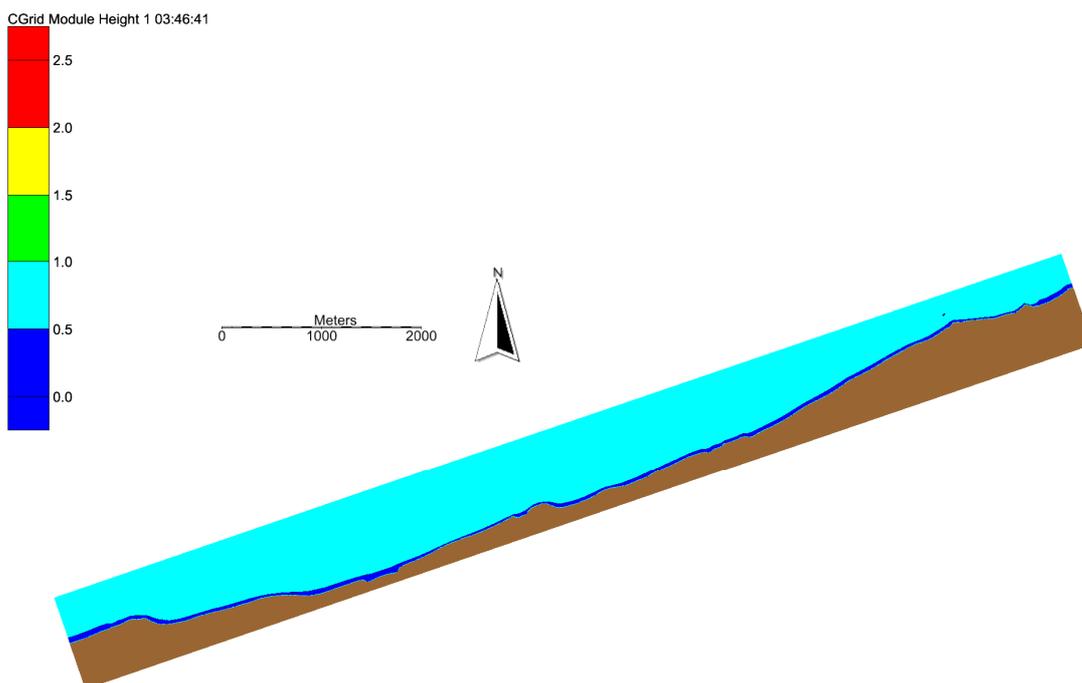


Figura A.1 Distribuzione delle altezze d'onda nel dominio di calcolo. Caratteristiche del moto ondoso al contorno $H_s = 0.90$ m - $T_p = 4.0$ s - $Dir = 23^\circ N$ - $f = 0.4\%$ - $E/E_{tot} = 1.2\%$.

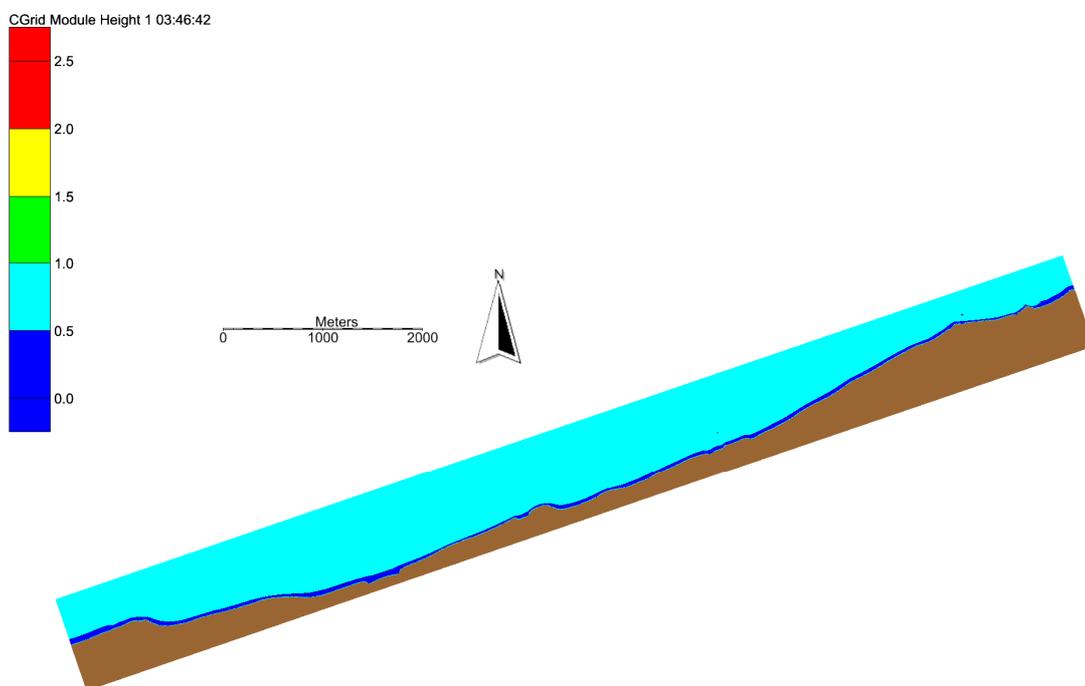


Figura A.2 Distribuzione delle altezze d'onda nel dominio di calcolo. Caratteristiche del moto ondoso al contorno $H_s = 0.95$ m - $T_p = 4.2$ s - $Dir = 317^\circ N$ - $f = 22.3\%$ - $E/E_{tot} = 76.7\%$.

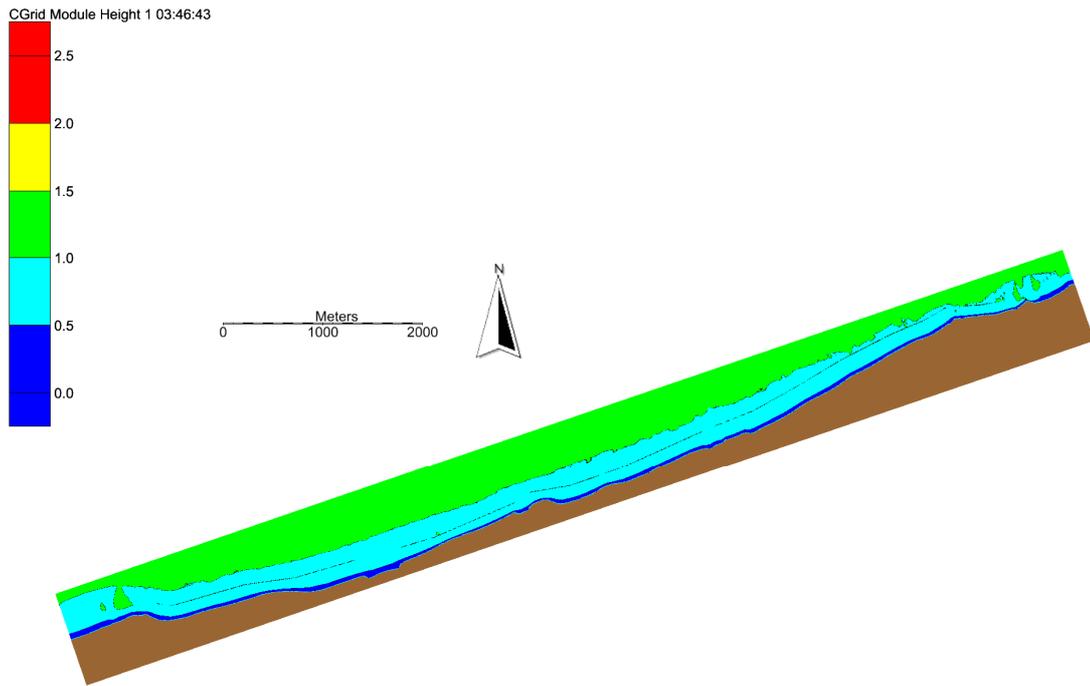


Figura A.3 Distribuzione delle altezze d'onda nel dominio di calcolo. Caratteristiche del moto ondoso al contorno $H_s = 1.06$ m - $T_p = 4.4$ s - $Dir = 347^\circ N$ - $f = 1.6\%$ - $E/E_{tot} = 7.4\%$.

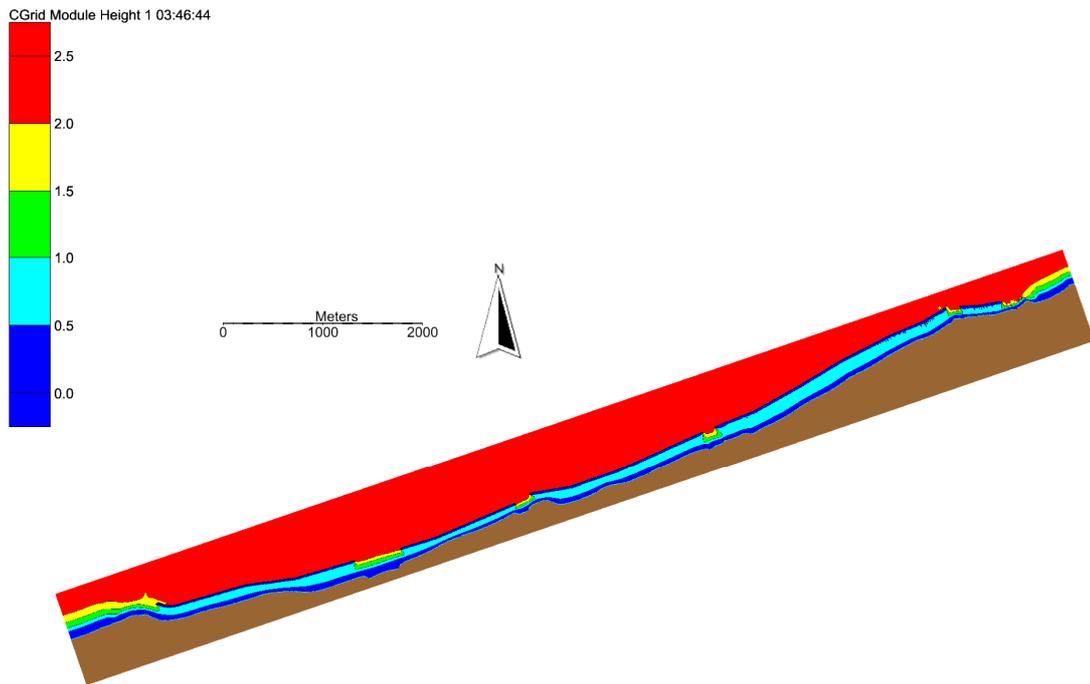


Figura A.4 Distribuzione delle altezze d'onda nel dominio di calcolo. Caratteristiche del moto ondoso al contorno $H_s = 2.34$ m - $T_p = 6.5$ s - $Dir = 322^\circ N$ - $f = 0.4\%$ - $E/E_{tot} = 12.5\%$.

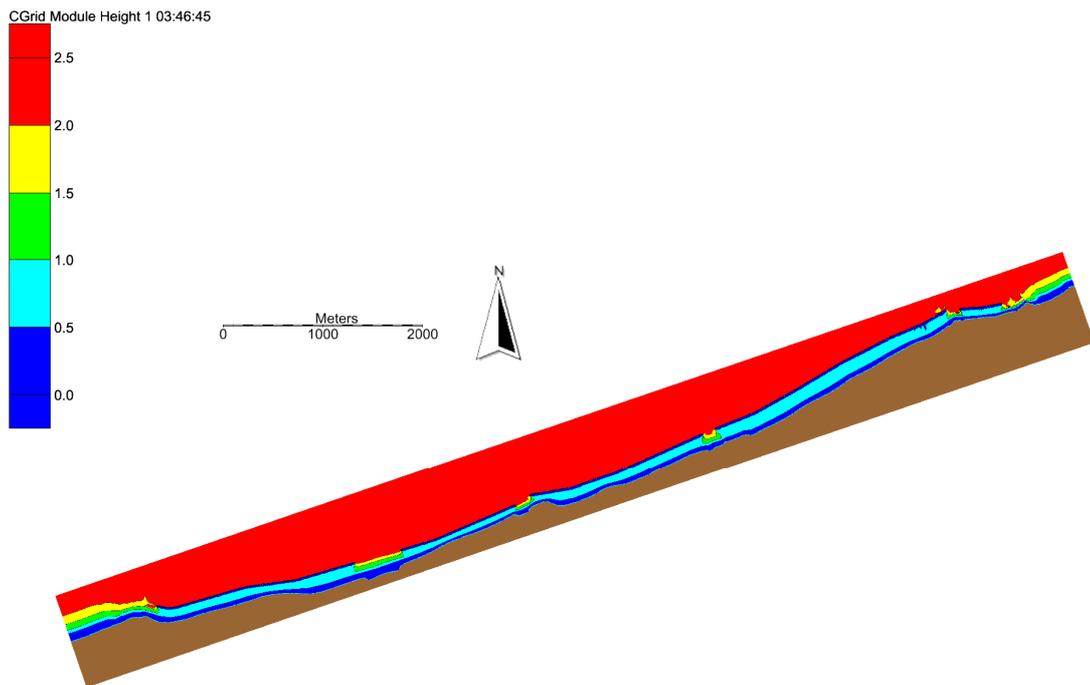


Figura A.5 Distribuzione delle altezze d'onda nel dominio di calcolo. Caratteristiche del moto ondoso al contorno $H_s = 2.25$ m - $T_p = 6.4$ s - $Dir = 343^\circ N$ - $f = 0.1\%$ - $E/E_{tot} = 2.2\%$.

Appendice B

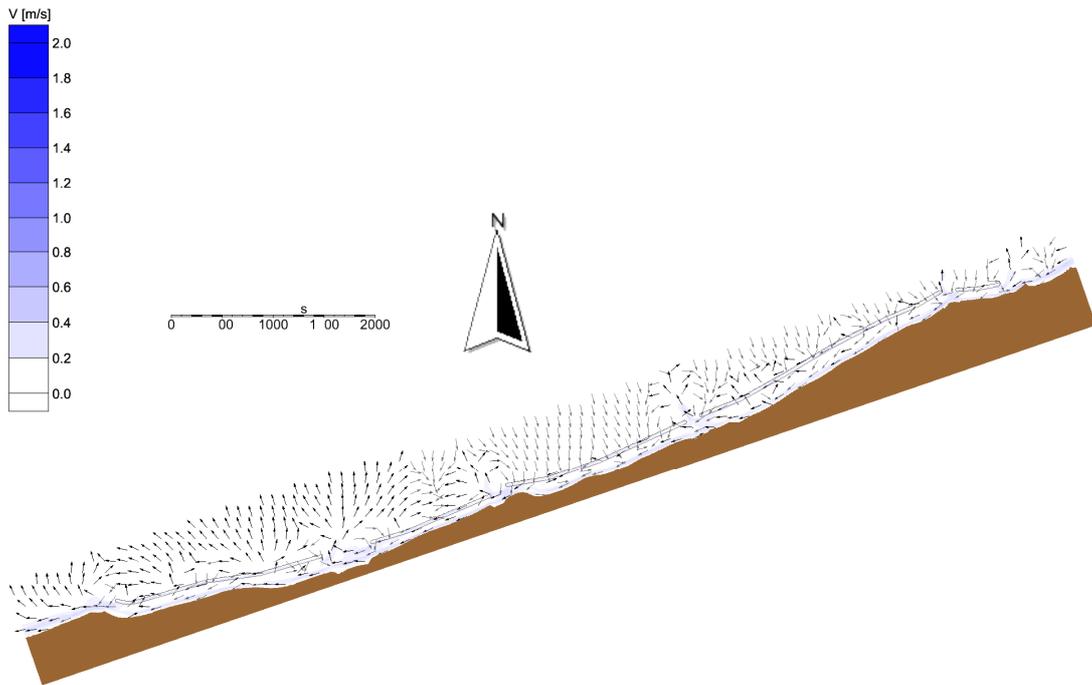


Figura B.1 Distribuzione delle correnti indotte dal moto ondoso. Caratteristiche del moto ondoso al contorno $H_s = 0.90$ m - $T_p = 4.0$ s - $Dir = 23^\circ N$ - $f = 0.4\%$ - $E/E_{tot} = 1.2\%$.

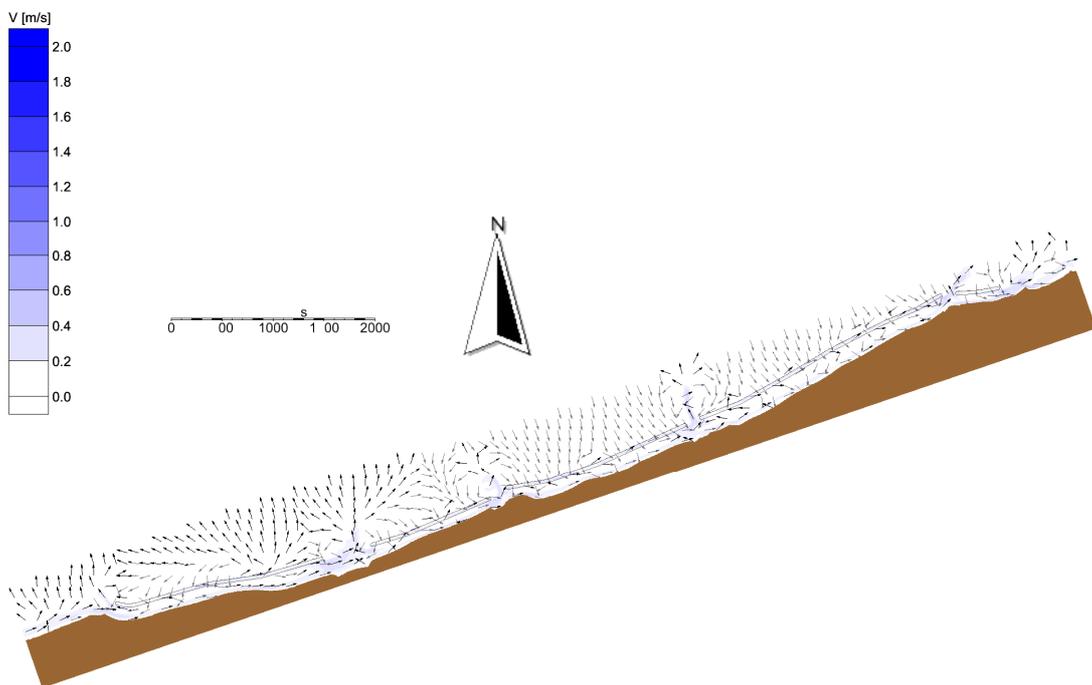


Figura B.2 Distribuzione delle correnti indotte dal moto ondoso. Caratteristiche del moto ondoso al contorno $H_s = 0.95$ m - $T_p = 4.2$ s - $Dir = 317^\circ N$ - $f = 22.3\%$ - $E/E_{tot} = 76.7\%$.

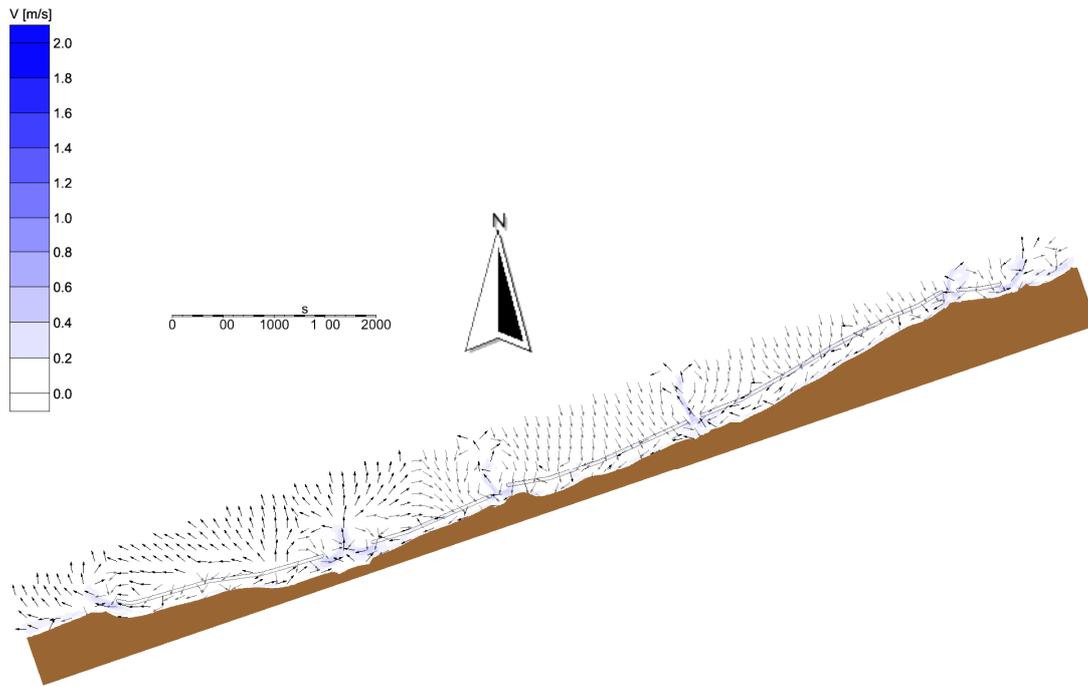


Figura B.3 Distribuzione delle correnti indotte dal moto ondoso. Caratteristiche del moto ondoso al contorno $H_s= 1.06$ m - $T_p= 4.4$ s - $Dir= 347^\circ N$ - $f = 1.6\%$ - $E/E_{tot}=7.4\%$.

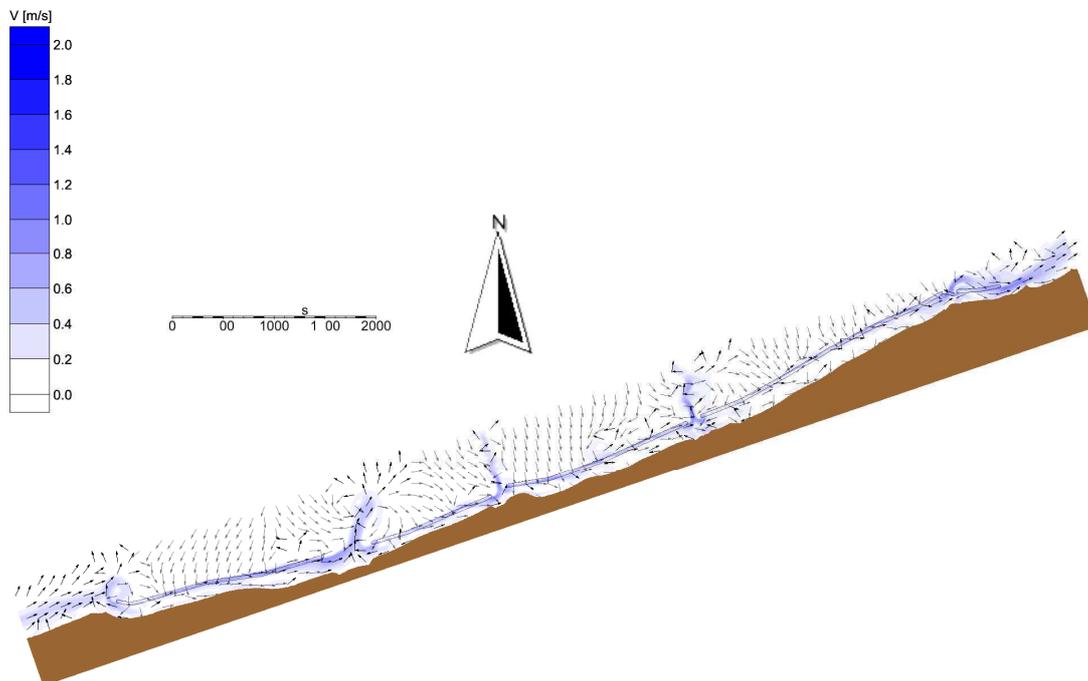


Figura B.4 Distribuzione delle correnti indotte dal moto ondoso. Caratteristiche del moto ondoso al contorno $H_s= 2.34$ m - $T_p= 6.5$ s - $Dir= 322^\circ N$ - $f = 0.4\%$ - $E/E_{tot}=12.5\%$.

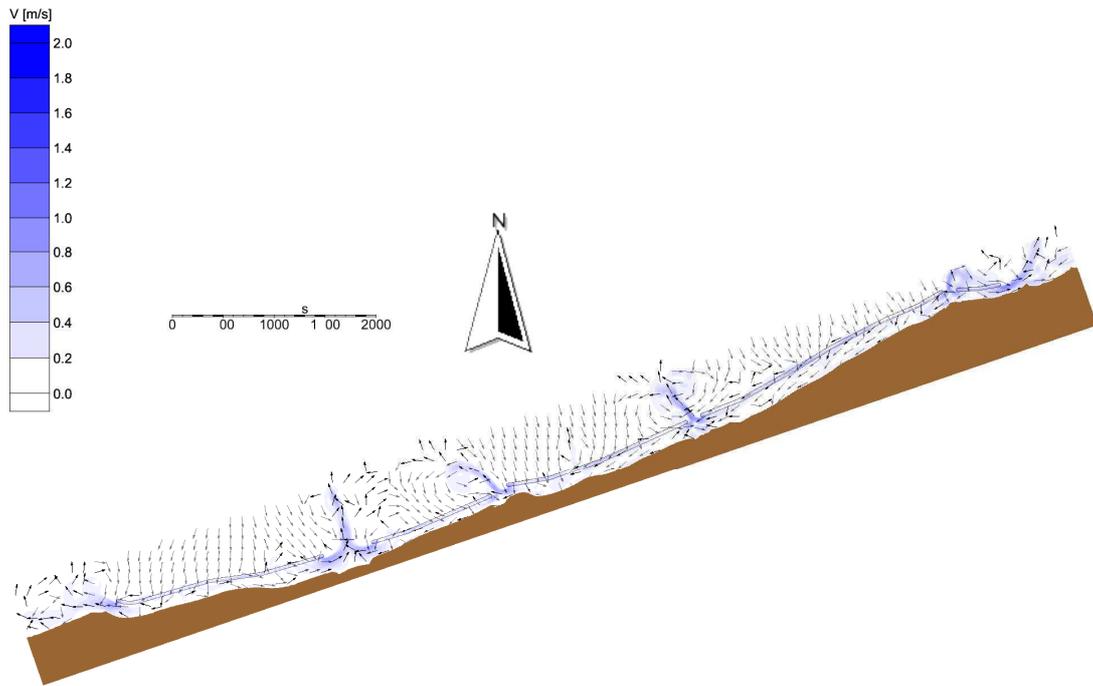


Figura B.5 Distribuzione delle correnti indotte dal moto ondoso. Caratteristiche del moto ondoso al contorno $H_s = 2.25$ m - $T_p = 6.4$ s - $Dir = 343^\circ N$ - $f = 0.1\%$ - $E/E_{tot} = 2.2\%$.

Appendice C

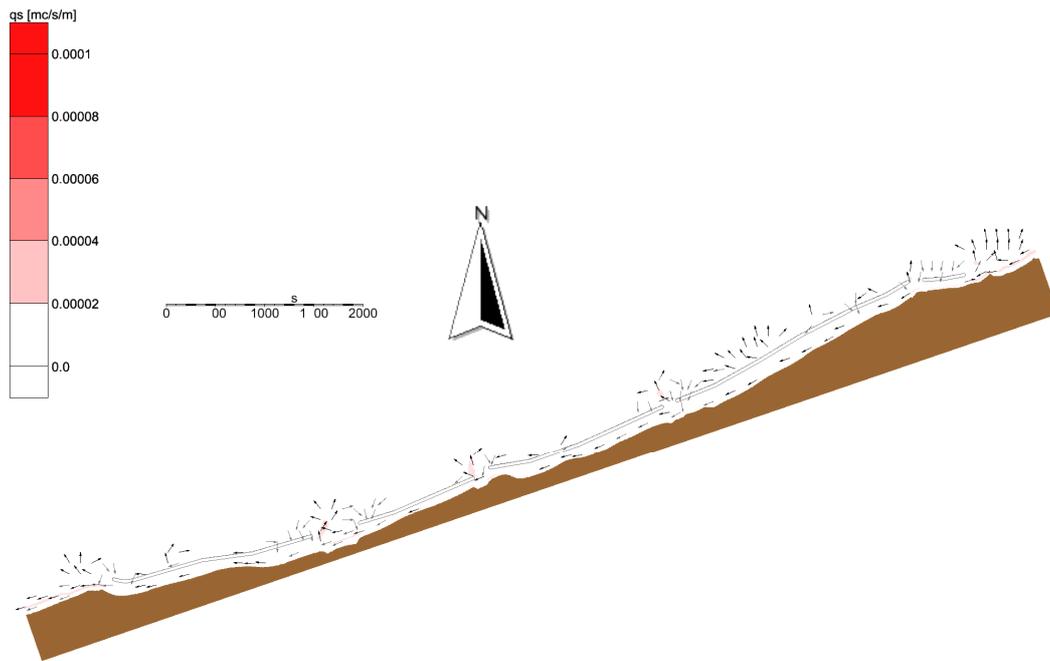


Figura C.1 Distribuzione del trasporto solido indotto dal moto ondoso. Caratteristiche del moto ondoso al contorno $H_s = 0.90 \text{ m}$ - $T_p = 4.0 \text{ s}$ - $\text{Dir} = 23^\circ \text{N}$ - $f = 0.4\%$ - $E/E_{\text{tot}} = 1.2\%$.

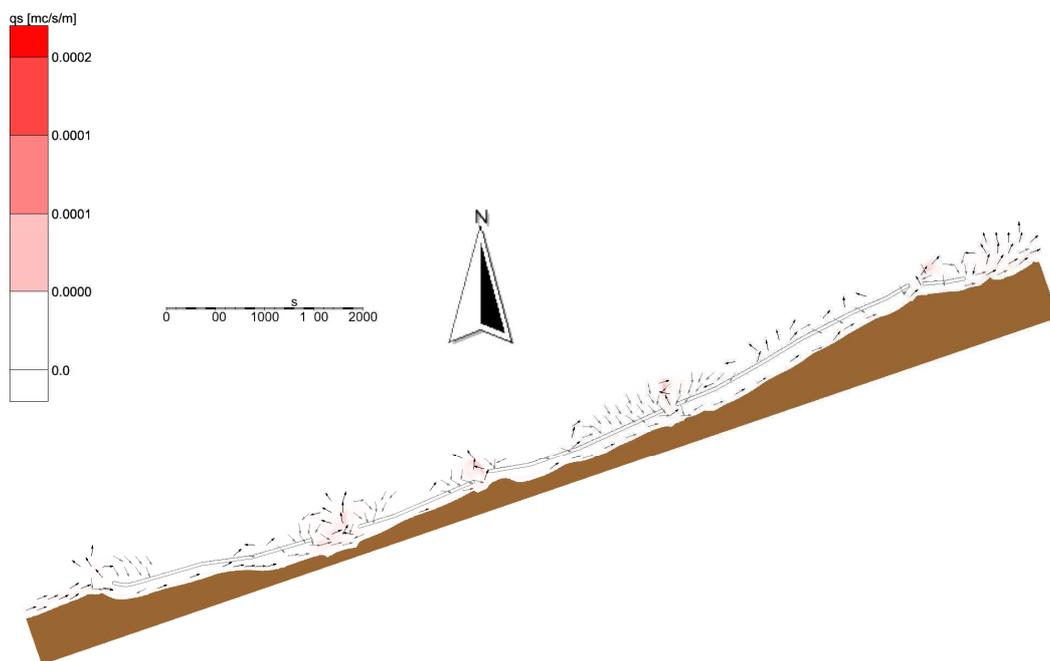


Figura C.2 Distribuzione del trasporto solido indotto dal moto ondoso. Caratteristiche del moto ondoso al contorno $H_s = 0.95 \text{ m}$ - $T_p = 4.2 \text{ s}$ - $\text{Dir} = 317^\circ \text{N}$ - $f = 22.3\%$ - $E/E_{\text{tot}} = 76.7\%$.

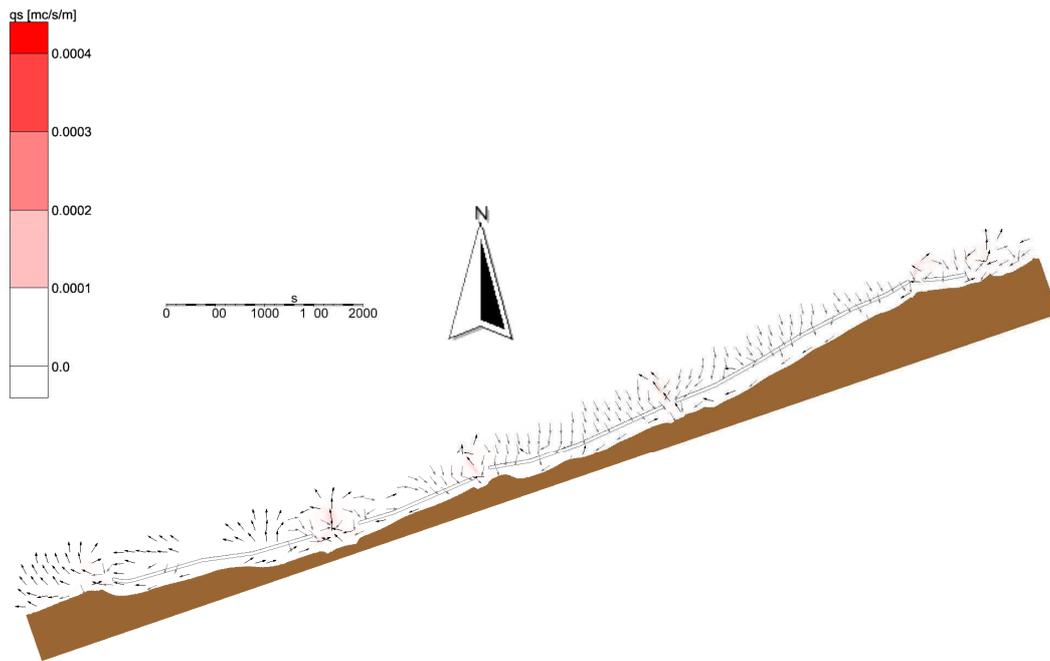


Figura C.3 Distribuzione del trasporto solido indotto dal moto ondoso. Caratteristiche del moto ondoso al contorno $H_s = 1.06$ m - $T_p = 4.4$ s - $Dir = 347^\circ N$ - $f = 1.6\%$ - $E/E_{tot} = 7.4\%$.

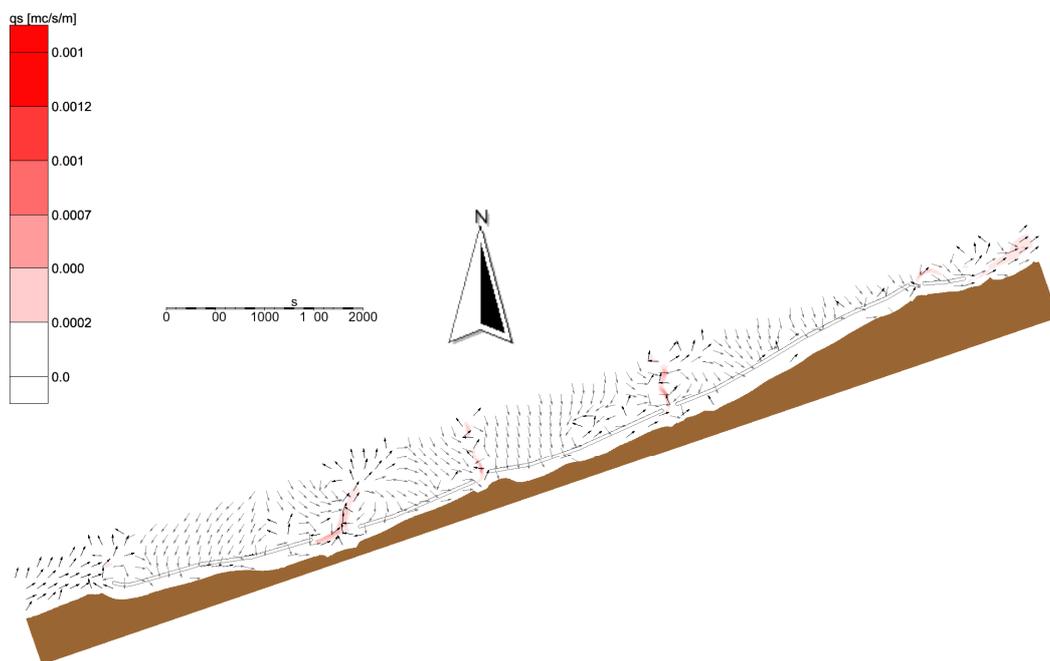


Figura C.4 Distribuzione del trasporto solido indotto dal moto ondoso. Caratteristiche del moto ondoso al contorno $H_s = 2.34$ m - $T_p = 6.5$ s - $Dir = 322^\circ N$ - $f = 0.4\%$ - $E/E_{tot} = 12.5\%$.

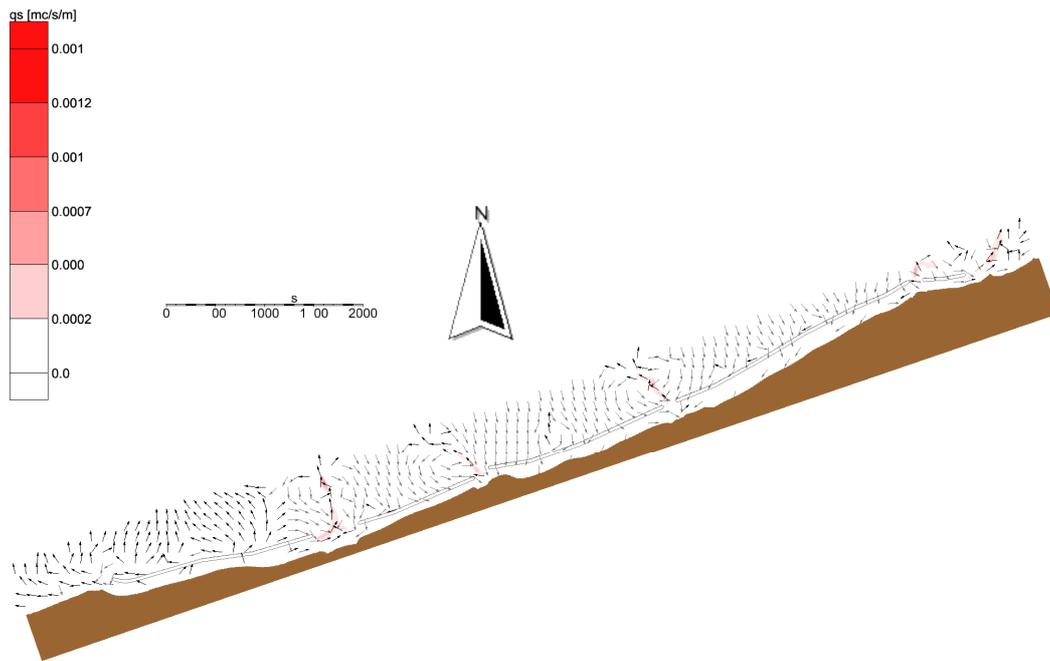


Figura C.5 Distribuzione del trasporto solido indotto dal moto ondoso. Caratteristiche del moto ondoso al contorno $H_s = 2.25$ m - $T_p = 6.4$ s - Dir = 343° N - $f = 0.1\%$ - $E/E_{tot} = 2.2\%$.