DICCA - Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale
Università di Genova

Indagine teorico/sperimentale sul comportamento della spiaggia di Vernazzola in relazione a eventi ondosi particolarmente severi

Relazione Finale

(Ottobre 2013)

Committente: Comune di Genova

Relatori:

Prof. Ing. Laura Landò Rebaudengo

Prof. Ing. Giovanni Besio

Rel. n. 17/2013

Sommario

1 Caratterizzazione del sito 6

2 Base dati di riferimento 7

3 Descrizione del problema 7
- 3.1 Situazione antecedente l'intervento del 2009 . . . 7
- 3.2 Intervento del 2009 . . . 9
- 3.3 Conseguenze dell'evento del Dicembre 2009 - Gennaio 2010 . . . 9
- 3.4 L'incarico del Comune di Genova. Finalità dello studio . . . 14
- 3.5 Ricostruzione della mareggiata di Dicembre 2009 - Gennaio 2010 . . . 14
- 3.6 Considerazioni idrodinamiche sulla configurazione planimetrica a seguito dell'intervento del 2009 . . . 16

4 Il modello in scala 21
- 4.1 Approccio teorico . . . 21
- 4.2 Progettazione del modello . . . 23
- 4.3 Realizzazione del modello . . . 26
- 4.4 Taratura della strumentazione e del battitore . . . 27

5 Prove sperimentali 29
- 5.1 Evoluzione del ripascimento a seguito della mareggiata di Dicembre 2009 - Gennaio 2010 . . . 29
  - 5.1.1 Situazione attuale e possibili interventi . . . 35
- 5.2 Intervento 1: asportazione del materiale del ripascimento . . . 36
- 5.3 Intervento 2: realizzazione di una scogliera soffolta continua tra le testate dei moli . . . 40
- 5.4 Intervento 3: realizzazione di una scogliera soffolta in corrispondenza della bocca tra i moli con varco centrale per l'accesso delle imbarcazioni . . . 44
- 5.5 Intervento 4: realizzazione di una scogliera soffolta nella parte di levante della bocca di accesso . . . 47

6 Considerazioni finali 51

Elenco delle figure

1 Vista aerea del paraggio di Vernazzola prima dell'esecuzione dei lavori (fonte: Google Maps). . . . 6

2 Documentazione fotografica allegata al Progetto Esecutivo (R02) . . . 8

3 Spiaggia di Vernazzola subito dopo la fine dei lavori di costruzione dei pennelli e della realizzazione del ripascimento. . . . 10

4 Rilievo batimetrico realizzato dalla ditta Drafinsub nel Febbraio del 2009 (Pre Lavori - BD01) . . . 11

5 Rilievo batimetrico realizzato dalla ditta Drafinsub nel Settembre del 2009 (Post Lavori - BD02) . . . 12

6 Rilievo batimetrico realizzato dalla ditta Drafinsub nel Maggio del 2010 (Post Evento Dicembre 2009-Gennaio 2010 (BD04) . . . 13

7 Danno verificatosi in seguito alla mareggiata del Dicembre 2009-Gennaio 2010 14

8 Differenza tra il rilievo del Maggio 2010 e quello del Settembre 2009 (valori positivi indicano deposito di sedimenti, mentre valori negativi indicano erosione). La linea nera e la linea verde indicano le rispettive linee di riva . . . 15

9 Confronto tra i dati misurati dalla boa di La Spezia (rosso) e i risultati del modello numerico WRF+WWIII (blu) per l'evento di mareggiata del Dicembre 2009 - Gennaio 2010. 16
10 Ricostruzione della mareggiata del Dicembre 2009 - Gennaio 2010 al largo della spiaggia di Vernazzola. 17
11 Configurazione della spiaggia emersa e risalita della lama d'acqua il 17 Dicembre 2011 20
12 Profilo della spiaggia in occasione del sopralluogo del 2 Febbraio 2013 20
13 Curve granulometrica dei sedimenti (a) utilizzati per il ripascimento della spiaggia di Vernazzola, (b) utilizzati per la costruzione del modello in scala . 24
14 Costruzione del modello in scala della baia di Vernazzola. Realizzazione seste in forex e loro lievllamente con argilla espansa e magrone di cemento 26
15 Costruzione del modello in scala della baia di Vernazzola. Completamento della batimetria, costruzione dei moli con massi di diversa pezzatura e realizzazione della spiaggia 27
16 Esempio di regressione lineare utilizzata per la taratura delle sonde di livello resistive impiegate negli esperimenti. Sonda 01 28
17 Esempio di curva di taratura del battitore per un periodo pari a 1.1s 28
18 Regressione aggregata per il valore del coefficiente lineare in funzione del periodo d'onda per la taratura del battitore 29
19 Mareggiata del Dicembre 2009 - Gennaio 2010 riprodotta in scala 30
20 Riproduzione mareggiata Gennaio 2010 - Sinistra: Condizione iniziale del ripascimento della spiaggia di Vernazzola su modello fisico; Destra: propagazione dello stato di mare SM 01 all'interno della spiaggia di Vernazzola 31
21 Riproduzione mareggiata Gennaio 2010 - Sinistra: configurazione plano-altimetrica al termine dell'azione dello stato di mare SM 01; Destra: propagazione dello stato di mare SM 02 all'interno della spiaggia di Vernazzola 31
22 Riproduzione mareggiata Gennaio 2010 - Sinistra: propagazione dello stato di mare SM 03 all'interno della spiaggia di Vernazzola; Destra: configurazione plano-altimetrica al termine dello stato di mare SM 03 32
23 Riproduzione mareggiata Gennaio 2010 - Sinistra: propagazione stato di mare SM 04 all'interno della spiaggia di Vernazzola; Destra: configurazione plano-altimetrica a fine prova 32
24 Rilievo Laser Scan: erosione/accrescimento in seguito alla mareggiata del Dicembre 2009 - Gennaio 2010 33
25 Riproduzione mareggiata Gennaio 2010 - Evoluzione morfodinamica della spiaggia di Vernazzola in corrispondenza di tre transetti (Sopra: Ponente; Centro: Centro baia; Sotto: Levante) 34
26 Intervento 1 - Rimozione parziale del materiale sabbioso. Sinistra: configurazione iniziale; Destra: propagazione dello stato di mare SM 01 all'interno della spiaggia di Vernazzola 36
27 Intervento 1 - Rimozione parziale del materiale di ripascimento. Sinistra: propagazione dello stato di mare SM 02 all'interno della spiaggia di Vernazzola; Destra: configurazione plano altimetrica al termine dell'azione dello stato di mare SM 02 36
28 Intervento 1 - Rimozione parziale del materiale di ripascimento. Propagazione dello stato di mare SM 03 all'interno della spiaggia di Vernazzola 37
29 Rilievo Laser Scan: erosione/accrescimento in seguito alla realizzazione dell'intervento 1 38

30 Intervento 1 - Evoluzione morfodinamica della spiaggia di Vernazzola in corrispondenza di tre transetti (Sopra: Ponente; Centro: Centro baia; Sotto: Levante) . . . 39
31 Intervento 2 - Realizzazione di una barriera soffolta continua tra le testate dei moli. Sinistra: configurazione iniziale: Destra: propagazione dello stato di mare SM 01 all'interno della spiaggia di Vernazzola . . . 40
32 Intervento 2 - Realizzazione di una barriera soffolta continua tra le testate dei moli. Propagazione dello stato di mare SM 02 all'interno della spiaggia di Vernazzola . . . 40
33 Intervento 2 - Realizzazione di una barriera soffolta continua tra le testate dei moli. Propagazione dello stato di mare SM 03 all'interno della spiaggia di Vernazzola . . . 41
34 Rilievo Laser Scan: erosione/accrescimento in seguito alla realizzazione dell'intervento 2 . . . 42
35 Intervento 2 - Evoluzione morfodinamica della spiaggia di Vernazzola in corrispondenza di tre transetti (Sopra: Ponente; Centro: Centro baia; Sotto: Levante) . . . 43
36 Intervento 3 - Realizzazione di una barriera soffolta con varco centrale tra le testate dei moli. Propagazione dello stato di mare SM 02 all'interno della spiaggia di Vernazzola . . . 44
37 Intervento 3 - Realizzazione di una barriera soffolta con varco centrale tra le testate dei moli. Propagazione dello stato di mare SM 03 all'interno della spiaggia di Vernazzola . . . 44
38 Rilievo Laser Scan: erosione/accrescimento in seguito alla realizzazione dell'intervento 3 . . . 45
39 Intervento 3 - Evoluzione morfodinamica della spiaggia di Vernazzola in corrispondenza di tre transetti (Sopra: Ponente; Centro: Centro baia; Sotto: Levante) . . . 46
40 Intervento 4 - Realizzazione di una barriera soffolta nella parte di levante della di accesso. Configurazione iniziale . . . 47
41 Intervento 4 - Realizzazione di una barriera soffolta nella parte di levante della di accesso. Propagazione dello stato di mare SM 02 all'interno della spiaggia di Vernazzola e configurazione della spiaggia alla fine dello stato di mare 02 . 47
42 Intervento 4 - Realizzazione di una barriera soffolta nella parte di levante della di accesso. Propagazione dello stato di mare SM 03 all'interno della spiaggia di Vernazzola e configurazione della spiaggia alla fine dello stato di mare 03 . 48
43 Rilievo Laser Scan: erosione/accrescimento in seguito alla realizzazione dell'intervento 4 . . . 49
44 Intervento 4 - Evoluzione morfodinamica della spiaggia di Vernazzola in corrispondenza di tre transetti (Sopra: Ponente; Centro: Centro baia; Sotto: Levante) . . . 50
45 Rilievo Laser Scan: differenza tra lo stato finale ottenuto nella sperimentazione con le diverse soluzioni progettuali e lo stato finale conseguente alla simulazione della mareggiata del Dicembre 2009 (in alto a sinistra: Intervento 1; in alto a destra Intervento 2; in basso a sinistra: Intervento 3; in basso a destra Intervento 4) . . . 51
46 Rilievo Laser Scan: erosione/accrescimento in seguito alla mareggiata del Dicembre 2009 - Gennaio 2010 (sinistra) e alla realizzazione dell'intervento 4 (destra). . . . 52

Elenco delle tabelle

1 Grandezze caratteristiche per la progettazione del trasporto di sedimenti al fondo 24

2 Verifica della movimentazione dei sedimenti sul modello fisico in scala. $d_{50}^{m} = 0.2$ mm; *Turb* indica il verificarsi di un regime turbolento (V, vero, F, falso); *Regime* indica il tipo di regime secondo la classificazione proposta da Gentile et al. (2000); θ_{inmv} rappresenta la tensione per l'incipiente movimento del singolo grano mentre θ_{mvas} la tensione per l'inizio del movimento d'assieme. I valori corrispondenti di tensione critica sono $\theta^{cr} = 0.04244$, $\theta_{inmv}^{cr} = 0.04637$ e $\theta_{mvas}^{cr} = 0.09206$ 25

3 Riproduzione in scala dei massi della mantellata dei moli della baia di Vernazzola. Tutti i pesi calcolati sono in grammi 26

4 Caratteristiche della mareggiata scalata su modello fisico. H_s altezza significativa, T_p periodi di picco, D_{SM} persistenza dello stato di mare 30

Premessa

Il Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni dell'Ambiente e del Territorio dell'Università di Genova (DICAT, attualmente confluito nel Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e dell'Ambiente, DICCA) ha stipulato in data 22 Febbraio 2012 una convenzione di collaborazione scientifica con il Comune di Genova dal titolo *"Indagine teorico/sperimentale sul comportamento della spiaggia di Vernazzola in relazione a eventi ondosi particolarmente severi e alla conseguente risalita del getto d'acqua sulla spiaggia emersa"*. Nell'ambito di tale convenzione, la presente relazione, che costituisce il rapporto finale delle attività svolte, illustra l'approccio metodologico e i risultati ottenuti.

La convenzione di collaborazione scientifica ha lo scopo di indagare sugli effetti del moto ondoso sulla attuale spiaggia di Vernazzola, con particolare riguardo a eventi severi che portano a una importante risalita del getto d'acqua sulla spiaggia emersa con rischio di danni alle strutture retrostanti, come avvenuto nel Gennaio 2010. In particolare devono essere messi in relazione gli eventi accaduti con la situazione allora esistente, conseguente a un intervento di manutenzione straordinaria completato nel 2009, evidenziando la situazione attuale e indicando gli scenari che potrebbero verificarsi in seguito a eventuali nuovi interventi.

1 Caratterizzazione del sito

La spiaggia di Vernazzola è ubicata tra il Capo di Boccadasse e il promontorio artificiale su cui si trova il depuratore di Sturla e delimitata a Ponente da un molo rivolto verso Est. In seguito alla realizzazione di lavori di manutenzione straordinaria e ampliamento dei pennelli a difesa della costa sono state apportate modifiche strutturali per realizzare una spiaggia protetta da due moli rispettivamente a Ponente (adeguamento del molo esistente) e a Levante (realizzazione di un nuovo pennello sporgente a modifica della testata della difesa in massi del depuratore). La nuova spiaggia è stata realizzata con ghiaia di medie dimensioni ($d_{50} \sim 5 - 10$mm) portata da terra con camion e modellata con ruspe.

Figura 1: Vista aerea del paraggio di Vernazzola prima dell'esecuzione dei lavori (fonte: Google Maps).

2 Base dati di riferimento

Il Comune di Genova ha fornito i seguenti rilievi batimetrici e topografici del paraggio di Vernazzola:

- (BD01) rilievo batimetrico eseguito dalla ditta Drafinsub il giorno 14 Febbraio 2009 su incarico del Comune di Genova, Settore Attuazione Piani di Bacino;
- (BD02) rilievo batimetrico eseguito dalla ditta Drafinsub il giorno 11 Settembre 2009 su incarico del Comune di Genova, Settore Attuazione Piani di Bacino;
- (BD03) rilievo spiaggia emersa realizzato dal Geometra Albezzano in data 19 Febbraio 2010 su incarico del Comune di Genova, Settore Attuazione Piani di Bacino;
- (BD04) rilievo batimetrico eseguito dalla ditta Drafinsub nel periodo 27 Aprile 2010 - 19 Maggio 2010 su incarico del Comune di Genova, Settore Attuazione Piani di Bacino.

Per quanto riguarda le informazioni sul materiale lapideo utilizzato per il ripascimento della spiaggia e per la realizzazione dei pennelli previsti nel progetto si è fatto riferimento ai seguenti documenti:

- (BD05) relazione specialistica "*Studio sedimentologico del litorale di Vernazzola, esecuzione delle analisi granulometriche sui relativi campioni e formulazione di considerazioni riguardo al reperimento di materiale idoneo da utilizzare per il ripascimento della spiaggia in progettazione. Indagine sedimentologica*" realizzata dal DIPTERIS, Università degli Studi di Genova, su incarico del Comune di Genova;
- (BD06) relazione Specialistica di Ingegneria Marittima R04 facente parete della documentazione relativa alla "*Progettazione delle opere di manutenzione straordinaria ed ampliamente dei pennelli a difesa della costa in località Vernazzola*", redatta dall'ufficio progettazione dell'ASTER su incarico della Regione Liguria e del Comune di Genova;
- (BD07) prove eseguite dalla Tecno Piemonte S.p.A. sul materiale di cava utilizzato per il ripascimento della spiaggia di Vernazzola (comunicazione del Comune di Genova);
- (BD08) relazione specialistica "*Monitoraggio del litorale di Genova Vernazzola, Indagine sedimentologica*", realizzata dal DIPTERIS, Università degli Studi di Genova su incarico del Comune di Genova;

Per quanto riguarda l'evento di mareggiata del Dicembre 2009- Gennaio 2010

- (BD09) Rapporto di evento metereologico del 1-2 Gennaio 2010, redatto da B. Turato, S. Gallino, L. Onorato e F. Pedemonte, ARPAL Liguria.

Al fine della realizzazione del modello in vasca sono state realizzate dal DICCA curve granulometriche del materiale di ripascimento tuttora presente sulla spiaggia emersa, e del materiale utilizzato per le prove sperimentali sul modello in scala.

3 Descrizione del problema

3.1 Situazione antecedente l'intervento del 2009

La piccola insenatura, priva di apporti fluviali, si presentava limitata ad est dalla testata del "molo di Levante" costruito a difesa dello scalo di alaggio in prosecuzione della scogliera posta a protezione del depuratore e a ovest dal "molo di Ponente", rivolto verso est. La zona centrale, del tutto priva di spiaggia emersa, era costituita da massi e altro materiale

grossolano che di fatto costituiva una protezione radente a difesa dei muri delle proprietà sul retrospiaggia. Erano presenti solo una piccola spiaggia a ridosso del molo di Ponente e una, ancora più modesta, a ridosso della testata del molo di Levante. Quanto sopra è illustrato chiaramente nelle foto n. 5, 6, 8, 12, 17, 18 allegate al Progetto esecutivo di intervento e riportate in Figura 2.

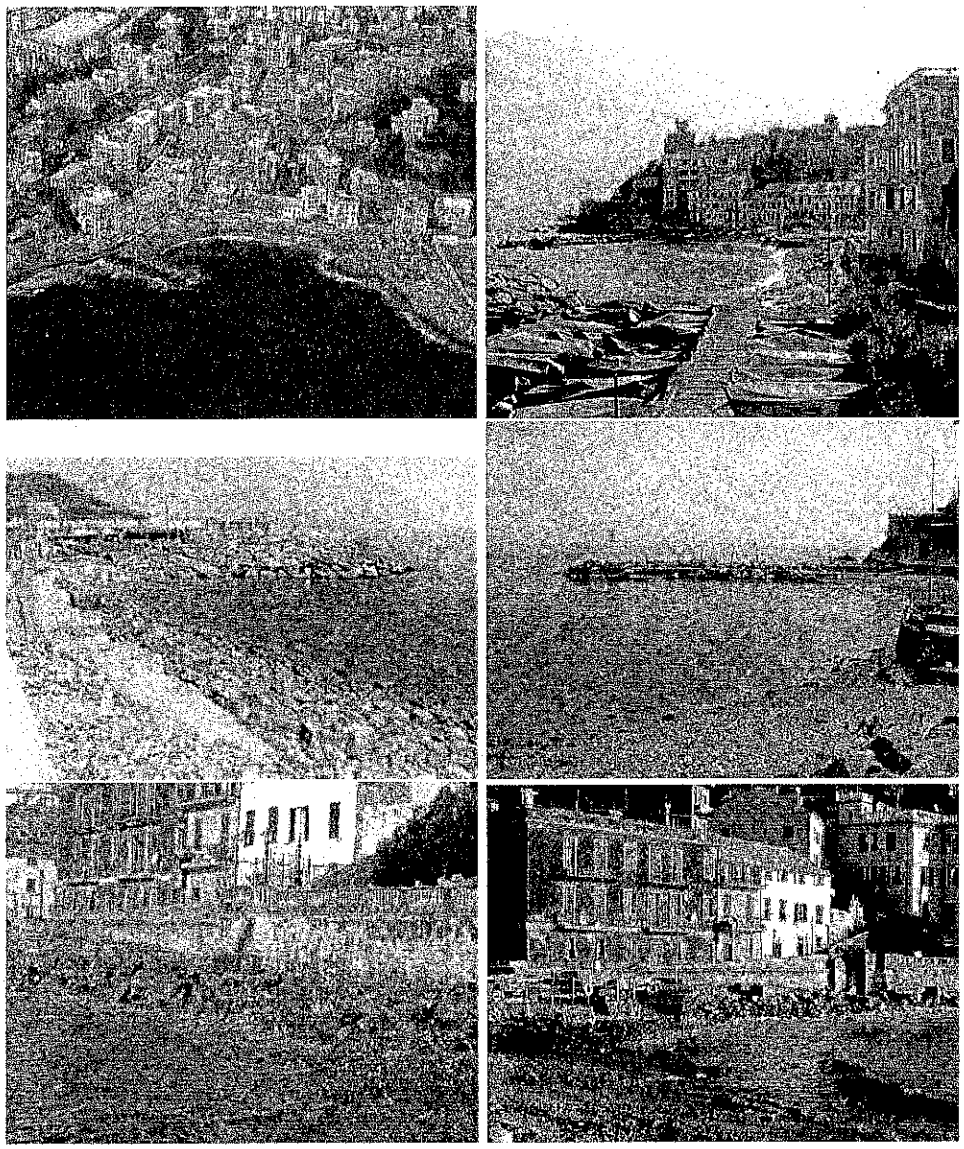

Figura 2: Documentazione fotografica allegata al Progetto Esecutivo (R02)

In quelle condizioni l'insenatura era investita quasi frontalmente da moti ondosi provenienti dal terzo quadrante, sostanzialmente da Libeccio/Mezzogiorno. In occasioni di forti mareggiate si assisteva alla tracimazione dei due moli che arrecava danni materiali con importanti inondazioni soprattutto nella zona di Levante, dove si ha il ricovero di imbarcazioni. La zona centrale del litorale era soggetta all'azione diretta delle onde che, intercettate dai massi presenti, frangevano senza interessare le strutture retrostanti. Mareggiate intense quali quelle del Novembre 1999 e del 30 ottobre 2008 che evidenziano queste modalità di comportamento sono facilmente osservabili in filmati presenti in internet.

L'indagine sedimentologica sopra citata (BD05) evidenzia che "...l'area presenta caratteri tessiturali grossolani che inducono a ritenere la spiaggia sottoposta ad agitazioni ondose di elevata energia...". Inoltre le strutture rigide presenti determinano "...una forte erosione che interessa tutto il litorale, specie nella porzione orientale, e inoltre determina un sensibile sbilanciamento dell'assetto longshore con un accumulo di sedimenti nel settore protetto dal pennello di Ponente...".

Si è ritenuto pertanto necessario procedere a un intervento di manutenzione straordinaria per la difesa del tratto di litorale. La relazione specialistica di Ingegneria Marittima (BD06) prevede: "...Il riequilibrio della spiaggia deve rendere possibile, con un'operazione di ripascimento, l'estendersi dell'arenile nella zona di Levante. Per ottenere ciò è necessario modificare la circolazione idrodinamica eliminando le concentrazioni di energia e di correnti che attualmente si verificano nella parte orientale...".

3.2 Intervento del 2009

Il progetto di riequilibrio della spiaggia, da attuarsi attraverso modifiche delle strutture esistenti e realizzazione di un ripascimento, doveva consentire in particolare l'estensione dell'arenile nella zona di Levante e la protezione dello scalo di alaggio ivi localizzato. Contemporaneamente veniva progettato un intervento di captazione e smaltimento della portata d'acqua proveniente dal sormonto della diga a protezione del depuratore.

L'intervento realizzato, che appariva il meno drastico possibile, è consistito:

- nella risagomatura della testata del molo di Ponente:
- nello spostamento verso mare del molo di Levante:
- nel ripascimento della spiaggia con materiale essenzialmente ghiaioso, scarsamente classato, con bassa componente sabbiosa (BD05).

Si osserva che la soluzione scelta ha portato le testate dei due moli vicine e affacciate di fatto alla direzione del mare prevalente. Il materiale del ripascimento è stato portato con mezzi meccanici via terra, nella previsione che il mare avrebbe provveduto a distribuirlo sulla spiaggia emersa e sommersa.

I rilievi batimetrici eseguiti su incarico del Comune di Genova prima e dopo l'intervento e riportati nelle Figure 4 e 5 evidenziano le modifiche subite soprattutto dalla spiaggia sommersa. Nelle ipotesi progettuali (BD06) la linea di riva verso Levante e nella zona centrale, in corrispondenza delle strutture di retrospiaggia, che hanno poi subito il danno, avrebbe dovuto, a regime, avanzare di circa 19 m verso mare portando il muro alla distanza di circa 25 m dalla battigia. La quota massima del versamento rispetto alla battigia avrebbe dovuto essere di 2 m, con quote inferiori (1.65 m) in corrispondenza del muro retrospiaggia, dove il livello era previsto comunque sopra alla soglia superiore della scogliera allora presente, che è stata eliminata. La foto di Figura 3 mostra la spiaggia a Settembre 2009 subito dopo la realizzazione dell'intervento. In particolare, dal rilievo del Settembre 2009 (Figura 5) non risultano del tutto chiare le quote realmente ottenute sulla spiaggia emersa. Sarebbe stato interessante conoscere soprattutto quelle nella zona centrale dove si sono successivamente avuti danni alle strutture di retrospiaggia.

3.3 Conseguenze dell'evento del Dicembre 2009 - Gennaio 2010

In tale data il litorale di Vernazzola è stato oggetto di un evento di mareggiata piuttosto severo che ha portato a una notevole risalita del moto ondoso lungo la nuova spiaggia emersa andando a investire direttamente i muri retrostanti la zona centrale e provocando danni. Tali strutture, come sopra osservato, non avevano in passato subito danni pur in presenza di forti mareggiate, in quanto la scogliera posta a quota di poco superiore al livello del mare costituiva di fatto una protezione radente al piede. Si osserva che la mareggiata in oggetto,

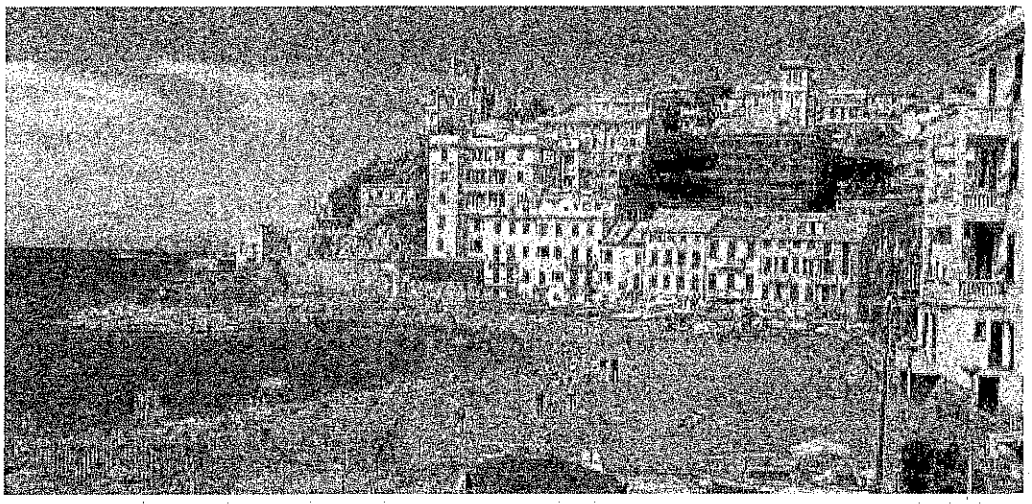

Figura 3: Spiaggia di Vernazzola subito dopo la fine dei lavori di costruzione dei pennelli e della realizzazione del ripascimento.

che sarà descritta nel seguito, non è stata particolarmente severa rispetto alle altezze d'onda ma piuttosto rispetto ai periodi, decisamente elevati.

L'azione del moto ondoso ha determinato l'accumulo di materiale di grossa granulometria sulla faccia della spiaggia e la formazione di una alta berma a fronte ripido. La spiaggia emersa, subito dopo l'evento, è stata oggetto di un intervento da terra con mezzi meccanici che hanno asportato il materiale addossato ai muri dalla mareggiata ridistribuendolo sulla spiaggia. La foto riportata in Figura 7 dà un'idea della configurazione della spiaggia emersa.

Il rilievo batimetrico eseguito nel periodo 27 aprile-19 Maggio 2010 (BD04), riportato in Figura 6, e il monitoraggio del litorale condotto contestualmente (BD08) mettono in evidenza la nuova modellazione della spiaggia sommersa pur non dando indicazioni sufficienti a conoscere i profili trasversali ottenuti sulla spiaggia emersa. L'indagine evidenzia una posizione della linea di riva arretrata di pochi metri nella zona centrale, con una rotazione che porta a un avanzamento a ponente. Si ha un innalzamento delle quote della spiaggia emersa, peraltro conseguenti anche agli interventi di rimodellamento eseguiti dopo la mareggiata. Le quote raggiunte non sono correlabili strettamente all'azione del moto ondoso, che ha determinato l'accumulo di materiale di grossa granulometria sulla faccia della spiaggia e la formazione di una berma con fronte di elevata pendenza. La modifica rilevata nella parte sottomarina è invece da ricondursi direttamente all'azione del moto ondoso (vedi Figura 8).

I campioni di sedime prelevati (BD08) evidenziano sulla spiaggia emersa, particolarmente nella zona centrale, la presenza del materiale di ripascimento grossolano e scarsamente classato, mentre a Levante e a Ponente la granulometria presenta diametri inferiori e meglio classati, rivelando deposito di materiale fino per effetto della circolazione che si realizza nell'insenatura. Il materiale di ripascimento è presente nella spiaggia sommersa solo fino alle profondità di 1.5~2.0 metri, e prevalentemente nella zona centrale. L'area posta tra le due testate risulta praticamente priva di sedimenti, con affioramento della roccia sottostante, responsabile dell'impossibilità di realizzazione di carotaggi. Si evidenzia inoltre un forte depauperamento del fondale all'esterno delle strutture, soprattutto delle frazioni più fini. In questa zona, infatti, "...sono presenti sedimenti riferibili a ghiaie ed a sabbie grosse moderatamente ben classate, mentre in precedenza (prima dell'intervento) erano presenti sabbie medie e grosse scarsamente classate...".

Nella indagine sedimentologica eseguita prima dell'intervento (ED05) si evidenziava che la situazione esistente determinava erosioni soprattutto nella zona di Levante: "... La situazione

Figura 4: Rilievo batimetrico realizzato dalla ditta Drafinsub nel Febbraio del 2009 (Pre Lavori - BD01)

Figura 5: Rilievo batimetrico realizzato dalla ditta Drafinsub nel Settembre del 2009 (Post Lavori - BD02)

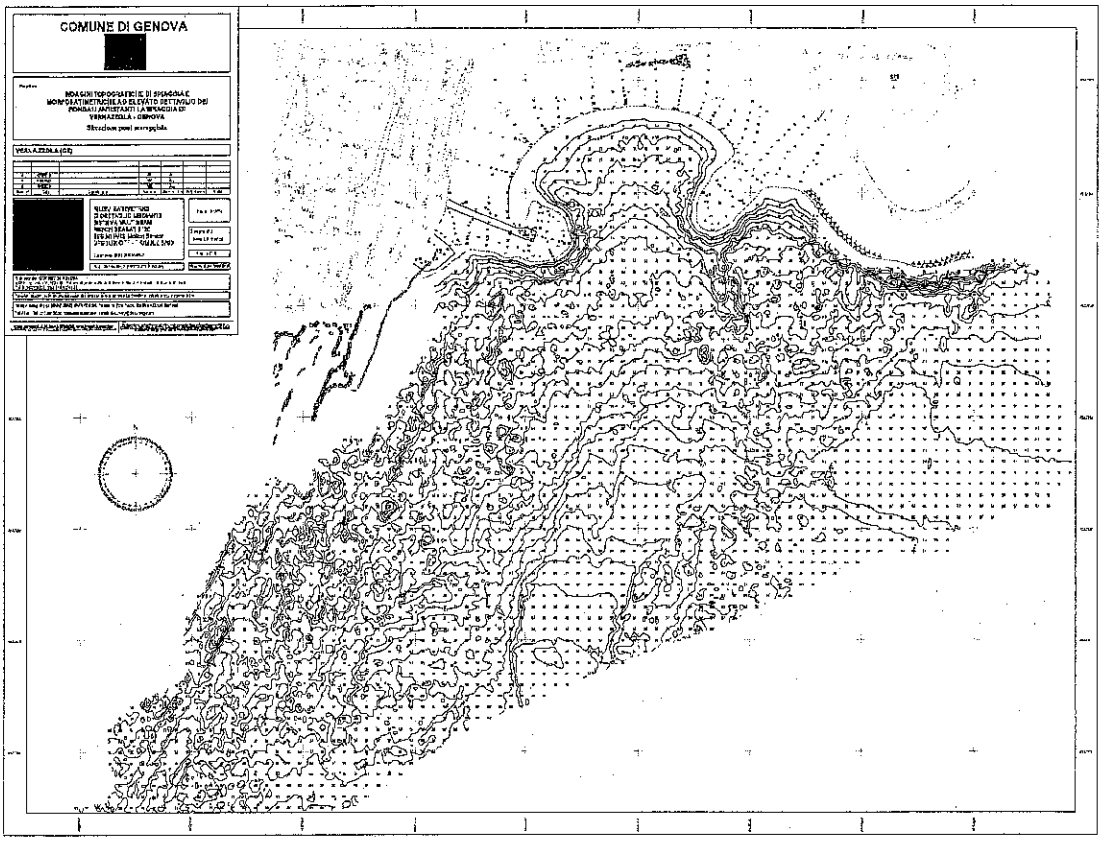

Figura 6: Rilievo batimetrico realizzato dalla ditta Drafinsub nel Maggio del 2010 (Post Evento Dicembre 2009-Gennaio 2010 (BD04)

è ulteriormente aggravata dalla presenza del pennello che con la sua presenza confina il flusso di ritorno in una porzione ridotta di spiaggia sottomarina favorendo la formazione di correnti di risucchio che contribuiscono all'allontanamento delle frazioni più fini. Questa situazione determina una forte erosione che interessa tutto il litorale, specie nella porzione orientale, ed inoltre determina un sensibile sbilanciamento dell'assetto long-shore con un accumulo di sedimenti nel settore protetto dal pennello (di Ponente)...". Si osserva che la costruzione del nuovo molo di Levante ha ridotto ulteriormente la porzione di spiaggia sottomarina della quale dispone il flusso di ritorno; inoltre tale flusso è ora concentrato di fronte alla zona centrale.

Nelle Conclusioni della stessa indagine, per eliminare o quantomeno attenuare questi aspetti, si osservava: "...In particolare è necessario limitare l'azione riflettente della scogliera del depuratore e ridurre le dimensioni del pennello; quest'ultima operazione permetterebbe in primo luogo di ampliare la superficie di spiaggia sottomarina interessata dal deflusso riducendone conseguentemente l'intensità, inoltre aumenterebbe il settore di spiaggia direttamente sottoposto alle ondazioni principali attenuando i fenomeni d'accumulo nel settore occidentale protetto dal pennello...". L'intervento realizzato sul molo di Levante nell'intento di proteggere meglio tale zona ha ridotto il settore di spiaggia direttamente sottoposto alle ondazioni principali alla sola zona centrale.

In Figura 8 viene ricostruita la differenza tra i rilievi al termine dell'intervento di ripascimento (Settembre 2009) e in seguito all'evento di mareggiata (Maggio 2010). Sono evidenziate in blu le zone di erosione e in rosso le zone di deposito. La figura mostra una estesa erosione nella zona centrale, dove si è avuto il danno, nella zona di Levante, che con-

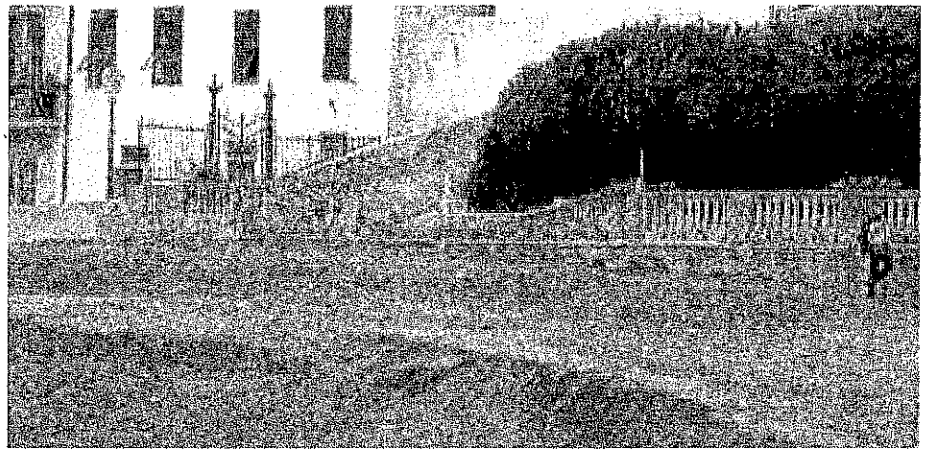

Figura 7: Danno verificatosi in seguito alla mareggiata del Dicembre 2009-Gennaio 2010

tinua a presentare perdita di materiale, e nella zona compresa tra le due testate. La zona di Ponente non presenta perdita di materiale nella zona di riva ma solo a ridosso del molo dove agisce direttamente il getto che scavalca il molo stesso anche in occasione di mareggiate non severe, come si è osservato in diversi sopralluoghi effettuati.

3.4 L'incarico del Comune di Genova. Finalità dello studio

Il litorale di Vernazzola non ha risposto all'attacco della mareggiata del Dicembre 2009 - Gennaio 2010 nella maniera prevista nell'intenzione dell'intervento eseguito nel 2009. Si rende pertanto necessario indagare se nella configurazione che si è venuta a creare a oggi il litorale è in grado di sopportare analoghe mareggiate e se sono possibili interventi, ambientalmente compatibili, atti a controllare il fenomeno.

Al fine di dare risposte quanto meno qualitative sul comportamento idraulico del litorale si è proceduto prima di tutto a una valutazione teorica del comportamento della spiaggia, quindi alla predisposizione di un modello fisico in scala che riproducesse la situazione alla fine del 2009 e, assoggettato alla mareggiata sopracitata, manifestasse un comportamento congruente al vero. L'attendibilità del modello è valutata sulla base della capacità dello stesso di seguire il comportamento subito dalla spiaggia. Verificato quindi che il modello è appropriato a riprodurre il fenomeno idrodinamico, si può procedere a nuove sperimentazioni, sia con il modello deformato per riprodurre la situazione che si è venuta a creare dopo l'evento sopracitato, sia introducendo nel modello stesso eventuali nuovi interventi.

3.5 Ricostruzione della mareggiata di Dicembre 2009 - Gennaio 2010

Per poter simulare correttamente le condizioni di moto ondoso insistenti nel paraggio di Vernazzola durante l'evento del Dicembre 2009, è stata utilizzata la catena operativa di previsione e reanalisi del moto ondoso presente presso il DICCA (Mentaschi et al., 2013. www.dicca.unige.it/meteocean) con dati di re-analisi per le condizioni iniziali meteorologiche per poter ricostruire opportunamente la mareggiata in esame. La forzante di vento necessaria per le simulazioni effettuate con WWIII consiste in campi di vento a 10 m, ottenuti utilizzando il modello a mesoscala di ultima generazione WRF-ARW, versione 3.2.1. Per il modello WRF è stato definito un unico dominio su tutto il Mediterraneo con una risoluzione di 10 km. Le condizioni iniziali per il modello WRF sono state generate a partire dalla base dati di reanalisi di terza generazione CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*).

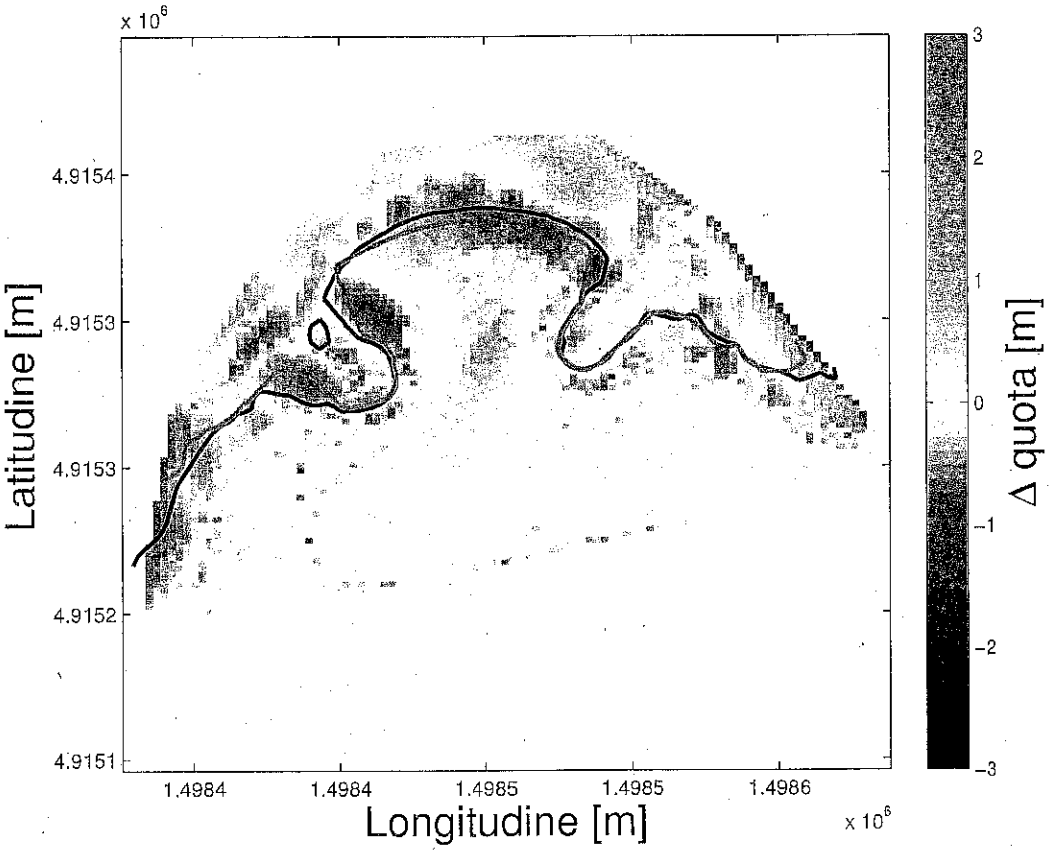

Figura 8: Differenza tra il rilievo del Maggio 2010 e quello del Settembre 2009 (valori positivi indicano deposito di sedimenti, mentre valori negativi indicano erosione). La linea nera e la linea verde indicano le rispettive linee di riva

resa disponibile dal NCEP (*National Center for Environmental Prediction*). È stato quindi possibile realizzare un confronto tra le misure di campo della boa di La Spezia e i risultati del modello numerico estratti in un punto di coordinate equivalenti alla boa di La Spezia stessa, ottenendo un ottimo accordo tra i valori di altezza d'onda significativa, periodo medio e direzione di propagazione (Figura 9).

Lo stesso modello è stato adottato per ricostruire in dettaglio la mareggiata al largo della spiaggia di Vernazzola, riportata in Figura 10. Si osserva che il picco della mareggiata è costituito dalla sovrapposizione di una condizione di mare vivo da W su una mareggiata da SW proveniente dal Mediterraneo occidentale in lenta caduta da SW (swell). È interessante osservare che le onde associate allo swell avevano caratteristiche di tipo quasi-oceanico, in quanto presentavano periodi maggiori di 10 s, inusuali rispetto ai periodi rilevati abitualmente nel Mediterraneo durante la fase attiva delle mareggiate.

Si osserva inoltre che in occasione della mareggiata in oggetto il mareografo di Genova registrava una notevole sopraelevazione dovuta, oltre alla marea astronomica, al gradiente barico (circa 12 cm) e all'effetto di swell ovvero un effetto di non linearità (circa 24 cm), come riportato sul rapporto di evento metereologico del 1-2 Gennaio 2010 dell'ARPAL (BD09).

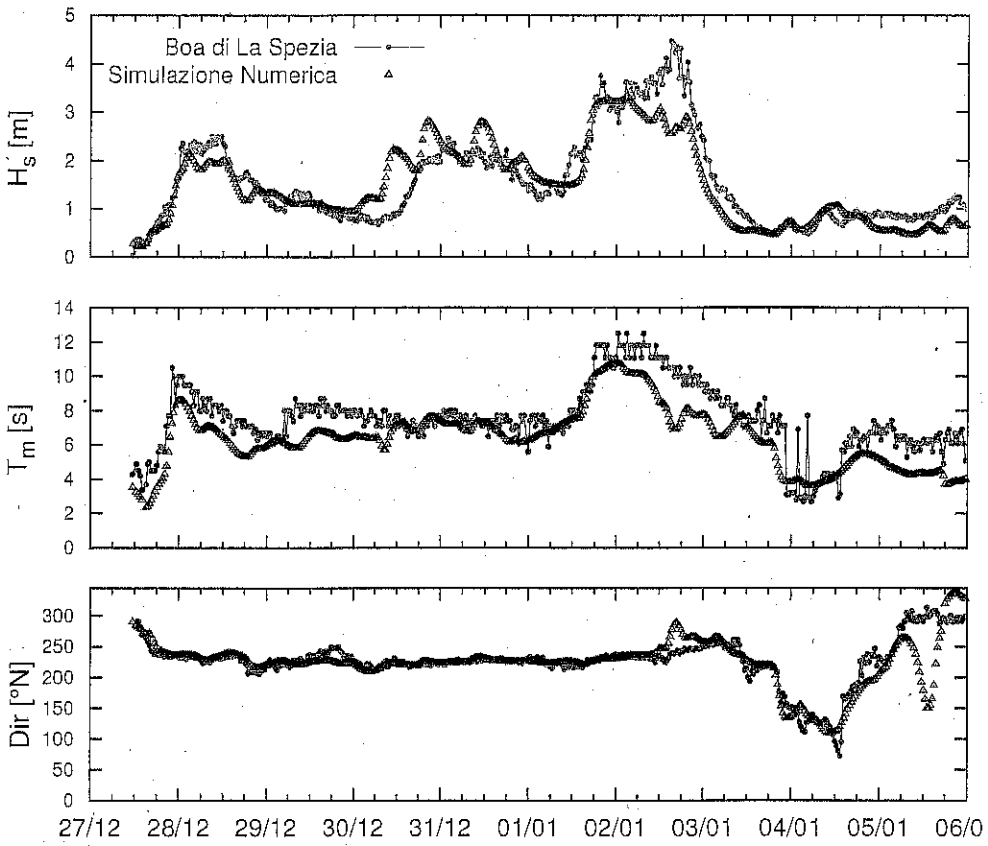

Figura 9: Confronto tra i dati misurati dalla boa di La Spezia (rosso) e i risultati del modello numerico WRF+WWIII (blu) per l'evento di mareggiata del Dicembre 2009 - Gennaio 2010.

3.6 Considerazioni idrodinamiche sulla configurazione planimetrica a seguito dell'intervento del 2009

L'analisi condotta sulla configurazione del litorale come rilevato al termine dell'intervento, basata sui rilievi messi a disposizione e sopra riferiti, consente una interpretazione del comportamento presentato in occasione della mareggiata citata.

La presenza delle due testate affacciate, alla distanza dell'ordine della lunghezza d'onda locale, poste a una profondità alla quale i moti ondosi più severi hanno già sperimentato fenomeni di frangimento, conduce a una concentrazione dell'azione del moto ondoso che rimane particolarmente intensa nella zona centrale e a una modesta diffrazione verso le zone laterali. Si assiste quindi allo spoglio nella zona centrale di eventuali materiali più fini che vengono in parte depositati nelle zone laterali stesse e soprattutto trasportati verso il largo.

Il moto ondoso nella zona di riva e la conseguente risalita lungo la spiaggia emersa risentono in maniera importante della sopraelevazione del livello medio che si realizza durante la mareggiata. Inoltre la corrente di ritorno trova una sezione di uscita ristretta tra le due testate, e si concentra particolarmente nella zona di Levante in corrispondenza di mari di Libeccio, i più severi. Le onde in arrivo risultano sensibilmente irripidite da tale corrente.

A questi fenomeni va aggiunto il sormonto di entrambi i pennelli che porta a un accumulo di acqua da smaltire con la corrente di ritorno. La forte azione della corrente di ritorno è messa in evidenza dal depauperamento dei sedimenti rilevato tra le due testate (BD08).

Appare importante valutare teoricamente, in corrispondenza dell'evento di mareggiata

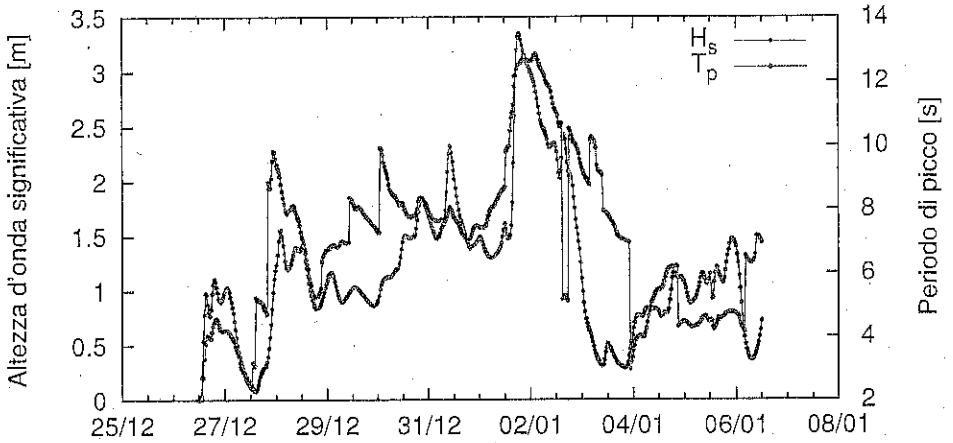

Figura 10: Ricostruzione della mareggiata del Dicembre 2009 - Gennaio 2010 al largo della spiaggia di Vernazzola.

che ha causato i danni, la locale sopraelevazione del livello medio dovuta al moto ondoso, in quanto la parte di sopraelevazione dovuta alla marea astronomica e ai fenomeni metereologici quali il gradiente barico sono forniti nel Rapporto (BD09). Si tratta quindi di valutare:

- il wave set-up, ovvero la sopraelevazione che si realizza nella surf zone per compensare con il contributo della pressione idrostatica la riduzione delle forze dinamiche dovute alla variazione della pressione dinamica e del flusso della quantità di moto;

- il run-up, ovvero l'insieme delle massime escursioni dell'onda rispetto alla linea di riva, misurate verticalmente.

La risalita complessiva (run-up totale) è determinata rispetto alle condizioni di quiete quindi comprende sia l'innalzamento del livello medio precedentemente citato (wave set-up) sia la fluttuazione intorno alla media delle posizioni nel tempo rilevate alla intersezione tra il mare e la spiaggia emersa (swash). Tali oscillazioni sono influenzate dalle oscillazioni a elevato periodo dovute a onde infragravitazionali presenti per effetti di non linearità e dalla presenza di onde stazionarie dovute alla riflessione sulla faccia della spiaggia.

È inoltre opportuno valutare la sopraelevazione media dovuta direttamente ad effetti di non linearità che conducono ad avere onde con creste più alte e cavi meno profondi rispetto a quelle ottenute nelle condizioni di linearità usualmente adottate per la propagazione dal largo verso riva. Gli effetti di non linearità, tanto più importanti quanto più è grande l'altezza d'onda al largo, conducono alla formazione di onde di elevato periodo che giocano un ruolo importante nel run-up.

Le onde con periodo proprio delle wind waves (onde di mare vivo), generalmente inferiori a 10 s, subiscono effetti di riduzione di energia dovuta a fenomeni di saturazione whitecapping (frangimenti parziali superficiali di tipo spilling già presenti al largo) e al frangimento per profondità, mentre le onde lunghe, con periodo in genere maggiore di 12 s, non subiscono il fenomeno della saturazione, difficilmente frangono e finiscono per riflettersi sulla faccia della spiaggia dando un contributo importante al run-up, che dipende dall'altezza d'onda al largo e dalla pendenza del fondale sulla faccia della spiagga (foreshore slope).

Anche le swell, cioè le onde provenienti da zone di generazione lontane, che hanno già subito i fenomeni sopra citati e conservano le componenti di periodo più lungo, presentano effetti di non linearità e di riflessione che contribuiscono al run-up.

Per quanto riguarda la valutazione del set-up, la teoria fornisce risultati appropriati per onde regolari mentre per onde irregolari conviene fare riferimento a procedimenti probabilistici che tengono in conto la frazione di onde che hanno probabilità di frangere oppure adottare

i risultati ottenuti in campo da Guza and Thornton (1981) che indicano l'altezza di set-up compresa tra il 14% e il 21% dell'altezza d'onda spettrale al largo, con modesta influenza del periodo d'onda e della pendenza del fondale, e suggeriscono di adottare mediamente il 17%. Assumendo nel caso in esame l'altezza pari a 3.5 m si ha una sopraelevazione di wave set-up di circa 60 cm.

Per quanto riguarda la valutazione del run-up, cioè la risalita lungo la spiaggia emersa del getto in occasione di mareggiata, si può ricorrere a formule di origine sperimentale dedotte in condizioni di spiaggia piana, che, pur avendo nella presente situazione una valenza puramente indicativa, trovano riscontro sia nella situazione realizzatasi al vero, sia nella sperimentazione condotta sul modello in scala in laboratorio.

L'oscillazione di run-up è una grandezza stocastica pertanto occorre fare riferimento a quantità statistiche, quali l'altezza massima, l'altezza significativa o quella che presenta una certa percentuale di superamento. Solitamente si fa riferimento a R_{U2}, che presenta il 2% di probabilità di superamento. Il rapporto, usualmente considerato, tra il run-up e la altezza d'onda significativa spettrale al largo, dipende sia dalla pendenza del fondale sia dal periodo d'onda, oltre che dall'altezza d'onda stessa. Osservazioni in campo di Holman (1986) individuano come parametro significativo il numero di Iribarren $\xi_{p0} = s_f/\sqrt{H_0/L_0}$ definito dal rapporto tra la pendenza s_f sulla faccia della spiaggia e la radice quadrata della ripidità d'onda al largo, ovvero il rapporto tra l'altezza d'onda significativa spettrale al largo H_0 e la lunghezza d'onda al largo L_0 valutata in corrispondenza del periodo di picco associato all'altezza. Sotto queste ipotesi è possibile scrivere la seguente relazione che fornisce il valore medio del run-up totale (Holman, 1986)

$$R_{U2}/\ H_0 = 0.83\ \xi_{p0} + 0.2 \quad . \tag{1}$$

Altre espressioni predittive per i valori di run-up corrispondenti a diverse probabilità di superamento su spiagge piane con pendenze da 0.2 a 0.03 e ripidità al largo maggiori di 0.007 vengono suggerite dal Coastal Engineering Manual (2006) a partire da osservazioni in laboratorio con onde irregolari di Mase (1989). In particolare nella presente analisi si utilizza l'espressione relativa a R_{U2}, citata anche nell'indagine sedimentologica (BD05), e quella relativa a R_{Umax}

$$R_{U2}/\ H_0 = 1.86\ \xi_{p0}^{0.71} \tag{2}$$

$$R_{Umax}/\ H_0 = 2.32\ \xi_{p0}^{0.77} \quad . \tag{3}$$

Le misure in campo di Holman (1986) e altre di Nielsen and Hanslow (1991) hanno dato luogo a valori medi minori rispetto a quelli che si ottengono con le relazioni di Mase (1989), ma gli Autori osservano che questi ultimi costituiscono grosso modo un inviluppo superiore della nuvola che rappresenta la dispersione dei dati sperimentali.

Sulla base di ulteriori osservazioni in campo Stockdon et al. (2006) hanno formulato una relazione che introduce separatamente la pendenza della faccia della spiaggia s_f e le caratteristiche del moto ondoso al largo attraverso il parametro dimensionale $(H_0L_0)^{0.5}$

$$R_{U2} = 1.1\left[0.35\ s_f\,(H_0L_0)^{0.5} + 0.5\,(H_0L_0)^{0.5}\left(0.563\ s_f^2 + 0.004\right)^{0.5}\right] \quad . \tag{4}$$

La relazione può essere adottata su spiagge di diverse caratteristiche, in quanto i due termini che la compongono tengono in conto gli effetti legati a spiagge dissipative e quelli legati a spiagge riflettenti, dando un diverso ruolo alla pendenza, che condiziona in maniera determinante i valori di run-up. L'equazione sembra fornire risultati appropriati rispetto ai valori medi di molte osservazioni al vero.

Considerando che la pendenza sulla faccia della spiaggia nella zona interessata al danno alle strutture era, a valle dell'intervento, di circa 8%, si possono valutare i valori del run-up associato alla mareggiata di interesse con le diverse formule citate. Assumendo come valori

al largo quelli valutati al culmine della mareggiata ricostruita al largo di Vernazzola e dedotti dalla Figura 10 H_0=3.5m e T_0=12s, si ottiene ξ_{p0}=0.64, $(H_0L_0)^{0.5}$=28.06, pertanto risulta, rispettivamente con le formule (1) e (4)

$$R_{U2} = 2.56\text{m} \; ; \quad R_{U2} = 2.36\text{m} \; . \tag{5}$$

Con le formule di Mase (1989) (2) e (3) si ottiene invece

$$R_{U2} = 4.74\text{m} \; ; \quad R_{Umax} = 5.75\text{m} \; . \tag{6}$$

I valori ottenuti confermano che le relazioni di Mase probabilmente costituiscono una sovrastima dei valori medi, ma contemporaneamente evidenziano che è possibile attendersi valori di run-up totale di oltre 4 m.

La valutazione teorica della sopraelevazione per effetti di non linearità può essere fatta utilizzando un modello di propagazione nón lineare che interpreta gli stati di mare al largo tramite un'onda stokiana al primo ordine che diventa stokiana al secondo ordine a partire dalla profondità intermedia alla quale gli effetti non lineari diventano significativi. Sulle basse profondità alle quali l'onda stokiana non lineare non può essere applicata il modello introduce l'onda cnoidale al primo ordine (Gentile et al., 1994; Rebaudengo Landò et al., 1999). Il modello tiene in conto, oltre agli usuali processi di shoaling e di rifrazione, il processo di saturazione che interpreta, nel campo lineare, le dissipazioni per frangimenti parziali di tipo spilling sopra citati. Non viene qui introdotto il processo di dissipazione al fondo che si mantiene trascurabile nel breve tratto considerato.

Assumendo sulla profondità di 50 m i valori al largo di altezza d'onda e periodo sopra utilizzati si ottiene sulla profondità di 10 m un'onda stokiana al secondo ordine di altezza 2 m che presenta una sopraelevazione di 30 cm, coerente con i rilievi del mareografo, e sulla profondità di 4.50 m, ovvero davanti all'imboccatura delle due testate, un'onda cnoidale di altezza 2.30 m che presenta una sopraelevazione di 75 cm. Gli alti valori di run-up sopra ottenuti sono coerenti con tale risultato, tenuto presente che all'interno della insenatura la sopraelevazione cresce con il ridursi della profondità, anche per effetto delle onde stazionarie determinate dalla riflessione sulla faccia della spiaggia, e che il wave set-up medio è di 60 cm.

Se si aggiungono ai valori di run-up calcolati il sopralzo di marea astronomica e il contributo barico si comprende come il getto di riva abbia potuto investire direttamente e danneggiare il muro posto a quota di 4 m alla distanza di circa 25 m dalla linea di riva, visto che su una spiaggia con pendenza dell'8% una quota di run-up di 4 m è raggiunta dopo 50 m.

L'attuale pendenza della faccia della spiaggia, come rilevato nel monitoraggio, è di circa 10%, quindi il run-up potrebbe aumentare.

Sono stati fatti diversi sopralluoghi per esaminare le condizioni che si realizzano in presenza di mareggiata e si è osservato che in condizioni di mare vivo, con bassi periodi, anche altezze d'onda severe al largo non danno luogo ad alti valori di run-up in quanto prevale l'effetto dissipativo del frangimento che inizia abbastanza al di fuori dell'imboccatura. In occasione della mareggiata del 16/17 Dicembre 2012 si è osservato che il giorno 16, caratterizzato dalla fase crescente della mareggiata, con altezze d'onda al largo intorno ai 4 m ma periodi inferiori a 10s, il getto di riva non raggiungeva il muro di retrospiaggia, mentre il giorno 17, caratterizzato dalla fase decrescente con altezze al largo intorno ai 2 m e periodi d'onda maggiori di 10 s, la lama d'acqua raggiungeva il muro, come si osserva dalla foto riportata in Figura 11.

Ritenendo realistici in quella occasione come valori al largo H_0=2.0m e T_0=11s, valutati con osservazione visiva nel momento in cui la mareggiata era in fase calante, si ottiene ξ_{p0}=0.78, $(H_0L_0)^{0.5}$=19.44 e quindi sulla base delle formule (1) e (4) il valore del run-up

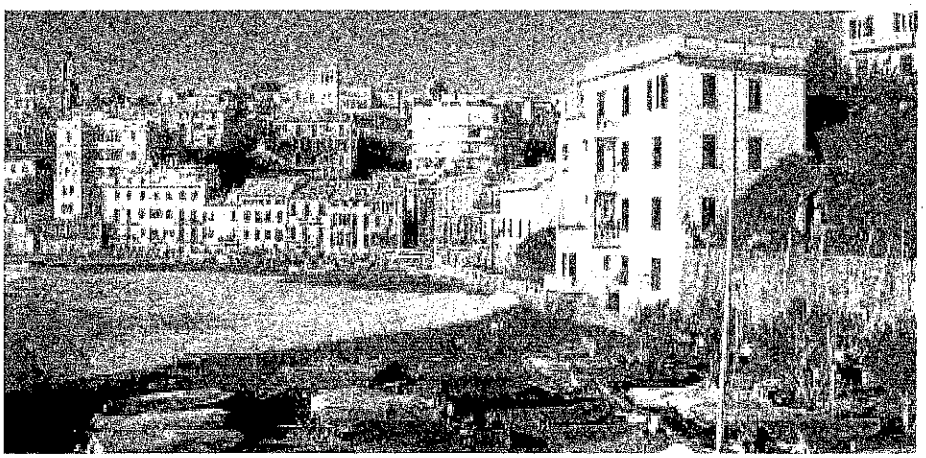

Figura 11: Configurazione della spiaggia emersa e risalita della lama d'acqua il 17 Dicembre 2011

Figura 12: Profilo della spiaggia in occasione del sopralluogo del 2 Febbraio 2013

risulta

$$R_{U2} = 1.69\text{m} \; ; \quad R_{U2} = 1.53\text{m} \; . \tag{7}$$

Sulla base delle formule di Mase (1989) (2) e (3)

$$R_{U2} = 3.12\text{m} \; ; \quad R_{Umax} = 3.83\text{m} \; . \tag{8}$$

Il valore medio di wave set-up è di 34 cm e la sopraelevazione per effetti di non linearità sulla profondità di 4.5 m è di 17 cm.

I valori di run-up ottenuti sono coerenti con l'osservazione della foto che evidenzia che il getto in quel momento supera i 2 m alla distanza di circa 25 dalla linea di riva in condizioni di quiete, dove è posto il muro. In queste condizioni l'azione del getto non è in grado di procurare danni. Ovviamente l'azione del getto di riva è tanto più pericolosa quanto più ripido è il tratto su cui si sviluppa il run-up e quanto più è grande il periodo del moto ondoso. Dal 2010 ad oggi il litorale di Vernazzola è stato investito da mareggiate di diversa intensità senza che il muro retrostante riportasse danni, ma non si è più ripresentata la situazione del Gennaio 2010.

Sono stati effettuati parecchi sopralluoghi per monitorare il comportamento della spiaggia emersa nelle diverse condizioni. Nell'ultimo, effettuato il 2 Febbraio 2013, la spiaggia presentava una berma molto alta, di circa 4 m, con fronte ripido, estesa nella zona centrale per circa 20 m fino al muro retrostante, come si osserva nella Figura 12. Tale berma, risultante dall'accumulo di materiale a opera di mareggiate di modesta entità, mantenendo l'altezza del ciglio, può presentare un fronte che sotto l'azione di mareggiate severe può costituire un piano favorevole alla risalita del getto di riva.

Alla luce di quanto sopra valutato si ritiene che mareggiate severe caratterizzate da periodi piuttosto lunghi possano ancora, nelle condizioni attuali, assoggettare il muro retrostante ad azioni dinamiche in grado di provocare danni.

Le considerazioni teoriche svolte e le valutazioni effettuate, seppure coerenti con l'osservazione al vero, si basano su modelli ricavati per spiaggie piane quindi si ritiene opportuno condurre una sperimentazione in laboratorio su un modello in scala della spiaggia interessata, atto a evidenziare, oltre ai comportamenti idrodinamici sopra considerati, l'effetto di concentrazione nella zona centrale del moto ondoso e della corrente di ritorno per effetto della presenza delle due testate, e i fenomeni di trasporto solido e di modellazione della spiaggia emersa ad essi associati.

4 Il modello in scala

4.1 Approccio teorico

La progettazione e la realizzazione del modello in scala sono state basate sulla teoria dei modelli fondata sull'analisi dimensionale delle grandezze coinvolte nel fenomeno fisico in oggetto. In generale, per l'ingegneria civile idraulica uno dei casi più comuni, e allo stesso tempo complessi che si possano verificare, è il moto di un fluido reale in condizioni non permanenti a pelo libero, ovvero soggetto alla gravità. In questo caso è opportuno impiegare la cosiddetta similitudine di Froude sempre che gli effetti della tensione superficiale siano effettivamente trascurabili in modo da non inficiare la riproduzione in scala del fenomeno fisico (Hughes, 1993; Adami, 1994). In via del tutto generale due fenomeni fisici sono in similitudine tra di loro se sono regolati da relazioni analitiche al cui interno compaiono gli stessi gruppi adimensionali che, inoltre, devono presentare lo stesso valore. Nella pratica sperimentale comune, purtroppo, non è fisicamente possibile riuscire a mantenere uguali tutte le grandezze adimensionali caratteristiche dei processi fisici tra il prototipo (ovvero il fenomeno "reale" da studiare) e il modello in scala. In questi casi, pur non rispettando rigorosamente la teoria della similitudine, è possibile rappresentare con una buona approssimazione i processi fisici principali, andando a conservare i numeri adimensionali ad essi correlati. Nel caso in oggetto, ovvero la ricostruzione dei fenomeni legati alla propagazione e trasformazione del moto ondoso e al movimento dei sedimenti sabbiosi, è necessario conservare i numeri adimensionali ad essi correlati. In particolare, per quanto riguarda la descrizione delle onde di gravità è necessario imporre l'uguaglianza del numero di Froude che si realizza rispettivamente nel prototipo e nel modello

$$Fr_p = \frac{U_p}{\sqrt{gL_p}} = \frac{U_m}{\sqrt{gL_m}} = Fr_m \tag{9}$$

dove U_p e U_m sono le scale caratteristiche delle velocità, mentre L_p e L_m sono le scale delle lunghezze. Il pedice $_p$ si riferisce alle grandezze sul prototipo mentre il predice $_m$ si riferisce alle grandezze sul modello. È necessario a questo punto definire la scala di riduzione delle lunghezze il rapporto $\lambda = L_p/L_m$, comunemente nota come "scala". In funzione di questo rapporto è possibile costruire una serie di relazioni che restituiscano i rapporti di riduzione per diverse grandezze in funzione della riduzione in scala geometrica del problema analizzato. In particolare, in seguito alla scelta del tipo di similitudine e quindi del numero adimensionale

da conservare tra il prototipo e il modello, è possibile definire le scale di variazioni delle grandezze tipiche del fenomeno. Nel caso della similitudine di Froude, in particolare, la scala di riduzione delle velocità è pari a $v = \sqrt{\lambda}$ e la scala di riduzione dei tempi risulta pari a $\tau = \sqrt{\lambda}$.

Per quanto riguarda la mobilitazione del materiale sabbioso, la realizzazione di una similitudine rigorosa risulta maggiormente complicata in quanto la riproduzione in scala di questo processo fisico è legata a diversi aspetti, spesso non riproducibili a causa degli effetti di scala. In particolare i due principali meccanismi di trasporto solido (trasporto al fondo e trasporto in sospensione) sono di quasi impossibile riproduzione simultanea a meno di accorgimenti particolarmente sofisticati nella riproduzione delle caratteristiche del fluido e del materiale sabbioso, con relative ripercussioni sulla fattibilità e sui costi finali del modello fisico stesso. La progettazione della modellazione fisica del trasporto solido è stata realizzata quindi con l'intento di poter preservare la mobilitazione del materiale sabbioso sia per fenomeni di trasporto al fondo per riprodurre il trasporto dei sedimenti sulla scarpata della spiaggia soggetta alla risalita dell'onda e al fondo nella parte di spiaggia sommersa più lontanta alla linea di riva che per quelli dovuti al trasporto in sospensione, correlati alla movimentazione della sabbia in prossimità della zona dei frangenti del moto ondoso. In generale, vista la conformazione della spiaggia di Vernazzola e le caratteristiche del materiale utilizzato per il ripascimento, la movimentazione del materiale sabbioso avviene in un primo tempo a causa della sospensione provocata da intensi fenomeni di frangimento all'interno dei moli di Levante e di Ponente e quindi, in un secondo tempo, il materiale può venire trasportato all'esterno dei pennelli.

Per la simulazione del trasporto al fondo si fa riferimento al valore della tensione di Shields al fondo: conservando il valore della tensione al fondo sul prototipo e sul modello si è in grado di riprodurre in maniera soddisfacente questo tipo di fenomeni.

$$\theta_p = \frac{\tau_p}{\rho\,(s-1)\,g d_{50}^p} = \frac{\tau_m}{\rho\,(s-1)\,g d_{50}^m} = \theta_m \tag{10}$$

dove τ rappresenta la tensione al fondo valutata come il prodotto tra il coefficiente di resistenza adimensionale f_w e il quadrato della velocità in corrispondenza dello strato limite al fondo $\tau = 0.5 f_w U_\delta^2$ e d_{50} il diametro mediano del materiale movimentato. Si rimanda ai testi specializzati la discussione relativa al calcolo del coefficiente di resistenza f_w.

Per simulare il trasporto innescato dal frangimento delle onde si fa riferimento al numero adimensionale di Dean, all'interno del quale vengono tenute in conto le caratteristiche del moto ondoso e quelle del materiale

$$D_p = \frac{H_p}{w_{sp} T_p} = \frac{H_m}{w_{sm} T_m} = D_m \tag{11}$$

dove H rappresenta l'altezza del moto ondoso locale, T il suo periodo, mentre w_s è la velocità di sedimentazione del materiale. In questa maniera, conoscendo le caratteristiche del moto ondoso da riprodurre e la scala di riduzione del modello (λ) è possibile valuare il diametro dei sedimenti da impiegare nella costruzione del modello fisico in scala sapendo che $w_{sm} = w_{sp}\sqrt{\lambda}$. La velocità di sedimentazione w_s viene calcolata utilizzando la relazione proposta da Soulsby (1997)

$$w_s = \frac{\nu}{d}\left[\left(10.36^2 + 1.049 D_*^3\right)^{1/2} - 10.36\right] \qquad \text{dove} \qquad D_* = \left[\frac{g\,(s-1)}{\nu^2}\right]^{1/3} d \tag{12}$$

con ν viscosità cinematica del fluido, s rapporto tra la densità del sedimento e dell'acqua, g accelerazione di gavità e d diametro dei sedimenti.

Infine è stato necessario riprodurre in scala i massi naturali impiegati per la realizzazione dei moli di Ponente e di Levante. Secondo quanto illustrato da Hughes (1993) è possibile

utilizzare tre metodi diversi per la riproduzione in scala degli elementi di una mantellata di un'opera costiera. Gli approcci comunemente utilizzato sono il criterio geometrico, quello di Hudson e quello di Sharp e Khader. In particolare per ogni criterio viene imposta l'uguaglianza di un numero di stabilità la cui espressione varia a seconda del criterio:

- Criterio Geometrico

$$(W_a)_p = \frac{(W_a)_p}{N_{Wa}} \quad \text{dove} \quad N_{Wa} = N_{\gamma a}\lambda^3 \quad \text{e} \quad N_{\gamma a} = \frac{(\gamma_a)_p}{(\gamma_a)_m} \tag{13}$$

- Criterio di Hudson (valido anche per la relazione di Van der Meer)

$$\left[\frac{\gamma_a^{1/3} H}{\left(\frac{\gamma_a}{\gamma_w} - 1\right) W_a^{1/3}}\right]_p = \left[\frac{\gamma_a^{1/3} H}{\left(\frac{\gamma_a}{\gamma_w} - 1\right) W_a^{1/3}}\right]_m \quad \text{dove} \quad N_{Wa} = N_{\gamma a}\frac{\lambda^3}{N^3_{(\gamma_a/\gamma_w - 1)}}$$

$$\text{e} \quad N_{(\gamma_a/\gamma_w - 1)} = \frac{(\gamma_a/\gamma_w - 1)_p}{(\gamma_a/\gamma_w - 1)_m} \tag{14}$$

- Criterio di Sharp e Khader

$$\left[\frac{\gamma_a H^3}{\left(\frac{\gamma_a}{\gamma_w} - 1\right) W_a}\right]_p = \left[\frac{\gamma_a H^3}{\left(\frac{\gamma_a}{\gamma_w} - 1\right) W_a}\right]_m \quad \text{dove} \quad N_{Wa} = N_{\gamma a}\frac{\lambda^3}{N^3_{(\gamma_a/\gamma_w - 1)}} \quad . \tag{15}$$

Nelle relazioni (13)-(15) H rappresenta l'altezza d'onda di progetto, W_a rappresenta il peso dell'elemento della mantellata, γ_a e γ_w il peso specifico dei massi e dell'acqua rispettivamente.

4.2 Progettazione del modello

La scala di riduzione del modello fisico della spiaggia di Vernazzola oggetto del presente studio è stata scelta sulla base di considerazioni legate ad una accurata riproduzione dei processi fisici legati alla propagazione e trasformazione del moto ondoso, al trasporto dei sedimenti e alle dimensioni della vasca delle onde presente nel laboratorio del DICCA. Si è deciso quindi di adottare una scala di riduzione geometrica λ pari a 50. Una volta decisa la scala di riduzione geometrica, la similitudine di Froude determina le scale di riduzione delle altre quantità, in particolare il tempo e le velocità vengono riscalati su modello come segue:

$$\tau = \sqrt{\lambda} = 7.07 \qquad v = \sqrt{\lambda} = 7.07 \quad . \tag{16}$$

Come detto in precedenza, i meccanismi di trasporto che si verificano in condizioni di moto ondoso particolarmente significativo sono sia fenomeni di trasporto al fondo, che fenomeni di trasporto in sospensione. Per poter riprodurre il trasporto al fondo si è quindi proceduto alla valutazione della tensione al fondo presente al vero e quindi è stata fatta una valutazione del diametro massimo movimentabile corrispondente sul modello fisico in scala. Le distribuzioni granulometriche dei sedimenti utilizzati per la realizzazione del ripascimento della spiaggia di Vernazzola e di quelli che sono stati utilizzati per la costruzione del modello fisico in scala, realizzato dal DICCA, sono riportate in Figura 13a e 13b rispettivamente. I calcoli relativi alla valutazione dell'entità del trasporto al fondo sono riportati nella Tabella 1 dove H_s è l'altezza d'onda significativa, T_p il periodo di picco, L la lunghezza d'onda locale, d_{50} il diametro medio dei sedimenti, h la profondità locale, U_δ la velocità orbitale in corrispondenza dello strato limite, A_δ l'ampiezza delle traiettorie in corrispondenza dello

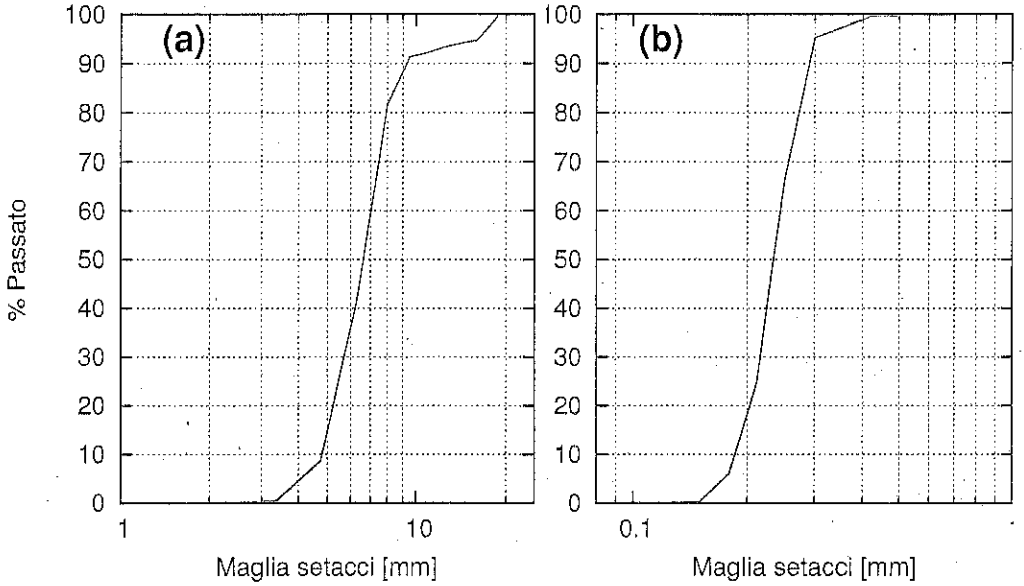

Figura 13: Curve granulometrica dei sedimenti (a) utilizzati per il ripascimento della spiaggia di Vernazzola, (b) utilizzati per la costruzione del modello in scala

strato limite, δ lo spessore dello strato limite al fondo, Re_δ il numero di Reynolds dello strato limite, f_w il coefficiente di attrito adimensionale, θ la tensione al fondo adimensionale.

H_s [m]	T_p [s]	L [m]	d_{50} [mm]	h [m]	U_δ [m/s]	A_δ [m]	δ [mm]	Re_δ	f_w	θ
Grandezze al vero su prototipo										
3.50	10.0	61.0	7.00	4.00	2.59	4.13	1.78	4626	0.01544	0.4806
Grandezze sul modello in scala										
0.07	1.4	1.2	-	0.08	0.37	0.08	0.67	654	0.01150	0.4806

Tabella 1: Grandezze caratteristiche per la progettazione del trasporto di sedimenti al fondo

Per conservare il trasporto al fondo è necessario che $\theta_p = \theta_m$ da cui, si ottiene che il diametro da utilizzare nel modello fisico in scala risulterebbe pari a

$$d_{50}^m = \frac{1}{2} f_w \frac{U_\delta^2}{(s-1)\, g\theta} \simeq 0.1 \text{ mm} \tag{17}$$

dove s è la densità relativa dei sedimenti ($s = \rho_s/\rho$). Prima di procedere oltre è necessario sottolineare alcuni aspetti legati alla modellazione del trasporto solido nei modelli idraulico marittimi. Innanzitutto risulta evidente come sul prototipo e sul modello non si riescano a mantenere gli stessi tipi di regime idraulico (cfr numeri di Reynolds dello strato limite). Mentre nel prototipo infatti si avrà un regime turbolento, non è evidente che la stessa condizione avvenga sul modello fisico. Le condizioni scelte per i calcoli della progettazione, a cui fa riferimento la Tabella 1, sono state scelte per riprodurre le condizioni del moto ondoso verificatesi durante la mareggiata del Dicembre 2009 - Gennaio 2010; la profondità di riferimento corrisponde a una media approssimata tra le profondità di chiusura calcolate con il metodo di Birkemeier (1985) e Hallermeier (1978). Il diametro d_{50}^m da utilizzarsi sul modello corrisponde al minimo diametro movimentabile su una profondità di 4 m da onde

caratterizzate da una altezza significativa di 3.5 m e da un periodo di picco di 10 s. Per profondità inferiori il diametro mobilizzabile risulterà ovviamente maggiore di 0.1 mm

H_s	T_p	Re_δ	$Turb$	f_w	θ	Trn	$Regime$	θ_{inmv}	θ_{mvas}
0.02	0.8	46.4	F	0.01017	0.01393	F	1	0.08350	0.03382
0.02	1.0	55.7	F	0.00972	0.01536	F	1	0.08021	0.03249
0.02	1.2	63.3	F	0.00942	0.01601	F	1	0.07595	0.03076
0.02	1.4	69.9	F	0.00920	0.01631	F	1	0.07184	0.02909
0.02	1.6	75.7	F	0.00902	0.01644	F	1	0.06812	0.02759
0.02	1.8	81.0	F	0.00887	0.01646	F	1	0.06482	0.02625
0.04	0.8	92.8	F	0.00857	0.04698	T	1	0.16699	0.06763
0.04	1.0	111.4	F	0.00820	0.05180	T	1	0.16042	0.06497
0.04	1.2	126.6	F	0.00794	0.05402	T	1	0.15191	0.06152
0.04	1.4	139.7	F	0.00775	0.05503	T	1	0.14368	0.05819
0.04	1.6	151.4	F	0.00760	0.05544	T	6	0.13238	0.06434
0.04	1.8	162.1	F	0.00748	0.05553	T	6	0.12464	0.06058
0.06	0.8	139.2	F	0.00776	0.09567	T	1	0.25049	0.10145
0.06	1.0	167.1	F	0.00742	0.10550	T	6	0.23042	0.11198
0.06	1.2	189.9	F	0.00719	0.11000	T	6	0.21547	0.10472
0.06	1.4	209.6	F	0.00702	0.11206	T	6	0.20283	0.09858
0.06	1.6	227.1	F	0.00688	0.11290	T	6	0.19220	0.09341
0.06	1.8	243.1	F	0.00677	0.11308	T	6	0.18318	0.08903
0.08	0.8	185.6	F	0.00723	0.15845	T	42	0.32706	0.15895
0.08	1.0	222.8	F	0.00691	0.17473	T	42	0.31842	0.15475
0.08	1.2	253.2	F	0.00670	0.18219	T	42	0.30505	0.14825
0.08	1.4	279.4	F	0.00654	0.18560	T	42	0.29161	0.14172
0.08	1.6	302.8	F	0.00641	0.18699	T	42	0.27929	0.13574
0.08	1.8	324.1	F	0.00630	0.18730	T	42	0.26833	0.13041
0.10	0.8	232.0	F	0.00684	0.23436	T	42	0.44023	0.21395
0.10	1.0	278.6	F	0.00654	0.25844	T	42	0.43461	0.21122
0.10	1.2	316.5	F	0.00634	0.26947	T	42	0.42032	0.20428
0.10	1.4	349.3	F	0.00619	0.27452	T	42	0.40466	0.19666
0.10	1.6	378.5	F	0.00607	0.27657	T	42	0.38977	0.18943
0.10	1.8	405.2	F	0.00597	0.27702	T	42	0.37624	0.18285

Tabella 2: Verifica della movimentazione dei sedimenti sul modello fisico in scala. $d_{50}^m = 0.2$ mm; $Turb$ indica il verificarsi di un regime turbolento (V, vero, F, falso); $Regime$ indica il tipo di regime secondo la classificazione proposta da Gentile et al. (2000); θ_{inmv} rappresenta la tensione per l'incipiente movimento del singolo grano mentre θ_{mvas} la tensione per l'inizio del movimento d'assieme. I valori corrispondenti di tensione critica sono $\theta^{cr} = 0.04244$, $\theta_{inmv}^{cr} = 0.04637$ e $\theta_{mvas}^{cr} = 0.09206$

Per poter riprodurre accuratamente anche il trasporto solido in sospensione sarebbe necessario riuscire a conservare il numero di Dean del prototipo anche sul modello fisico in scala. Utilizzando i dati caratteristici del moto ondoso e dei sedimenti della spiaggia di Vernazzola si ottiene quindi un valore del numero di Dean del prototipo pari a $D_p = 1.008$, corrispondente a una velocità di sedimentazione per il modello fisico pari a $w_s^m = 4.9$ cm/s. Utilizzando la relazione di Soulsby (1997) è immediato ricavare il diametro dei sedimenti da

utilizzare per poter riprodurre i processi legati al trasporto in sospensione: $d_{50}^{m} = 0.34$ mm.

Nel modello fisico si è deciso quindi di utilizzare un diametro d_{50}^{m} pari a 0.2 mm, compreso tra i due valori sopra ottenuti (cfr. Figura 13b). Tale dimensione permette di riprodurre in maniera soddisfacente sia il trasporto solido al fondo nella zona di interesse, sulla parte emersa della spiaggia, che il trasporto solido in sospensione nella zona dei frangenti.

Una ulteriore verifica è stata realizzata utilizzando come dati per il calcolo del trasporto i dati del modello in scala, seguendo la classificazione dell'incipiente trasporto e del trasporto di insieme proposto da Gentile et al. (2000) e Scarsi et al. (2001), verificando che il sedimento utilizzato per il modello in scala presentasse caratteristiche di mobilità anche nella zona della spiaggia sommersa (cfr Tabella 2).

La progettazione sul modello in scala degli elementi lapidei utilizzati per la costruzione del molo di Levante e per la rifioritura di quello di Ponente è stata realizzata secondo quanto esposto nella sezione 4.1. Un riepilogo dei risultati ottenuti con questo tipo di approccio è riportato nella Tabella 3 che evidenzia come le differenze ottenute utilizzando i tre modelli siano modeste.

	Peso dei massi [tons]						
	0.5	2	3	4	5	6	7
Geometrico	4.0	16.0	24.0	32.0	40.0	48.0	56.0
Hudson	3.5	13.9	20.8	27.7	34.6	41.6	48.5
Sharp e Khader	3.8	15.3	22.9	30.5	38.1	45.8	53.4

Tabella 3: Riproduzione in scala dei massi della mantellata dei moli della baia di Vernazzola. Tutti i pesi calcolati sono in grammi

4.3 Realizzazione del modello

La costruzione del modello è stata realizzata con la collaborazione dell'Ing. Dario Garcia dell'Universidad de Granada, Spagna, mentre i rilievi con il Laser Scan 3D sono stati realizzati e processati dalla Prof. Bianca Federici del DICCA.

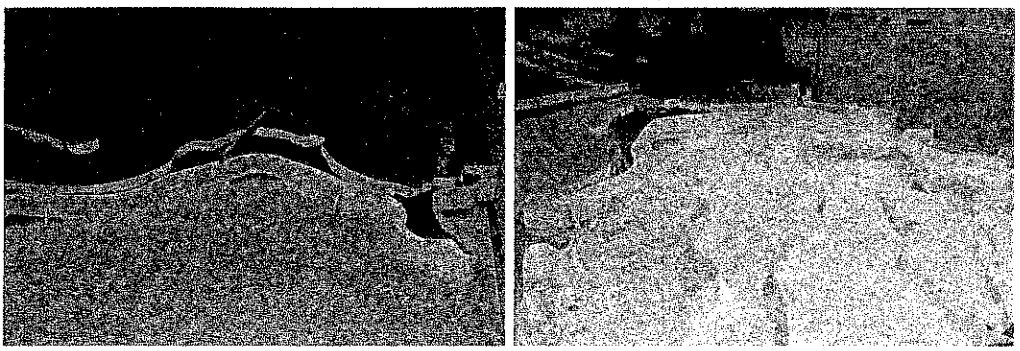

Figura 14: Costruzione del modello in scala della baia di Vernazzola. Realizzazione seste in forex e loro lievllamente con argilla espansa e magrone di cemento

Il modello in scala è stato costruito all'interno della vasca marittima sita nel Laboratorio di Idraulica "Enrico Marchi" del DICCA. All'interno di tale vasca è possibile simulare il moto ondoso sia regolare che irregolare. La realizzazione del modello in scala della spiaggia di Vernazzola è stata condotta sulla base dei rilievi forniti dal committente. In particolare è stata riprodotta la batimetria del paraggio di Vernazzola realizzando delle seste in materiale

plastico (Forex) delle diverse curve batimetriche successivamente rese solidali e livellate tra di loro mediante un riempimento in argilla espansa e una successiva gettata di magrone di cemento (si veda figura 14). Una volta terminata la realizzazione della batimetria del paraggio sono stati costruiti i moli di Ponente e di Levante, utilizzando il materiale lapideo scalato secondo quanto descritto nella sezione 4.2. Infine è stata realizzata la spiaggia di sabbia seguendo le informazioni riportate nel progetto fornito dal committente (si veda figura 15).

Figura 15: Costruzione del modello in scala della baia di Vernazzola. Completamento della batimetria, costruzione dei moli con massi di diversa pezzatura e realizzazione della spiaggia

La generazione del moto ondoso è stata realizzata tramite l'utilizzo di un battitore a parete piana oscillante posizionato all'estremità di valle della vasca. Il battitore consiste in un superficie piana larga 2.90m e alta 0.90m incernierata sul fondo e movimentata da un sistema elettroidraulico retro azionato tramite un'unità di controllo interfacciata a un calcolatore con una scheda di generazione e acquisizione di segnali controllata mediante il software LabVIEW.

L'evoluzione del livello della superficie libera nel tempo è stata monitorata con una serie di sonde resistive posizionate tra il battitore e la riproduzione in scala del paraggio di Vernazzola. In questa maniera è stato possibile rilevare l'evoluzione del moto ondoso prodotto sinteticamente, controllandone le caratteristiche principali (altezza e periodo).

4.4 Taratura della strumentazione e del battitore

Prima della realizzazione di ogni prova è stata effettuata la compensazione dei cavi di collegamento tra le sonde e il Wave Monitor, utilizzato per trasferire il segnale acquisito dalle sonde alla scheda di acquisizione presente sul calcolatore, e la taratura delle sonde stesse. La taratura delle sonde è necessaria per poter realizzare delle misure accurate del livello della superficie libera, in quanto la conduttività dell'acqua varia a seconda del valore della temperatura dell'acqua stessa. Questa operazione viene effettuata variando diverse volte la profondità di immersione della sonda in acqua ferma e rilevando di volta in volta il segnale elettrico. Da queste misure è possibile derivare delle relazioni lineari del tipo $\eta = mV + b$ dove η reappresenta lo scostamento rispetto al livello di quiete, V è l'ampiezza in volt del segnale elettrico, m e b sono il coefficiente angolare e l'intercetta della regressione lineare (vedi figura 16).

Una volta realizzate le rette di taratura per le sonde di misura è quindi possibile procedere alla realizzazione della taratura del battitore in modo da poter associare una data altezza d'onda ad un determinato segnale in Volt inviato dalla scheda di generazione di segnali al battitore. Per poter eseguire la taratura e calibrazione del battitore è necessario realizzare una serie di onde regolari caratterizzate da altezze e periodi diversi (dovuti a diverse intensità e oscillazioni dei segnali elettrici inviati al battitore). Per ogni periodo considerato è stato quindi possibile realizzare una curva di taratura del battitore, mettendo in relazione l'altezza

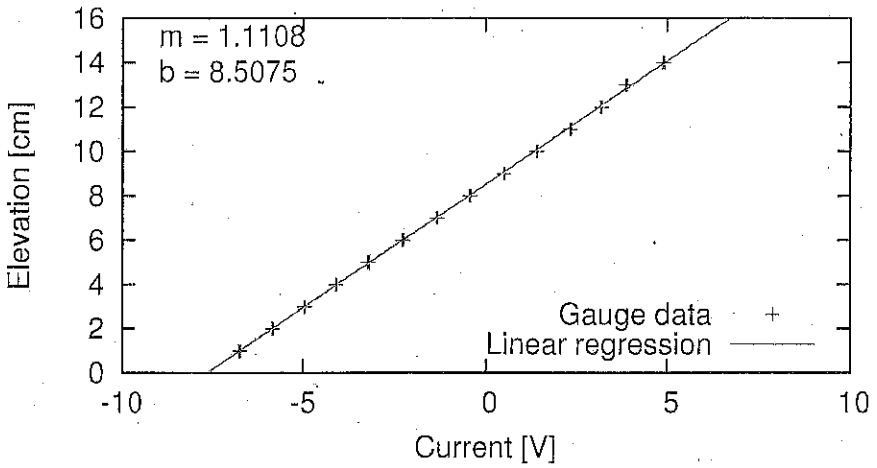

Figura 16: Esempio di regressione lineare utilizzata per la taratura delle sonde di livello resistive impiegate negli esperimenti. Sonda 01

d'onda con l'ampiezza in Volt del segnale elettrico (Figura 17). Una volta realizzate tutte

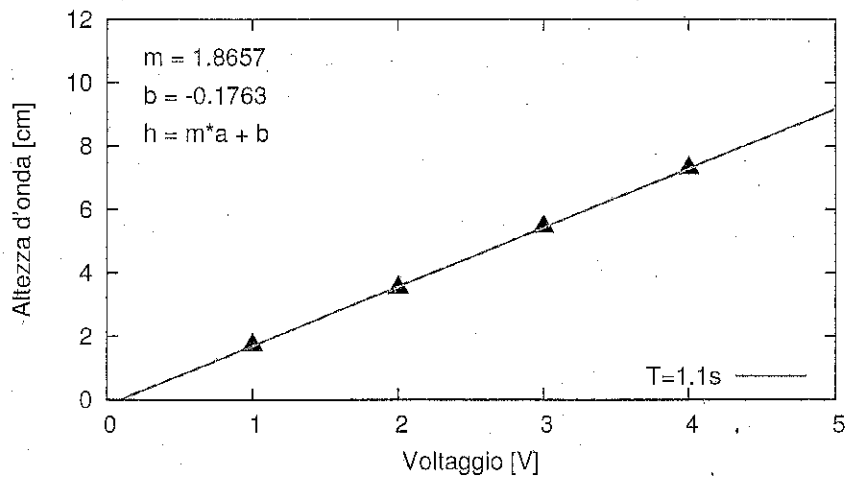

Figura 17: Esempio di curva di taratura del battitore per un periodo pari a 1.1s

le regressioni lineari per ogni singolo periodo è stato possibile aggregare le informazioni ottenute per realizzare una curva di regressione cumulata che metta in relazione il valore dei coefficienti angolari per i singoli periodi come riportato in Figura 18. A partire da questa curva di taratura è possibile introdurre come input un moto ondoso irregolare costruito in maniera casuale a partire da spettri di energia rappresentativi di stati di mare che si susseguono nell'evoluzione di una mareggiata assegnata utilizzando un codice sviluppato appositamente con il software LabView.

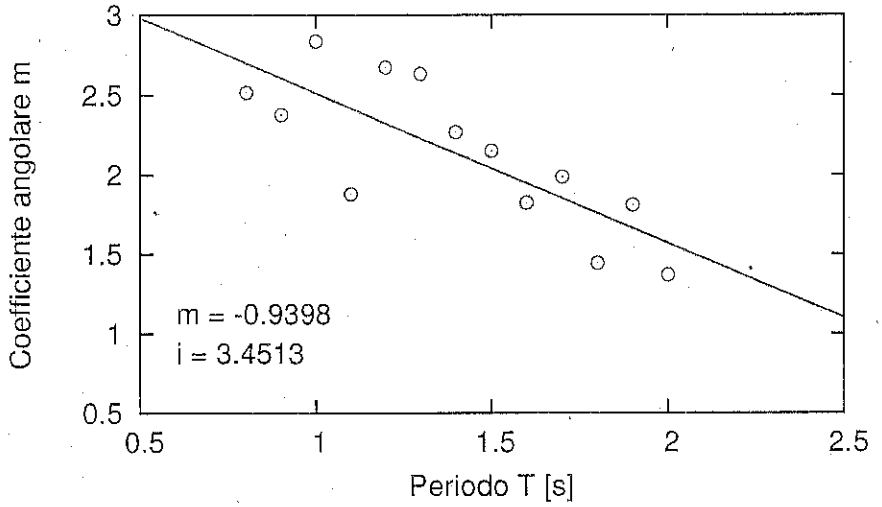

Figura 18: Regressione aggregata per il valore del coefficiente lineare in funzione del periodo d'onda per la taratura del battitore

5 Prove sperimentali

5.1 Evoluzione del ripascimento a seguito della mareggiata di Dicembre 2009 - Gennaio 2010

La prima prova sperimentale effettuata è consistita nel sottoporre il modello fisico, realizzato secondo le condizioni plano-altimetriche verificatesi al termine dell'intervento del 2009, a una mareggiata modellata rispetto all'evento avvenuto nei giorni 28 Dicembre 2009 - 2 Gennaio 2010. Tale evento è stato particolarmente critico dal punto di vista idrodinamico in quanto il modellamento della spiaggia nel corso della mareggiata ha fatto sì che l'azione del moto ondoso provocasse una risalita del getto di riva in grado di provocare danni alle strutture di retrospiaggia. In particolare, la mareggiata presentava condizioni di moto piuttosto severe, sia per quanto riguarda le altezze d'onda (all'incirca si sono raggiunte altezze d'onda spettrali di circa 3.5 metri), ma soprattutto per quanto riguarda i periodi d'onda: tale evento è stato infatti caratterizzato da periodi molto grandi (compresi tra i 12 e 13 secondi) tali da favorire in maniera significativa la risalita del moto ondoso sulla parte emersa della spiaggia, come descritto nella sezione 3.6, e incrementando quindi il grado di distruttività del moto ondoso stesso.

La mareggiata del Dicembre 2009 - Gennaio 2010 è stata ricostruita secondo quanto esposto nel paragrafo 3.5 ed è stata riprodotta nella scala del modello utilizzando la similitudine di Froude. Le caratteristiche della mareggiata in scala, riportata su modello fisico, sono mostrate in Figura 19. Per le prove di laboratorio la mareggiata, molto estesa nel tempo e complessa nella sua evoluzione, è stata interpretata introducendo quattro stati di mare con diverse caratteristiche di moto ondoso e di persistenza. Il primo stato di mare (SM 01) media la fase iniziale della mareggiata, caratterizzata da bassa energia e una persistenza al vero di oltre due giorni; il secondo stato di mare (SM 02) interpreta una seconda fase, in cui l'energia del moto ondoso è in lenta crescita e la durata al vero è di circa due giorni; il terzo stato di mare (SM 03) interpreta la fase più gravosa, con forte aumento dell'altezza d'onda e soprattutto del periodo e persistenza di circa 12 ore. Questo stato di mare rappresenta la fase nella quale si sono manifestati i danni. Infine l'ultimo stato di mare (SM 04) rappresenta la fase decrescente della mareggiata, con valori minori di altezza d'onda e di periodo e persistenza al vero di circa un giorno.

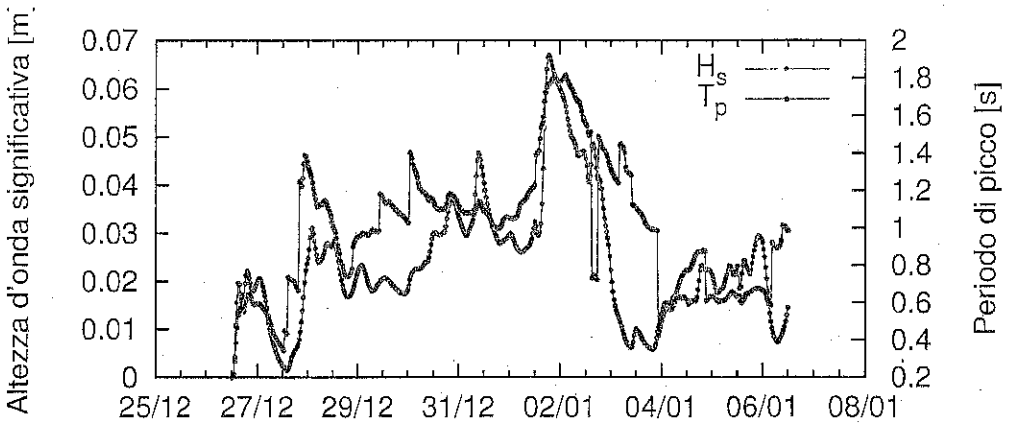

Figura 19: Mareggiata del Dicembre 2009 - Gennaio 2010 riprodotta in scala

I valori di altezza d'onda spettrale, periodo di picco e persistenza corrispondenti ai quattro stati di mare sopra descritti, utilizzati per la simulazione numerica delle time histories di input al battitore, sono indicati, nella scala del modello, in Tabella 4.

	SM 01	SM 02	SM 03	SM 04
H_s [m]	0.025	0.035	0.06	0.05
T_p [s]	1.0	1.1	1.8	1.5
D_{SM} [h]	8.5	6.8	1.7	5.1

Tabella 4: Caratteristiche della mareggiata scalata su modello fisico. H_s altezza significativa, T_p periodi di picco, D_{SM} persistenza dello stato di mare

Gli esperimenti sono quindi stati eseguiti simulando in sequenza i quattro stati di mare identificati, per durate corrispondenti alla persistenza. Durante le prove sono state eseguite riprese fotografiche e al termine della sperimentazione relativa a ogni di stato di mare è stato eseguito un rilievo della spiaggia emersa e sommersa con il Laser Scan 3D per consentire una corretta valutazione dei fenomeni di erosione/accrescimento prodotti dal moto ondoso in esame sul litorale di Vernazzola.

Nelle Figure 20-23 è riportata parte della documentazione fotografica relativa ai diversi stati di mare simulati e all'assetto plano-altimetrico della spiaggia di Vernazzola durante l'esperimento di riproduzione della mareggiata del Dicembre 2009 - Gennaio 2010. Nella Figura 20 il pannello di sinistra mostra la configurazione della spiaggia prima della mareggiata mentre il pannello di destra evidenzia l'azione del moto ondoso nella fase iniziale (SM 01). La configurazione raggiunta dalla spiaggia al termine di questa fase è rappresentata dal pannello di sinistra della Figura 21 il quale mostra che è stata modellata una limitata porzione della spiaggia emersa, sufficiente per evidenziare la formazione di una tipica pocket beach limitata da moli convergenti. In questa fase le onde non raggiungono le strutture di retrospiaggia.

L'azione della seconda fase (SM 02), rappresentata dal pannello di destra della Figura 21, evidenzia una maggiore risalita delle onde. Si osserva un incremento della altezza d'onda nella zona centrale dove il moto ondoso risente della presenza della corrente di ritorno che si concentra in corrispondenza del varco tra le due testate, leggermente spostata verso levante.

Questi fenomeni vengono notevolmente accentuati durante la terza fase (SM 03), come mostra il pannello di sinistra della Figura 22. Le onde più alte frangono quasi in corrispondenza delle testate dei due moli, ma permane l'impicchimento già riscontrato nelle fasi

precedenti dovuto alla presenza della corrente di ritorno. L'effetto congiunto dell'incremento dell'altezza d'onda e del periodo si traduce in una risalita della lama d'acqua che determina una forte azione dinamica contro il muro centrale (danneggiato al vero) e in un importante accumulo di materiale sulla spiaggia emersa. L'azione diretta delle onde sulla spiaggia e quella determinata dal sormonto quasi continuo di entrambi i pennelli conducono a forti fenomeni di erosione nella zona intorno alla linea di riva. Il pannello di destra della Figura 22 mostra la spiaggia al termine di questa fase: il materiale di ripascimento è accumulato su tutta la spiaggia emersa e in particolare nella zona centrale, mentre non si manifesta alcun trasporto di materiale fuori delle testate; questi fenomeni rispecchiano quanto è avvenuto al vero.

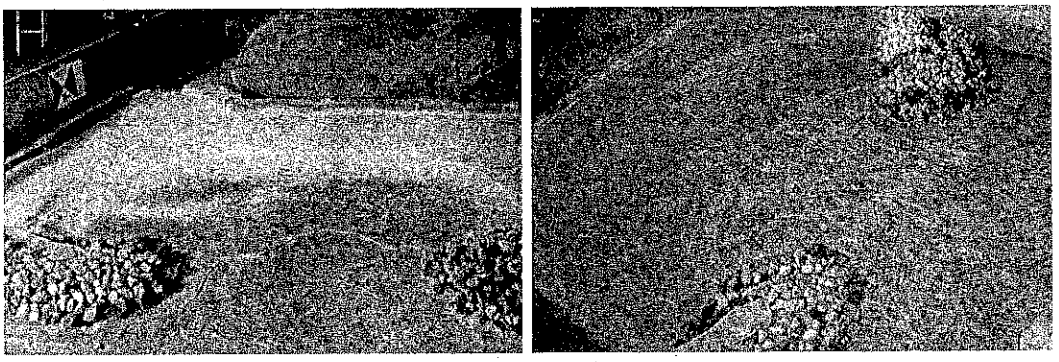

Figura 20: Riproduzione mareggiata Gennaio 2010 - Sinistra: Condizione iniziale del ripascimento della spiaggia di Vernazzola su modello fisico; Destra: propagazione dello stato di mare SM 01 all'interno della spiaggia di Vernazzola

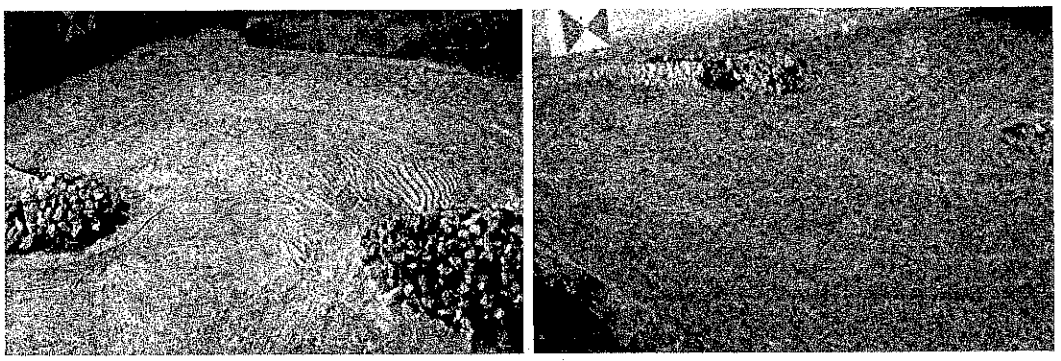

Figura 21: Riproduzione mareggiata Gennaio 2010 - Sinistra: configurazione plano-altimetrica al termine dell'azione dello stato di mare SM 01; Destra: propagazione dello stato di mare SM 02 all'interno della spiaggia di Vernazzola

L'ultima parte della mareggiata (stato di mare SM 04) presenta altezze d'onda e periodi non particolarmente gravosi pertanto la sua azione porta a un semplice rimodellamento della zona di swash. Il litorale sotto l'azione di questo stato di mare e la configurazione finale raggiunta al termine della intera prova sono rappresentati in Figura 23.

La prova sperimentale sopra descritta, condotta assoggettando il modello della spiaggia a successivi stati di mare che riproducono la mareggiata del Dicembre 2009 - Gennaio 2010, ha evidenziato come il modello sia in grado di riprodurre nel suo complesso il fenomeno idrodinamico che si verifica al vero, realizzando in particolare: l'erosione della zona di swash, con arretramento della linea di riva, l'accumulo di materiale sulla spiaggia emersa,

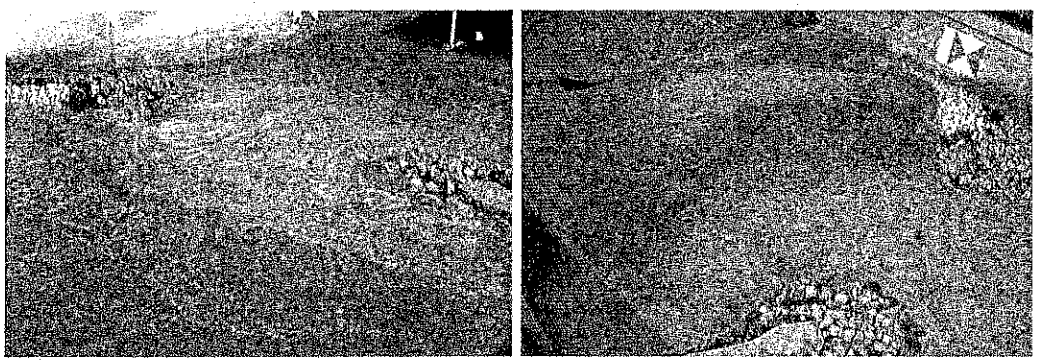

Figura 22: Riproduzione mareggiata Gennaio 2010 - Sinistra: propagazione dello stato di mare SM 03 all'interno della spiaggia di Vernazzola; Destra: configurazione plano-altimetrica al termine dello stato di mare SM 03

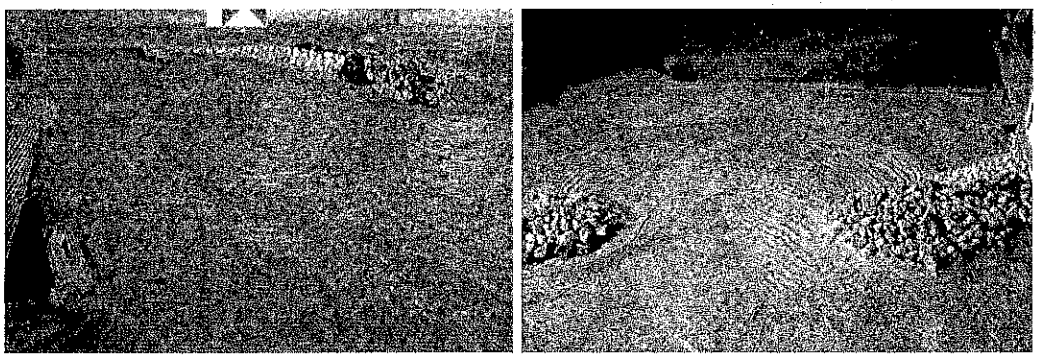

Figura 23: Riproduzione mareggiata Gennaio 2010 - Sinistra: propagazione stato di mare SM 04 all'interno della spiaggia di Vernazzola; Destra: configurazione plano-altimetrica a fine prova

l'azione diretta del getto sul muro retrospiaggia. Da un punto di vista sia qualitativo che quantitativo i processi di erosione e/o deposito del materiale utilizzato per il ripascimento riprodotti su modello, sono stati valutati in seguito alla realizzazione di rilievi topografici della configurazione altimetrica della spiaggia a inizio e fine esperimento, tramite l'utilizzo del Laser Scan 3D del DICCA. Sottraendo alla configurazione finale della spiaggia la configurazione di inizio esperimento è possibile quindi apprezzare le zone caratterizzate da erosione e quelle caratterizzate da accrescimento. In Figura 24 sono riportate in blu le aree affette da erosione e in rosso quelle interessate da deposito degli stessi. È possibile rilevare come il trend osservato qualitativamente nel materiale fotografico sopra riportato sia confermato anche dalle valutazioni quantitative realizzate con l'analisi dei dati del Laser Scan. L'azione del moto ondoso infatti tende a mobilitare il sedimento dalla zona del bagnasciuga e dalla zona meno profonda della spiaggia sommersa verso la spiaggia emersa, riempendo quindi in altezza lo spazio prospicente al muro posto a protezione delle abitazioni. Tale effetto è osservabile anche andando a realizzare dei profili lungo tre sezioni della spiaggia (la localizzazione di tali profili è indicata in Figura 24 con rette nere nella zona di ponente, centrale e di levante della baia), i cui profili altimetrici sono riportati in Figura 25. In particolare è possibile osservare come il profilo corrispondente alla prima parte della mareggiata SM 01, ovvero quella con onde di altezza e periodo minori, viene significativamente modificato in seguito alle ondazioni degli stati di mare SM 02 e SM 03. Dal pannello centrale di Figura 25 è possibile apprezzare come il materiale sabbioso venga prelevato nella zona di swash e

venga depositato in prossimità del muro di retrospiaggia, fino al completo intasamento del fronte del muro stesso. Le zone di ponente (pannello in alto) e di levante (pannello in basso) sono lievemente meno interessate da questo fenomeno.

Verificato quindi che il modello è appropriato a riprodurre il fenomeno idrodinamico, si può procedere a nuove sperimentazioni, sia con il modello deformato per riprodurre la situazione che si è venuta a creare dopo l'evento sopracitato, sia introducendo nel modello stesso eventuali nuovi interventi.

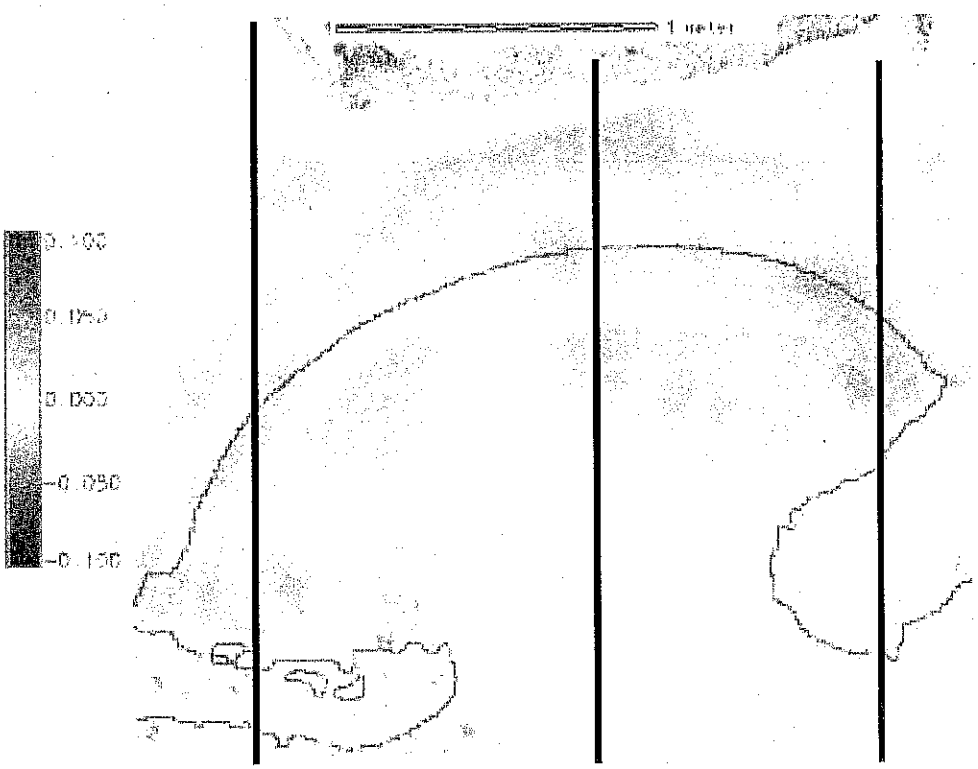

Figura 24: Rilievo Laser Scan: erosione/accrescimento in seguito alla mareggiata del Dicembre 2009 - Gennaio 2010

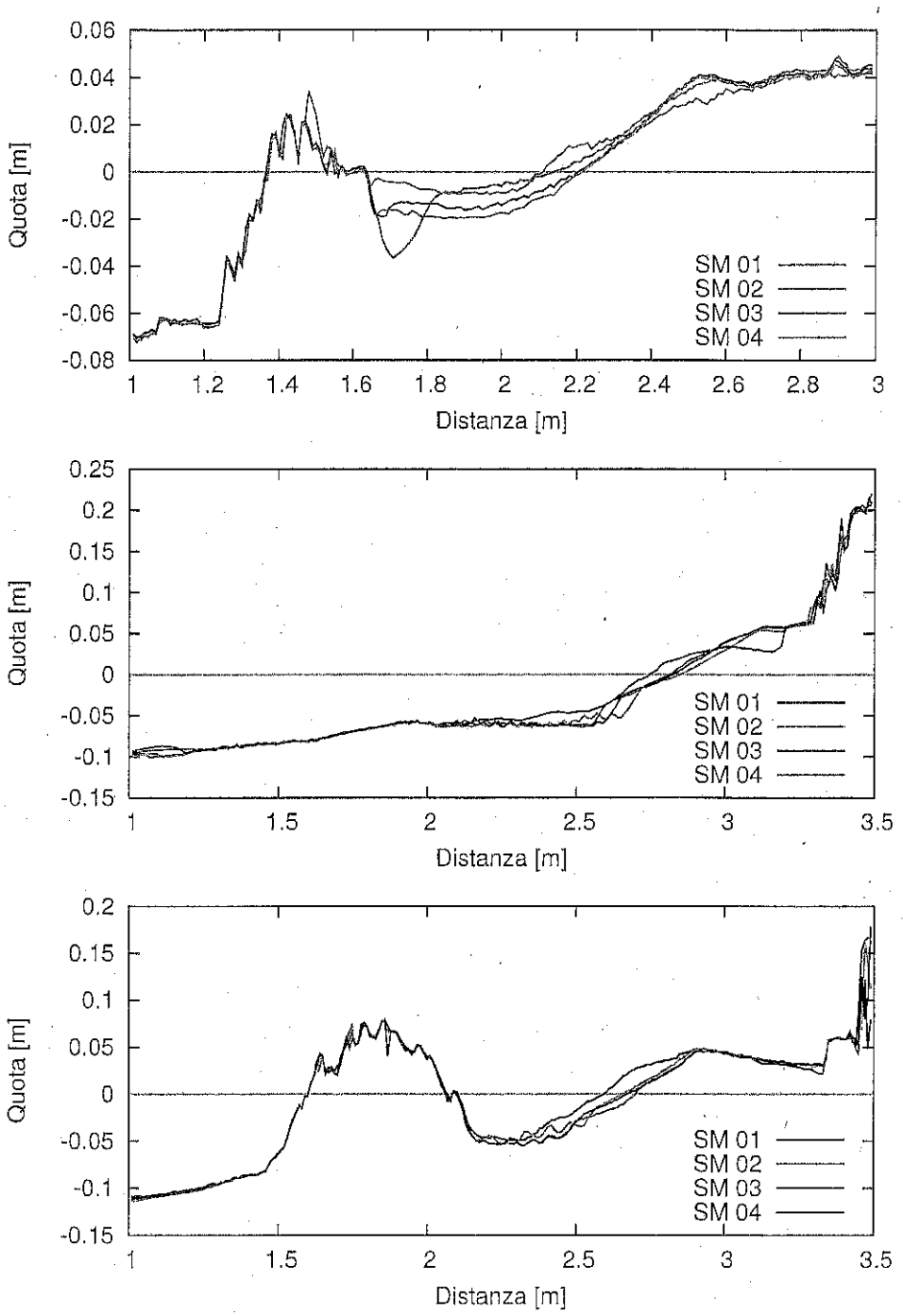

Figura 25: Riproduzione mareggiata Gennaio 2010 - Evoluzione morfodinamica della spiaggia di Vernazzola in corrispondenza di tre transetti (Sopra: Ponente; Centro: Centro baia; Sotto: Levante)

5.1.1 Situazione attuale e possibili interventi

Dopo gli interventi di asporto di materiale dalla spiaggia emersa per liberare le strutture di retrospiaggia e abbassare quindi le quote della spiaggia emersa, le mareggiate, di non grande intensità, che hanno interessato dal 2010 a oggi il litorale di Vernazzola, hanno provocato un graduale ma continuo accumulo di materiale del ripascimento che presenta ora una ripida berma su tutto l'arco dell'insenatura. Nella parte centrale la berma inizia a meno di 20 metri dal muro retrostante, con materiale alla quota di quasi 4m contro lo stesso, come evidenziato nella foto di Figura 12, eseguita durante un sopralluogo effettuato il 4 Febbraio 2013.

La configurazione assunta dalla spiaggia emersa evidenzia l'impossibilità del materiale di ripascimento di diffondersi nella spiaggia sommersa. Non si ha infatti perdita di materiale del ripascimento verso mare, ma arretramento e accumulo verso terra. L'attuale configurazione, in presenza di mareggiate severe, soprattutto con grandi periodi, orientativamente 10-12 secondi, convoglia la risalita del getto nella zona centrale della spiaggia, con possibili danni alle strutture retrostanti come evidenziato nell'indagine teorica sopra sviluppata.

Si evidenzia quindi la necessità di valutare possibili modifiche all'intervento eseguito nel 2009 nell'intento di dare al litorale di Vernazzola un assetto che non richieda ripetuti interventi di asporto di materiale per abbassare la quota della spiaggia emersa e renda meno esposta sia la spiaggia sia i muri di retrospiaggia.

Durante l'incontro presso il Laboratorio del DICCA, avvenuto l'11 Dicembre 2012, alla presenza dell'ing. Pinasco e l'ing. Vestrelli del Comune di Genova, sono stati presi accordi per sperimentare sul modello tre diverse modifiche

i) asportazione del materiale del ripascimento per abbassare notevolmente il livello in prossimità del muro di retrospiaggia;

ii) realizzazione di una barriera soffolta in corrispondenza della bocca tra le testate dei moli per ridurre l'energia del moto ondoso forzando il frangimento;

iii) realizzazione di una barriera soffolta analoga alla precedente, ma con varco centrale per favorire il passaggio delle imbarcazioni.

5.2 Intervento 1: asportazione del materiale del ripascimento

Il primo intervento realizzato sul modello fisico della spiaggia di Vernazzola è consistito nell'asportazione di circa un terzo dei volumi del materiale di ripascimento nella zona centrale della baia. Si voleva infatti sperimentare se una eventuale asportazione di materiale avrebbe limitato l'entità dell'accumulo di sedimenti nella parte della spiaggia antistante le strutture danneggiate durante l'evento di Dicembre 2009 - Dicembre 2010.

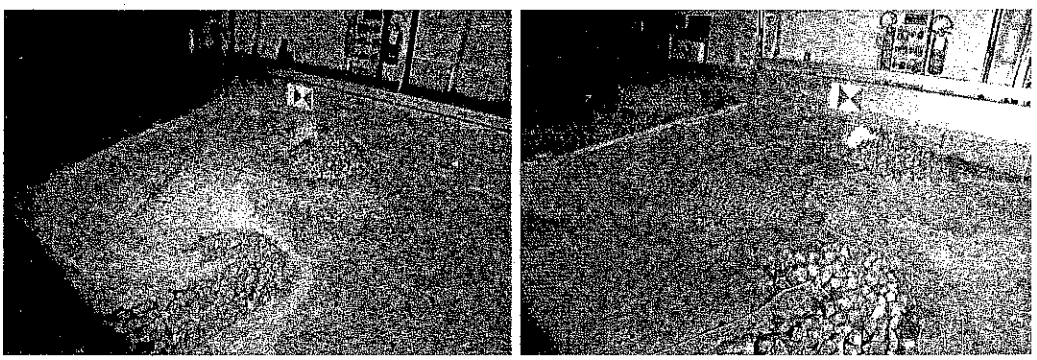

Figura 26: Intervento 1 - Rimozione parziale del materiale sabbioso. Sinistra: configurazione iniziale; Destra: propagazione dello stato di mare SM 01 all'interno della spiaggia di Vernazzola

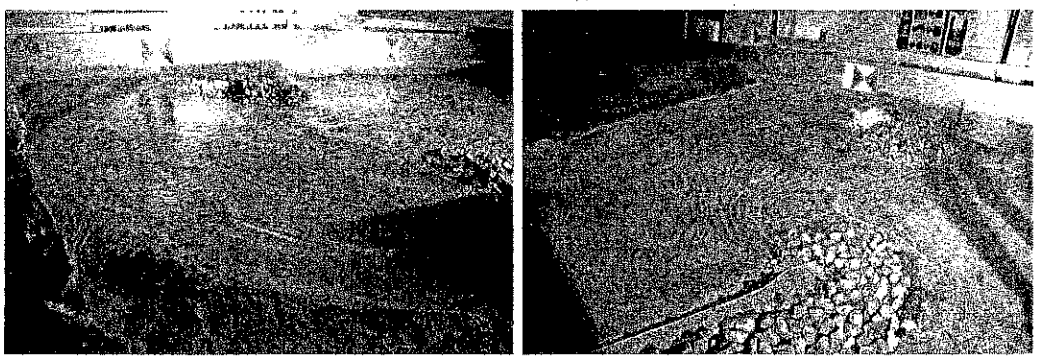

Figura 27: Intervento 1 - Rimozione parziale del materiale di ripascimento. Sinistra: propagazione dello stato di mare SM 02 all'interno della spiaggia di Vernazzola; Destra: configurazione plano altimetrica al termine dell'azione dello stato di mare SM 02

La nuova configurazione plano altimetrica prevedeva quindi volumi ridotti nella zona centrale della spiaggia, come è possibile osservare nel pannello di sinistra della Figura 26. È possibile osservare come il muro retrospiaggia corrispondente alle strutture danneggiate sia stato ripulito dal materiale accumulato nel precedente esperimento per riprodurre una configurazione plano-altimetrica che si verrebbe a verificare in seguito a interventi di manutenzione dell'arenile con redistribuzione e/o rimozione del materiale sabbioso.

Analogamente con quanto rilevato nel primo esperimento, lo stato di mare SM 01 non è in grado di apportare variazioni significative alla morfologia della spiaggia emersa, ma modifica solo la zona più prossima alla linea di riva (pannello di destra, Figura 26).

Le Figure 27-28 mostrano la propagazione del moto ondoso e l'evoluzione della spiaggia in seguito alla simulazione degli stati di mare SM 02 e SM 03. La dinamica del moto ondoso all'interno della baia non cambia significativamente rispetto a quanto osservato durante il

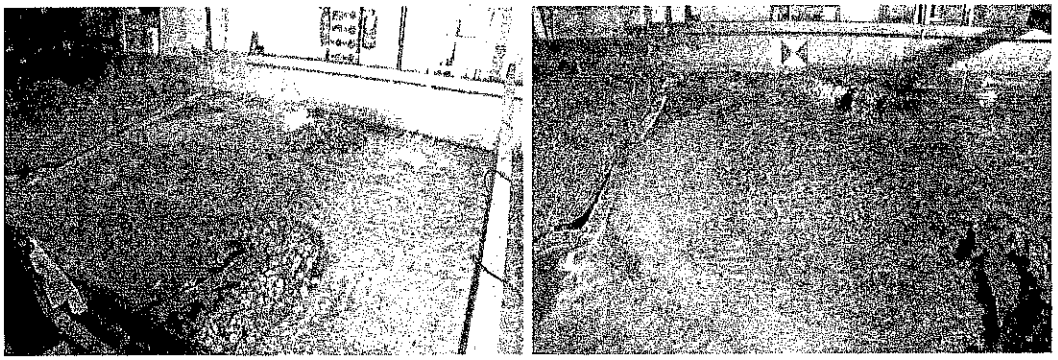

Figura 28: Intervento 1 - Rimozione parziale del materiale di ripascimento. Propagazione dello stato di mare SM 03 all'interno della spiaggia di Vernazzola

primo esperimento. Inoltre, la limitazione del volume disponibile per le variazioni morfodinamiche dell'arenile non impedisce un'evoluzione della spiaggia emersa del tutto simile a quella già osservata durante la riproduzione della mareggiata del Dicembre 2009 - Gennaio 2010. Infatti, pur avendo asportato volumi significativi di materiale del ripascimento, durante la sollecitazione dello stato di mare SM 03 il moto ondoso rimane in grado di mobilitare una grande quantità di materiale e la lama d'acqua riesce a raggiungere le strutture di retrospiaggia. L'efficacia dell'azione dinamica al vero ai fini di determinare l'eventuale danno non è quantificabile dal modello (cfr Figure 27-28).

Da un punto di vista della movimentazione del materiale utilizzato per il ripascimento è possibile osservare una tendenza analoga a quanto osservato per le condizioni indisturbate analizzate nella sezione precedente: erosione della sabbia nella zona di swash e deposito della stessa sulla zona della spiaggia emersa (vedasi rispettivamente l'estensione delle aree blu e rosse riportate in Figura 29). Sia dal rilievo planimetrico che dalle sezioni trasversali realizzate in tre posizioni differenti, è possibile osservare come la riduzione del materiale presente nella spiaggia non riduce o attenua l'accumulo di sedimenti contro il muro retrospiaggia (si veda il pannello di mezzo di Figura 30 dove sono riportati i profili della spiaggia rilevati successivamente alla simulazione in vasca dei diversi stati di mare (SM 01, SM 02, SM 03 e SM 04).

Per avere una valutazione più accurata delle differento risposte ottenibili dalle diverse soluzioni progettuali si rimanda alla sezione conclusiva della relazione, ove verranno analizzate le differenze tra le configurazioni altimetriche finali risultanti dalle diverse soluzioni progettuali.

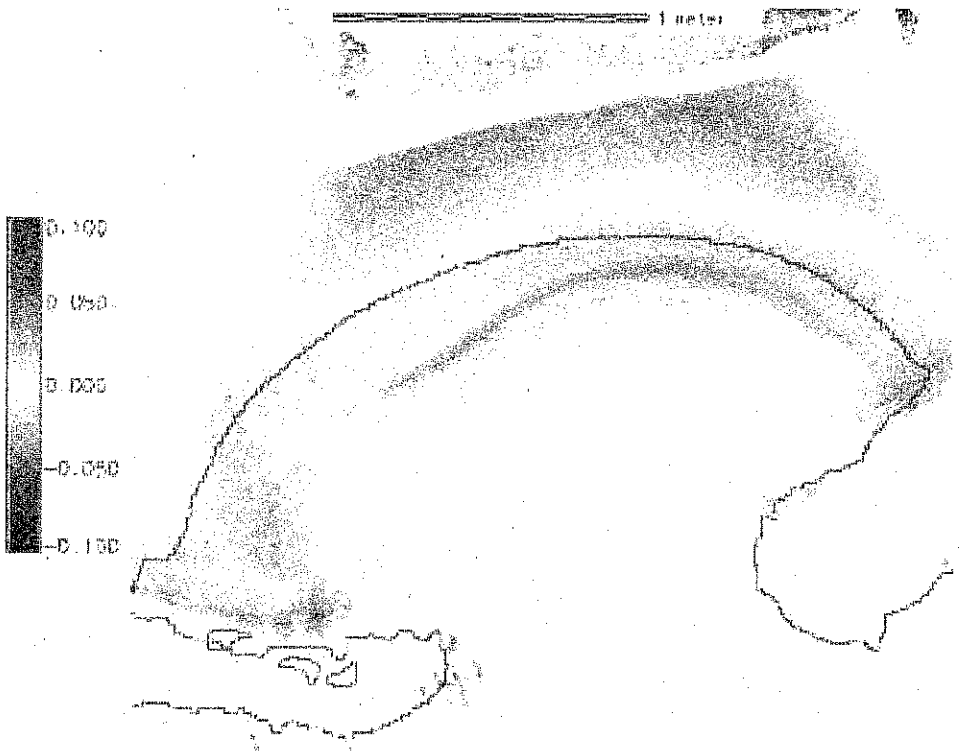

Figura 29: Rilievo Laser Scan: erosione/accrescimento in seguito alla realizzazione dell'intervento 1.

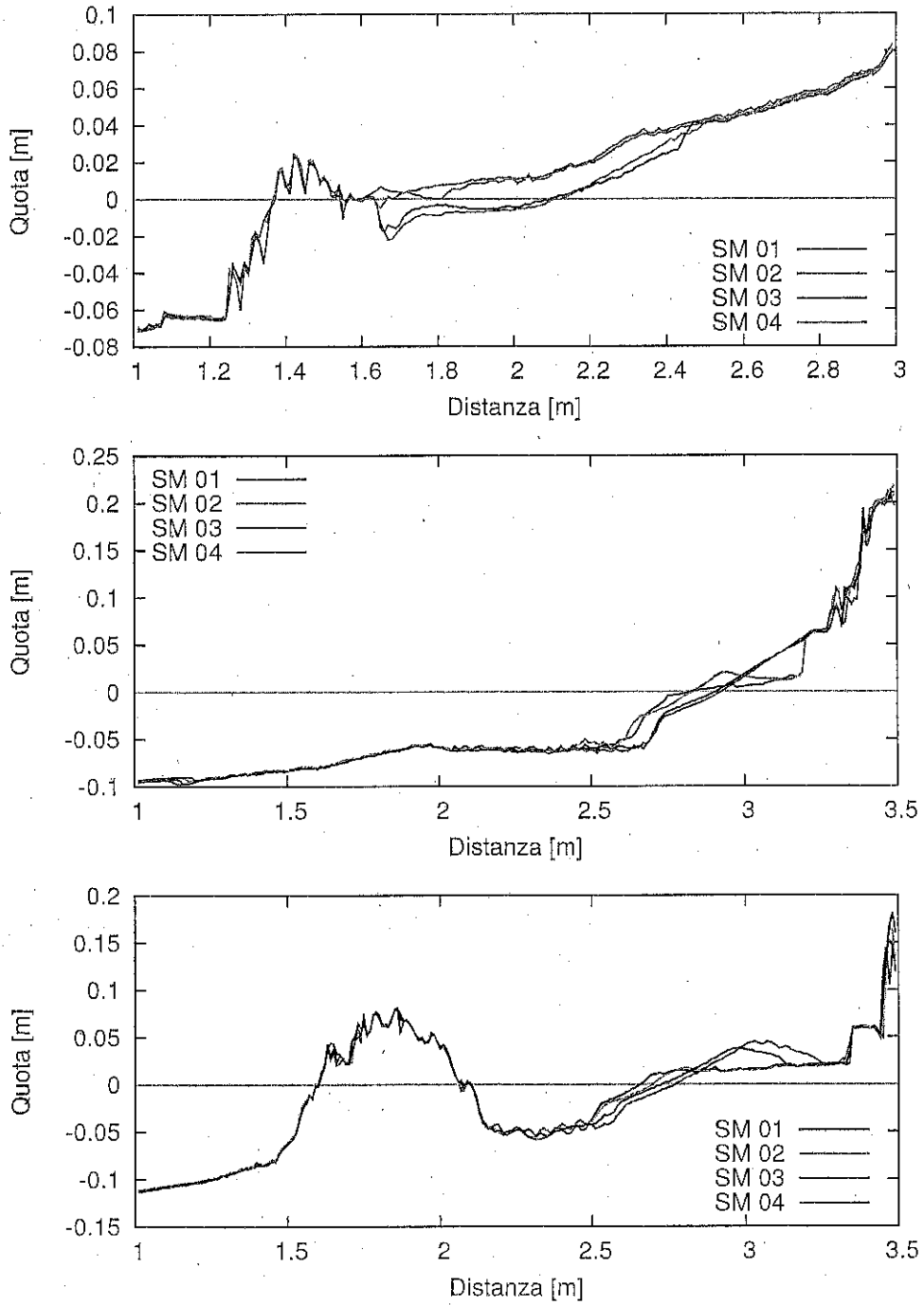

Figura 30: Intervento 1 - Evoluzione morfodinamica della spiaggia di Vernazzola in corrispondenza di tre transetti (Sopra: Ponente: Centro: Centro baia; Sotto: Levante)

5.3 Intervento 2: realizzazione di una scogliera soffolta continua tra le testate dei moli

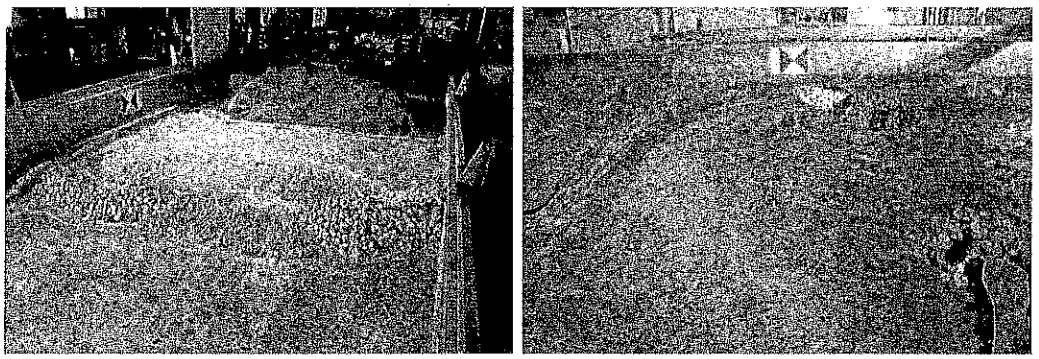

Figura 31: Intervento 2 - Realizzazione di una barriera soffolta continua tra le testate dei moli. Sinistra: configurazione iniziale; Destra: propagazione dello stato di mare SM 01 all'interno della spiaggia di Vernazzola

Il secondo intervento è consistito nella realizzazione di una barriera soffolta in corrispondenza delle testate dei moli in modo da smorzare l'energia del moto ondoso in grado di raggiungere la battigia e quindi limitare il trasporto di sedimenti sulla spiaggia emersa per evitare l'accumulo di fronte alle strutture di retrospiaggia. La barriera soffolta, realizzata con massi di massa nominale di circa 30 grammi, è stata realizzata in modo da lasciare una profondità sulla sua sommità di circa 3.5cm sul modello in scala (al vero quindi circa 1.75m) in modo da innescare il frangimento delle onde più alte e contemporaneamente lasciare un'area sufficientemente estesa per il ricambio d'acqua e per il passaggio della corrente di ritorno.

Per quanto riguarda la fase iniziale della mareggiata (stato di mare SM 01), il moto ondoso non presenta caratteristiche tali da risentire della presenza della barriera (vedi Figura 31).

Figura 32: Intervento 2 - Realizzazione di una barriera soffolta continua tra le testate dei moli. Propagazione dello stato di mare SM 02 all'interno della spiaggia di Vernazzola

Nelle fasi più severe della mareggiata, invece, la barriera gioca un ruolo predominate in quanto provoca il frangimento localizzato delle onde più alte, anche di quelle che hanno già franto nella zona antistante la bocca tra i due moli. In particolare è possibile osservare come sia durante l'azione dello stato di mare SM 02 che durante l'azione dello stato di mare SM 03, le onde tendano a frangere in corrispondenza della barriera soffolta con una linea dei frangenti che si sviluppa contemporaneamente lungo tutto l'arco del fronte d'onda (vedi Figure 32 e 33). La riduzione conseguente di energia delle onde attive sulla spiaggia fa sì che si riduca la quantità di sedimenti trasportati sulla spiaggia emersa, quindi che l'accumulo di sedimenti

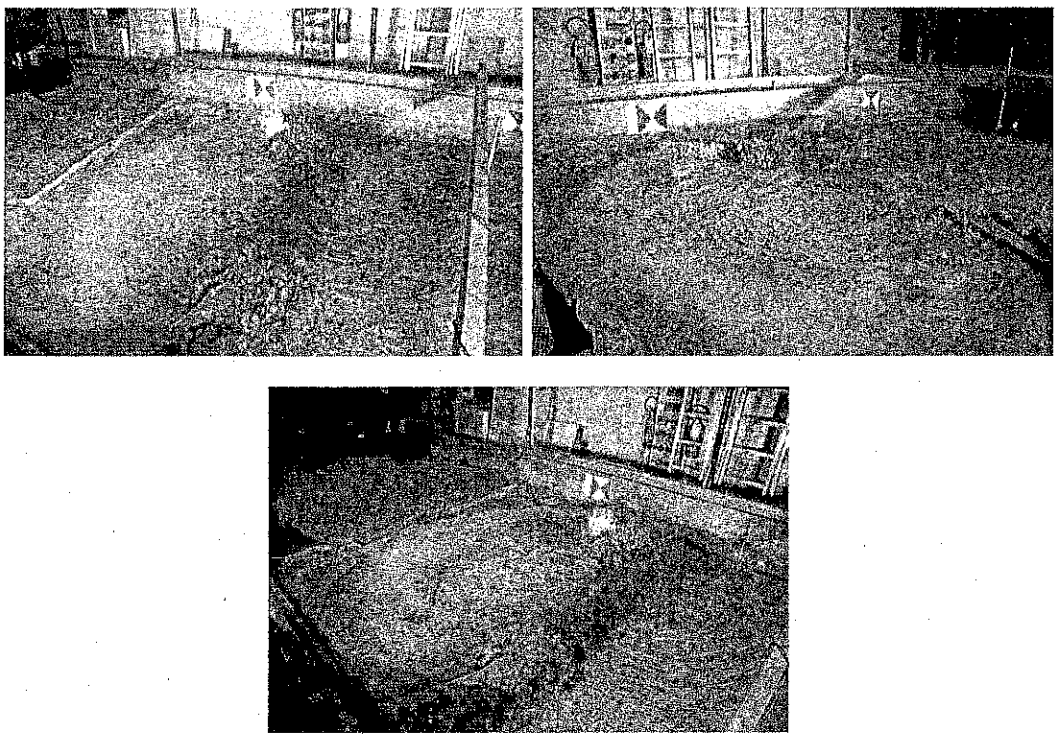

Figura 33: Intervento 2 - Realizzazione di una barriera soffolta continua tra le testate dei moli. Propagazione dello stato di mare SM 03 all'interno della spiaggia di Vernazzola

sia di minore entità rispetto ai due casi precedenti. Inoltre il getto di riva raggiunge solo raramente il muro retrostante. Data la configurazione della spiaggia di Vernazzola l'accumulo risulta comunque sempre concentrato nella parte centrale della spiaggia, come evidenziato nel pannello centrale inferiore di Figura 33.

Tale tipologia di intervento può quindi rappresentare una valida alternativa per limitare sia l'entità dell'accumulo di sedimenti in prossimità delle strutture di retrospiaggia sia l'azione del moto sulle stesse. La prova sperimentale suggerisce comunque che questa misura potrebbe non essere risolutiva in quanto, pur se ridotto significativamente rispetto alle condizioni esposte in precedenza, persiste l'accumulo di sedimenti e la modellazione della spiaggia emersa con formazione della rampa per la lama d'acqua di risalita del moto ondoso e le strutture di retrospiaggia vengono comunque lambite dal getto di riva, seppure con una azione dinamica certamente minore. Occorre inoltre tenere presente che la barriera soffolta è molto efficace su onde di modesto e medio periodo ma poco su onde di lungo periodo, quindi in presenza di mareggiate che presentino lunga persistenza di onde con grandi periodi potrebbe rivelarsi poco efficace.

La movimentazione dei sedimenti in pianta è riassunta in Figura 34 dove viene presentata la differenza di quota tra la configurazione altimetrica finale e quella rilevata a inizio esperimento. Come nei casi precedenti la sabbia del ripascimento viene mobilitata nella zona di swash e nella prima parte della spiaggia sommersa per essere depositata nella zona emersa della spiaggia, producendo nuovamente l'accumulo di sedimenti di fronte al muro di retrospiaggia. Da una prima osservazione è però osservabile come l'estensione e l'entità del deposito appaiono inferiori rispetto ai due casi esaminati precedentemente. I profili della spiaggia, riportati in Figura 35, rivelano come nella zona centrale della spiaggia l'accumulo dei sedimenti possa comunque raggiungere il limite del muro di retrospiaggia, come verificatosi nell'evento di mareggiata del Dicembre 2009 - 2010, mentre è sensibilmente ridotta

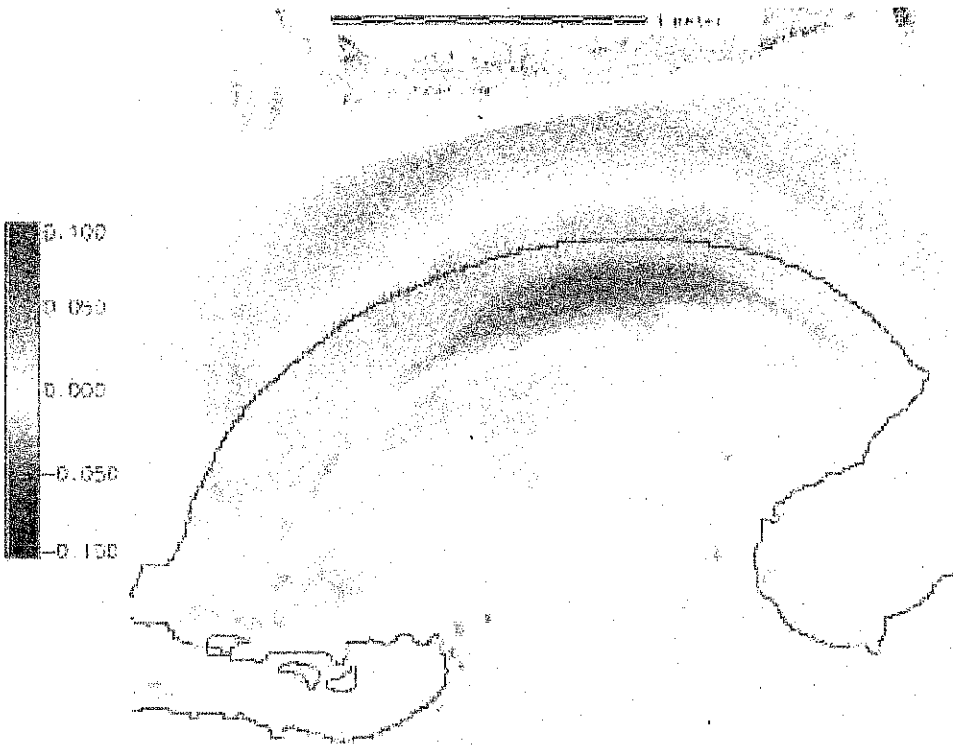

Figura 34: Rilievo Laser Scan: erosione/accrescimento in seguito alla realizzazione dell'intervento 2

l'azione erosiva nella zona di Ponente. La variazione spaziale-planimetrica dell'accumulo rispetto alla configurazione indisturbata (senza barriera di protezione) sarà meglio evidenziata nella sezione conclusiva.

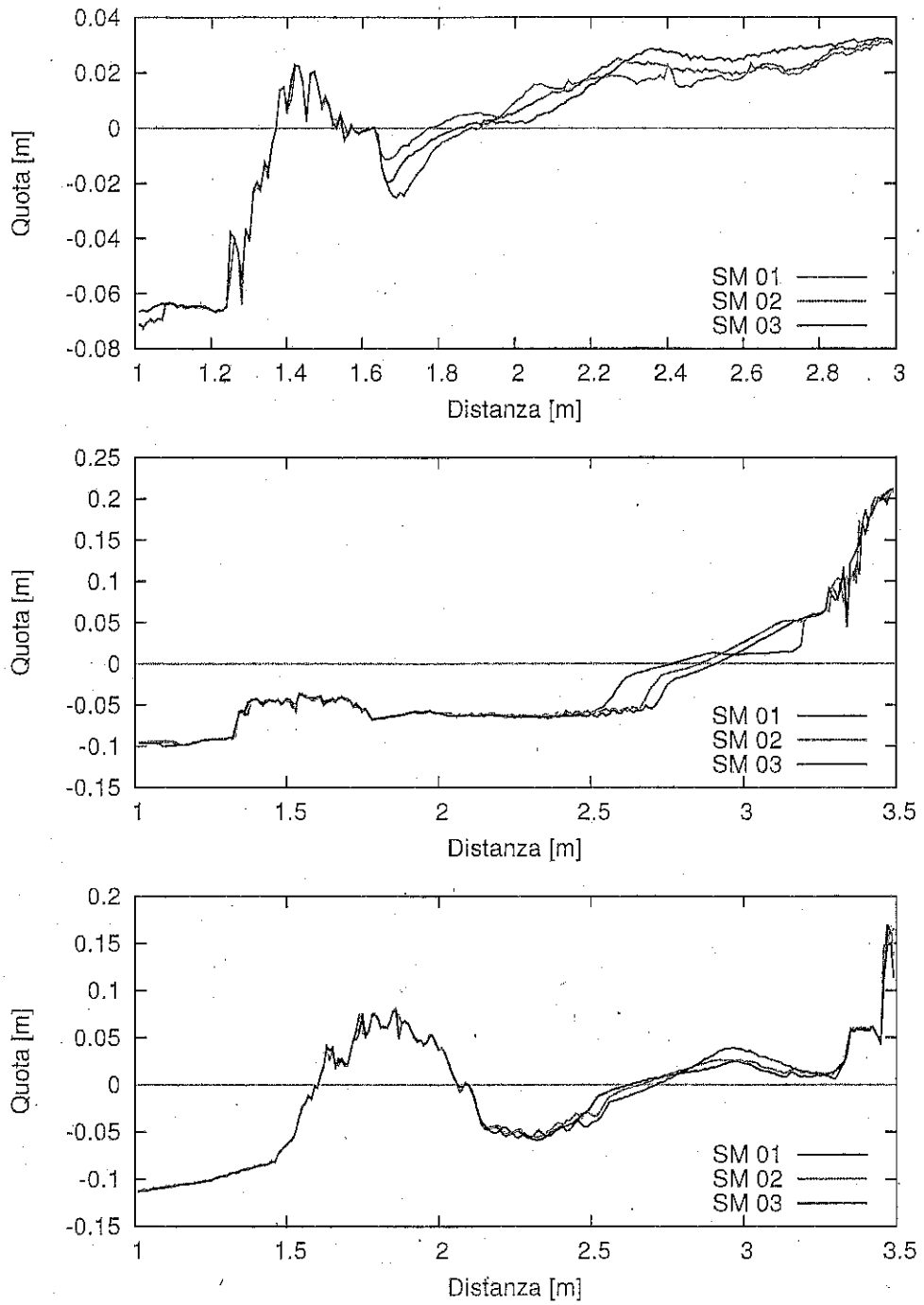

Figura 35: Intervento 2 - Evoluzione morfodinamica della spiaggia di Vernazzola in corrispondenza di tre transetti (Sopra: Ponente; Centro: Centro baia; Sotto: Levante)

5.4 Intervento 3: realizzazione di una scogliera soffolta in corrispondenza della bocca tra i moli con varco centrale per l'accesso delle imbarcazioni

Il terzo intervento è stato realizzato sul modello basandosi su una configurazione del tutto simile a quella impiegata per l'intervento 2, aprendo però un varco nel mezzo della barriera soffolta sia per permettere il transito in sicurezza delle imbarcazioni da e verso lo scalo sito a Levante, sia per aumentare il ricambio dell'acqua per evitare ristagno in condizioni di calma (vedi Figure 41 e 42).

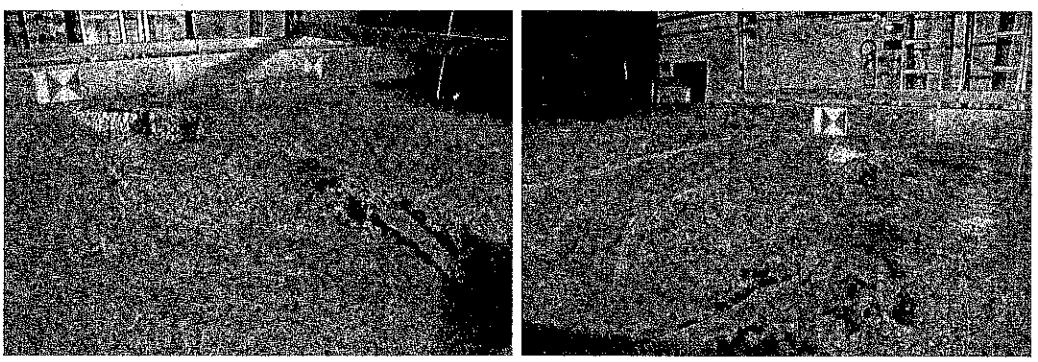

Figura 36: Intervento 3 - Realizzazione di una barriera soffolta con varco centrale tra le testate dei moli. Propagazione dello stato di mare SM 02 all'interno della spiaggia di Vernazzola

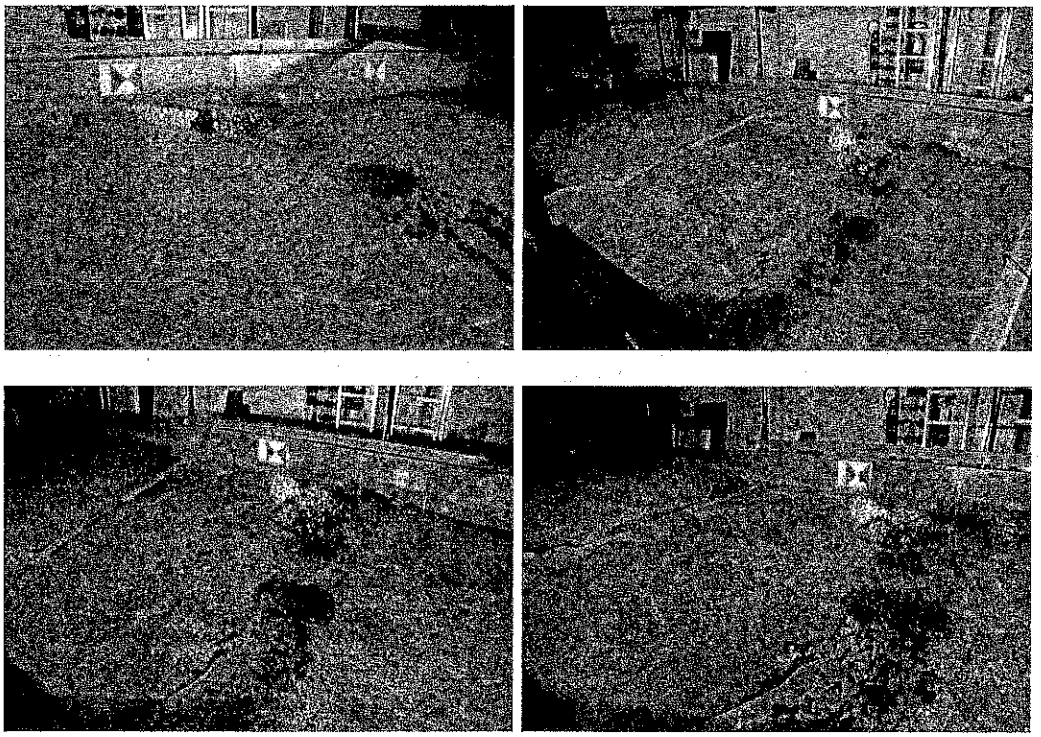

Figura 37: Intervento 3 - Realizzazione di una barriera soffolta con varco centrale tra le testate dei moli. Propagazione dello stato di mare SM 03 all'interno della spiaggia di Vernazzola

Il comportamento idrodinamico e l'evoluzione morfodinamica della spiaggia non risul-

tano essere significativamente differenti rispetto al caso della barriera soffolta continua. Il varco permette la trasmissione di un moto ondoso caratterizzato da un contenuto energetico leggermente maggiore rispetto al caso precedente. Ciò fa si che l'accumulo di sedimenti sia di entità di poco superiore rispetto all'intervento 2 ma presenti le stesse caratteristiche in termini di localizzazione e risalita della lama d'acqua sulla parte emersa della spiaggia. In particolare la dinamica nella zona centrale potrebbe essere modestamente accentuata per la maggiore concentrazione della corrente di ritorno nel varco.

I rilievi effettuati con il Laser Scan 3D rivelano una tendenza del tutto simile a quella osservata nel caso della soluzione progettuale numero 2, presentando comunque una area di erosione nella zona di swash e una area di deposito nella zona della spiaggia emersa. Nuovamente, come nel caso precedente, l'entità dell'accumulo di fronte al muro di retrospiaggia risulta essere minore rispetto alla configurazione originale, sia per l'altezza che per l'estensione planimetrica, pur presentando valori elevati (e quindi riempimento totale in altezza) solo nella zona centrale, maggiormente esposta all'azione del moto ondoso (si veda Figura 38). Come per gli altri casi, sono stati riportati anche i profili della spiaggia nelle tre sezioni precedentemente indicate (cfr. Figura 39).

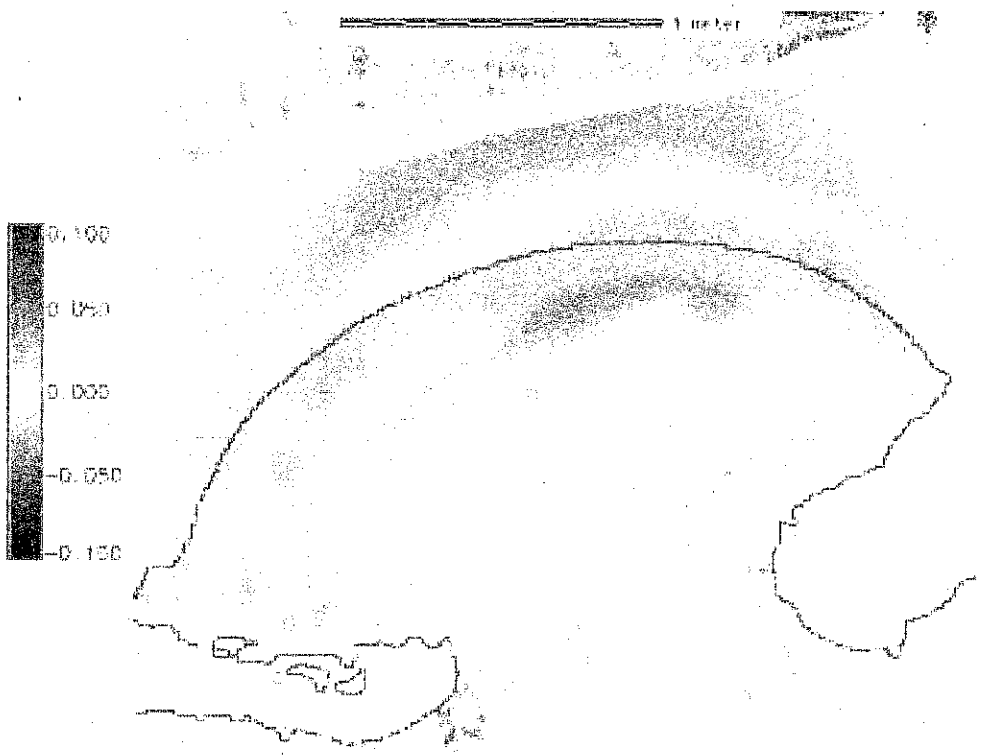

Figura 38: Rilievo Laser Scan: erosione/accrescimento in seguito alla realizzazione dell'intervento 3

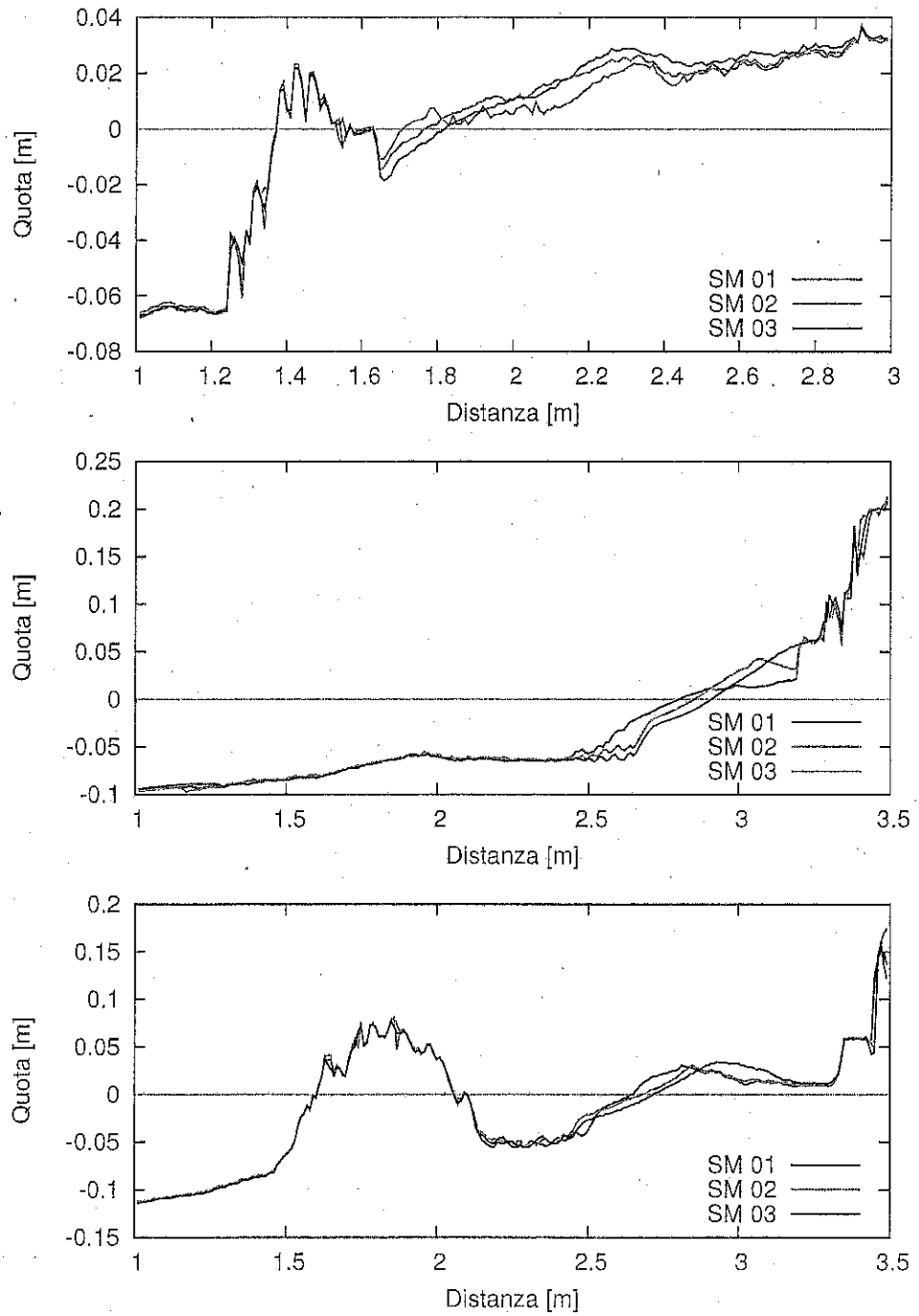

Figura 39: Intervento 3 - Evoluzione morfodinamica della spiaggia di Vernazzola in corrispondenza di tre transetti (Sopra: Ponente; Centro: Centro baia; Sotto: Levante)

5.5 Intervento 4: realizzazione di una scogliera soffolta nella parte di levante della bocca di accesso

Avendo esaminato i risultati ottenuti adottando i tre interventi programmati, si è ritenuto opportuno sperimentare un quarto intervento, che consiste nella realizzazione di una diga-soffolta in corrispondenza dell'imboccatura della baia di Vernazzola, ma solo nella zona di Levante a prosecuzione dell'attuale molo. Tale configurazione planimetrica è pensata per aumentare la protezione nella zona di Levante adibita a scalo per imbarcazioni da diporto, attenuare l'impatto nella zona centrale, dove si sono verificati i danni più significativi, distribuendo l'azione del moto ondoso sull'arco di spiaggia dal centro verso ponente. Tale soluzione progettuale prevederebbe quindi la collocazione del canale di navigazione e accesso per le imbarcazioni nella zona di ponente, essendo le profondità sopra la barriera soffolta particolarmente limitate (al vero tra i 0.5m nella zona prossima al pennello e i 1.5m nella parte a centro baia).

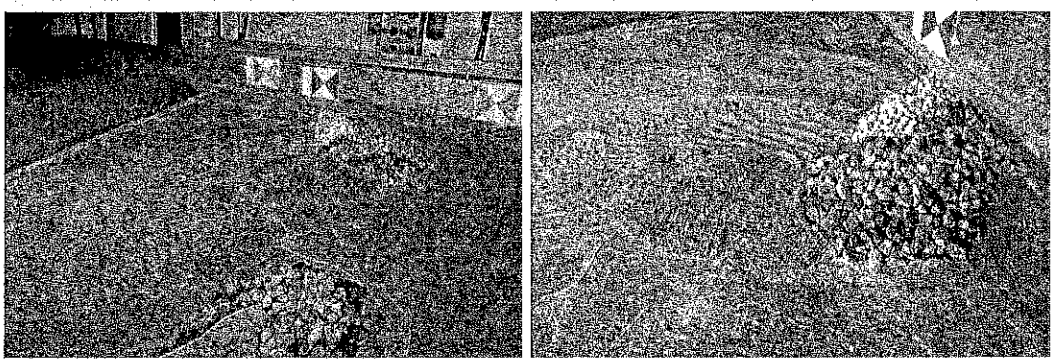

Figura 40: Intervento 4 - Realizzazione di una barriera soffolta nella parte di levante della di accesso. Configurazione iniziale

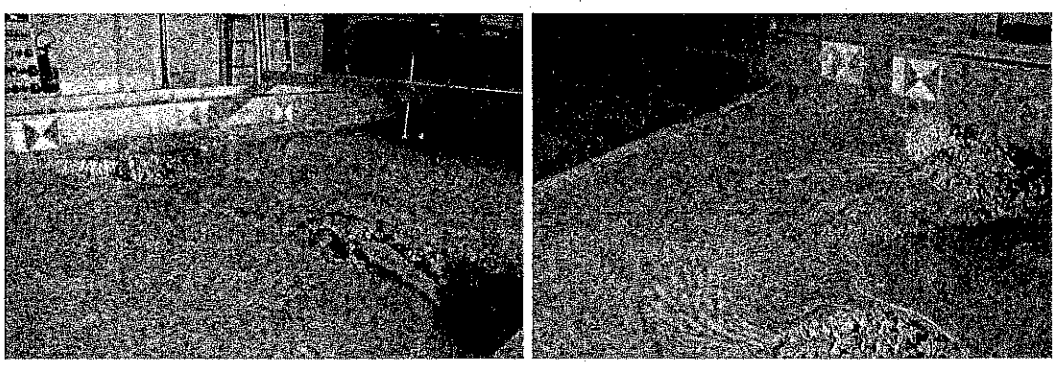

Figura 41: Intervento 4 - Realizzazione di una barriera soffolta nella parte di levante della di accesso. Propagazione dello stato di mare SM 02 all'interno della spiaggia di Vernazzola e configurazione della spiaggia alla fine dello stato di mare 02

Nelle Figure 41 e 42 è riportata la dinamica del moto ondoso all'interno della baia negli stati di mare SM 02 e SM 03 rispettivamente. È possibile osservare come la barriera soffolta abbia un effetto significativo sulle onde medio piccole, ovvero provoca il frangimento nella zona di Levante prima che questo si verifichi nella zona centrale e nella zona di Ponente. Tale frangimento "differenziale" innesca la formazione di una corrente di ritorno in uscita quasi parallalela alla struttura, diretta verso levante. Inoltre il fronte d'onda tende a ruotare lievemente, a causa del frangimento differenziale e della corrente di ritorno, spostando la

porzione di arenile maggiormente sollecitata (e quindi il massimo accumulo di sedimenti) verso ponente. In condizioni di onde severe, il frangimento avviene indipendentemente dalla barriera, ovvero su profondità maggiori, attenuando quindi l'effetto della presenza della barriera stessa.

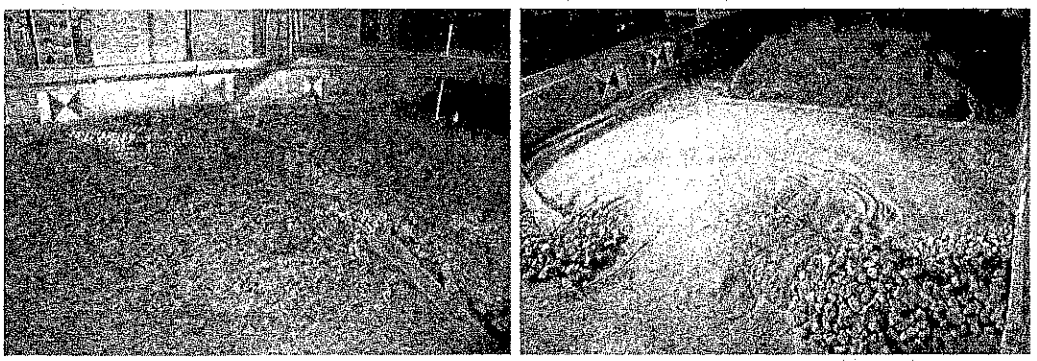

Figura 42: Intervento 4 - Realizzazione di una barriera soffolta nella parte di levante della di accesso. Propagazione dello stato di mare SM 03 all'interno della spiaggia di Vernazzola e configurazione della spiaggia alla fine dello stato di mare 03

A fine esperimento è stato possibile osservare come l'accumulo di sedimenti a ridosso del muro centrale di retrospiaggia sia diminuito rispetto alla condizione attuale, simulata come prima prova, e si sia spostato verso ponente. L'effetto della costruzione di una diga soffolta solo nella parte di levante della baia non altera il trend generale delle variazioni altimetriche osservato nei casi analizzati in precedenza (cfr. Figura 43). La maggiore differenza è una estensione limitata della zona di accumulo nella parte centrale della baia, ma soprattutto il limitatissimo deposito di sedimenti nella parte di levante della baia, nell'area utilizzata come rimessaggio delle barche. Tale effetto è provocato verosimilmente dal minore contenuto energetico del moto ondoso che raggiunge la zona di levante della spiaggia, mentre l'erosione lievemente accentuata della swash zone nella zona di ponente può essere giustificata dalla rotazione e irripidimento del moto ondoso dovuto all'interazione delle onde con la corrente di ritorno che si viene a formare subito a tergo del pennello di ponente.

Nonostante la significativa diminuzione dell'estensione e dell'entità dell'accumulo di sedimenti sulla parte della spiaggia emersa di fronte al muro di retrospiaggia, dai profili riportati in Figura 44 è possibile osservare come nella parte centrale l'accumulo arrivi anche in questo caso quasi a raggiungere il limite del muro. Nonostante ciò, bisogna sottolineare come la zona di accumulo sia molto meno estesa rispetto a quanto si è verificato nelle prove relative ai precedenti interventi.

Il deposito di materiale che si rileva fuori dall'imboccatura nella zona centrale della baia, evidenziato nel relativo pannello della Figura 43, potrebbe a lungo andare rivelarsi favorevole alla formazione di una barra che limiti l'erosione in atto nella zona tra le testate dei due moli. L'accumulo è dovuto, nel modello, a un modesto effetto di riflessione delle onde incidenti e di rifrazione della corrente in uscita provocata dal prolungamento del molo. Non è comunque valutabile il traferimento in scala sul prototipo di tale comportamento.

Come già osservato nelle altre soluzioni progettuali provate in laboratorio, anche questa configurazione non presenta una soluzione definitiva in quanto l'accumulo di sedimenti tende a formarsi anche se in misura minore rispetto alla condizione attuale. È necessario quindi prevedere comunque delle attività di manutenzione dell'arenile per prevenire ed evitare la formazione di berme eccessivamente alte, tali da rappresentare un pericolo per cose o persone.

Figura 43: Rilievo Laser Scan: erosione/accrescimento in seguito alla realizzazione dell'intervento 4 .

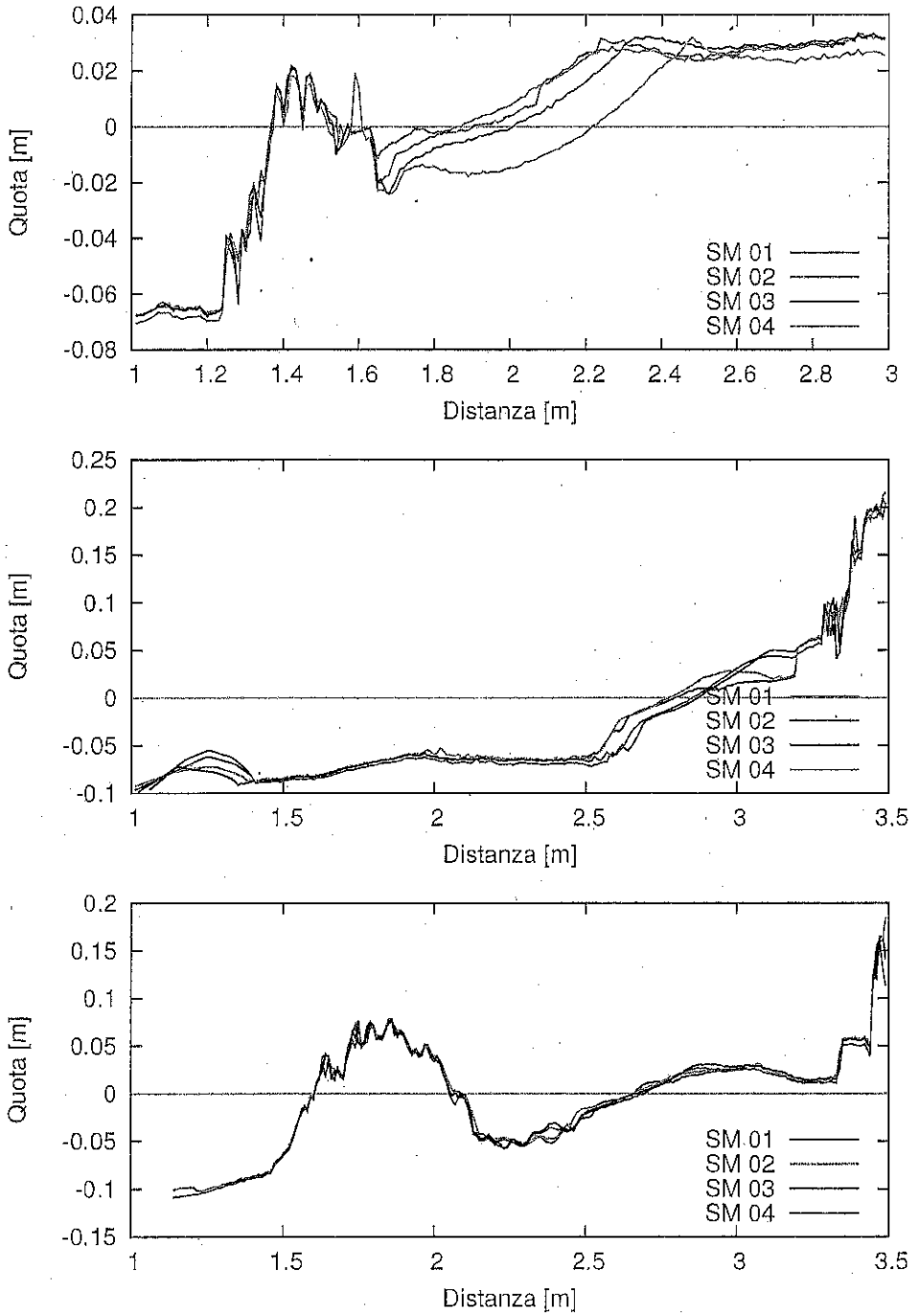

Figura 44: Intervento 4 - Evoluzione morfodinamica della spiaggia di Vernazzola in corrispondenza di tre transetti (Sopra: Ponente; Centro: Centro baia; Sotto: Levante)

6 Considerazioni finali

La realizzazione dei rilievi altimetrici con il Laser Scan 3D nelle diverse fasi delle prove sperimentali ha permesso di ottenere una valutazione dettagliata dei fenomeni di erosione e/o deposito nella baia di Vernazzola nelle diverse configurazioni planimetriche considerate. Oltre all'analisi delle tendenze di erosione/accumulo osservate nell'ambito della singola prova sperimentale relativa a una determinata soluzione progettuale, i rilievi hanno consentito di porre a confronto l'assetto plano/altimetrico ottenuto a fine prova per ciascuna soluzione progettuale con la configurazione finale rilevata al termine della simulazione su modello della mareggiata del Dicembre 2009.

Nella Figura 45 sono riportate quindi le differenze tra le quote rilevate a fine prova per ciascuna soluzione progettuale (Figure 29, 34, 38 e 43) e le quote rilevate a fine simulazione della mareggiata del Dicembre 2009 (Figura 24).

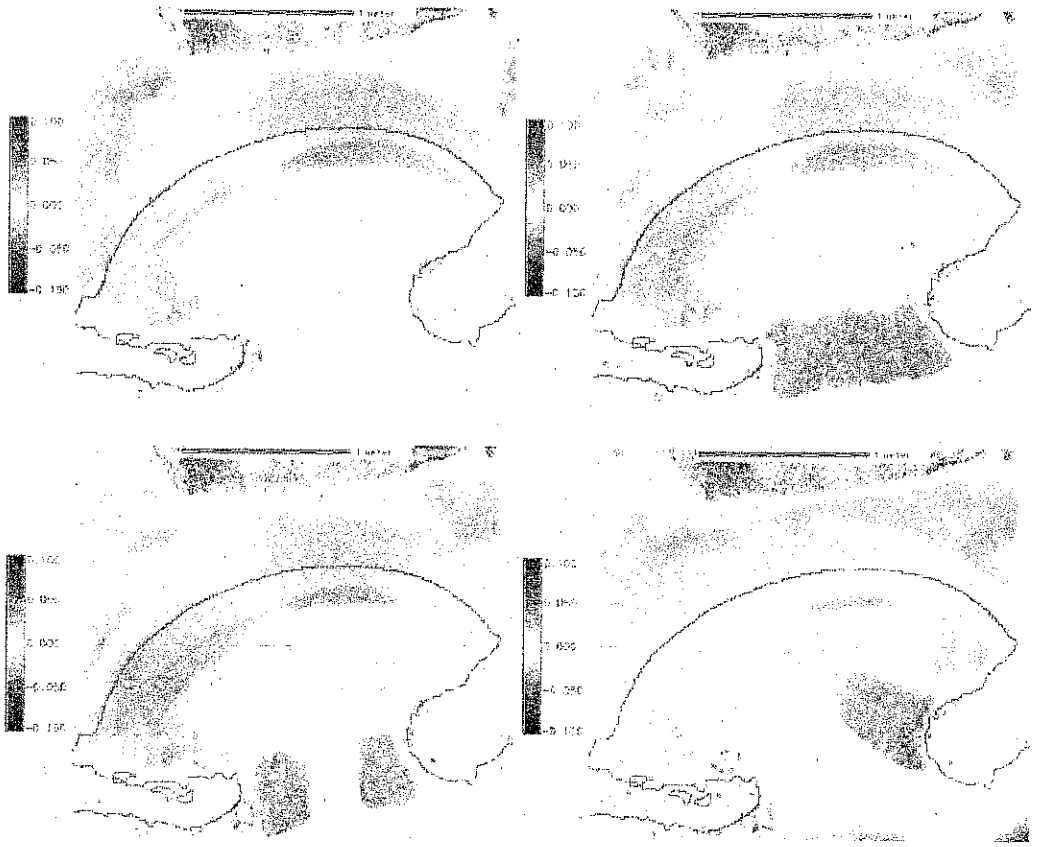

Figura 45: Rilievo Laser Scan: differenza tra lo stato finale ottenuto nella sperimentazione con le diverse soluzioni progettuali e lo stato finale conseguente alla simulazione della mareggiata del Dicembre 2009 (in alto a sinistra: Intervento 1; in alto a destra Intervento 2; in basso a sinistra: Intervento 3; in basso a destra Intervento 4)

In via del tutto generale è possibile osservare come la realizzazione di diversi interventi comporta comunque un minore deposito di sedimenti nella zona Centrale e nella zona di Levante della baia di Vernazzola. Nella zona di Ponente, subito a tergo del molo, invece, la tendenza erosiva risulta lievemente meno intensa per quanto riguarda le soluzioni progettuali 1, 2 e 3 rispetto alla configurazione originale. Per quanto riguarda l'intervento 4, invece, è da sottolineare come la tendenza a un minor deposito è estesa su tutta la baia, come si osserva

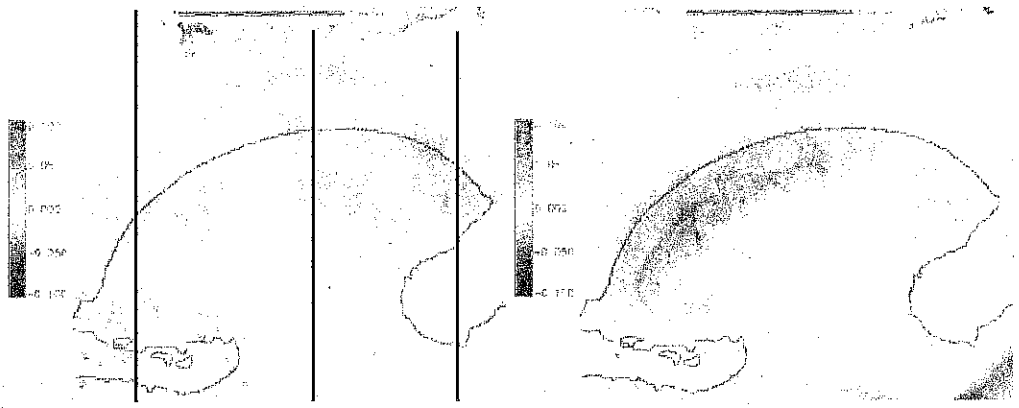

Figura 46: Rilievo Laser Scan: erosione/accrescimento in seguito alla mareggiata del Dicembre 2009 - Gennaio 2010 (sinistra) e alla realizzazione dell'intervento 4 (destra).

riesaminando le Figure 24 e 43 riportate nuovamente in Figura 46 per chiarire meglio le conclusioni.

Esaminando maggiormente in dettaglio i risultati ottenuti in seguito alla realizzazione dell'intervento 4, rispetto alla situazione senza interventi, si rileva che:

- la linea di riva arretra in maniera uniforme nella zona di Ponente, arretra in maniera più modesta nella zona Centrale e sostanzialmente non arretra nella zona di Levante;
- la zona di Ponente presenta maggiore asportazione di materiali nella spiaggia sommersa ma riduce l'accumulo sulla spiaggia emersa provocando la formazione di una berma meno ripida;
- la zona Centrale presenta una modesta erosione sulla faccia della spiaggia sommersa e un modesto accumulo sulla spiaggia emersa con la formazione di una berma meno ripida, che non raggiunge il colmo del muro di retrospiaggia;
- la zona di Levante, usata come rimessaggio delle imbarcazioni, risulta particolarmente protetta. La presenza della barriera soffolta in prossimità del molo di levante ha infatti l'effetto di far rompere le onde soprattutto nella zona centrale e in quella a levante, diminuendo così il contenuto energetico del moto ondoso e quindi la rispettiva capacità di movimentazione dei sedimenti;
- si ha la formazione di una corrente di ritorno che percorre la baia vicino a riva da levante a ponente, uscendo poi verso il largo in direzione Sud-Est senza dare luogo a perdite significative del materiale di ripascimento;
- una piccola parte del materiale eroso a ponente nella zona di swash viene trascinato verso il largo dalla corrente di ritorno e si deposita immediatamente all'esterno della zona di affaccio dei due moli. La presenza di questo materiale nella zona di imbocco della baia potrebbe costituire un elemento di attenuazione per taluni moti ondosi.

I campioni di sedimenti prelevati sulla spiaggia a seguito della mareggiata del 2009 hanno evidenziato che nelle attuali condizioni il materiale del ripascimento non è stato portato all'esterno della baia e che nella zona di fronte all'imboccatura sono state asportate dalla corrente di ritorno i preesistenti materiali più fini, rendendo l'area praticamente priva di sedimenti. Nella soluzione progettuale 4, in occasione di importanti eventi ondosi, modeste quantità di

materiale di ripascimento potrebbero essere traferite nella zona prospiciente l'imboccatura pur non dando luogo a significative perdite di materiale della spiaggia. La quantificazione di tale comportamento non è al momento valutabile in quanto la modellazione del trasporto solido nel modello è appropriata al comportamento nella zona di swash ma potrebbe non essere appropriata per valutare correttamente il trasferimento e il deposito per effetto della corrente di ritorno.

Riferimenti bibliografici

Adami (1994). *I modelli fisici nell'idraulica*. CLEUP, Padova, Italy.

Birkemeier, W. (1985). Field data on seaward limit of profile change. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 111(3):598–602.

Coastal Engineering Manual (2006). *Coastal Engineering Manual*. Books Express Publishing.

Gentile, R., Rebaudengo Landò, L., and Scarsi, G. (1994). Design wave on finite depth: a re-analysis of the tma model. In *Proceedings of OMAE 94*, volume II, pages 49–56, Houston, USA.

Gentile, R., Rebaudengo Landò, L., and Scarsi, G. (2000). The threshold of sand motion under wave groups. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 10:107–111.

Guza, R. T. and Thornton, E. B. (1981). Wave set-up on a natural beach. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 86(C5):4133–4137.

Hallermeier, R. J. (1978). Uses for a calculated limit depth to beach erosion. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(16):1493–1512.

Holman, R. (1986). Extreme value statistics for wave run-up on a natural beach. *Coastal Engineering*, 9(6):527–544.

Hughes, S. (1993). *Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering*, volume 7 of *Advanced Series in Ocean Engineering*. World Scientific, Singapore.

Mase, H. (1989). Random wave runup height on gentle slope. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 115(5):649–661.

Mentaschi, L., Besio, G., Cassola, F., and Mazzino, A. (2013). Implementation and validation of a wave hindcast/forecast model for the west mediterrenean. In *Proc of: 2th International Coastal Symposium*, Plymouth, UK.

Nielsen, P. and Hanslow, D. (1991). Wave runup distributions on natural beaches. *Journal of Coastal Research*, 7 (4):1139–1152.

Rebaudengo Landò, L., Gentile, R., and Scarsi, G. (1999). A nonlinear spectral model for directional random waves at decreasing depths. *Journal of Offshore and Artic Engineering*, 9 (2):9.

Scarsi, G., Gentile, R., and Landò, L. R. (2001). Initial motion of sediment under waves: A general criterion. In *Ocean Wave Measurement and Analysis*, pages 1436–1446. American Society of Civil Engineers.

Soulsby, R. (1997). *Dynamics of marine sands*. HR Wallingford.

Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A., and Sallenger Jr., A. H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, 53(7):573–588.