UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FIRENZE

SCUOLA DI INGEGNERIA



TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

"Studio su modello numerico della protezione delle spiagge di Castiglione della Pescaia con piattaforme isola"

RELATORI:

Prof. Ing. Lorenzo Cappietti

Prof. Ing. Enrica Caporali

Prof. Ing. Pier Luigi Aminti

CANDIDATO:

Marco Nicosia

Anno Accademico 2017/2018

INDICE

1. INTRODUZIONE
2. OPERE DI DIFESA E PIATTAFORME ISOLA
3. INTERVENTI DI DIFESA EFFETTUATI CON LA REALIZZAZIONE DI PIATTAFORME ISOLA9
4. CASO STUDIO CASTIGLIONE DELLA PESCAIA
4.1 SWASH MODEL
4.1.1 VALIDAZIONE DEL MODELLO
4.2 MODELLAZIONE PIATTAFORME ISOLA
4.2.1 CONFIGURAZIONI STATO ATTUALE
4.2.2 CONFIGURAZIONI DI PROGETTO58
4.2.3 CONFIGURAZIONI DEFINITIVE120
4.2.4 ANALISI DEI COSTI141
4.2.5 TEST ONDA IRREGOLARE SU CONFIGURAZIONE DEFINITIVA DI PROGETTO146
5. CONCLUSIONI
BIBLIOGRAFIA

1. INTRODUZIONE

Il presente studio ha l'obiettivo di determinare la configurazione ottimale, sia in termini di dimensionamento che di posizionamento, del sistema di piattaforme isola che verrà realizzato dinnanzi al centro abitato di Castiglione della Pescaia.

Esso rappresenta la soluzione di difesa del litorale che è stata scelta dalla Regione Toscana per proteggere il ripascimento che avrà luogo in tale sito.

Si è evidenziato infatti negli ultimi anni un arretramento della spiaggia nel tratto tra la foce del fiume Bruna e Punta Capezzolo e dal momento che è un tratto di costa denso di strutture e stabilimenti balneari, la Regione ha deciso di intervenire per ripristinare l'equilibrio dell'arenile.

In realtà il progetto sviluppato è molto più ampio ed arriva ad interessare tutto il litorale fino a Punta Rocchette, ma in questo lavoro sarà approfondito solo questo primo tratto.

Lo studio sarà quindi articolato nella seguente maniera:

innanzitutto sarà brevemente descritto questo sistema di protezione dei litorali evidenziandone prima le caratteristiche principali e poi riportando un resoconto dei vari interventi della medesima tipologia che sono stati realizzati nel passato sulle coste italiane.

Dopodichè si passerà al fulcro dello studio, ossia la parte di modellazione, dove tramite il modello numerico SWASH, si studierà nel dettaglio l'idrodinamica del litorale, sia al momento attuale sia quella che verrebbe a crearsi in seguito ad un simile intervento.

Per avere un quadro della situazione il più chiaro ed esauriente possibile saranno eseguite varie simulazioni, nelle quali di volta in volta saranno modificati e perfezionati i parametri principali che caratterizzano il funzionamento del sistema di difesa operato mediante piattaforme isola, fino ad arrivare alla determinazione di una soluzione che garantisca i migliori risultati, tenendo anche sempre di conto sia il possibile impatto ambientale provocato dall'intervento che il rapporto benefici/prezzo.

2. OPERE DI DIFESA E PIATTAFORME ISOLA

Le opere di protezione dei litorali sono strutture oramai molto diffuse lungo le coste italiane, in tutti e tre i versanti, il Tirrenico, l'Adriatico e lo Ionico. Ciò è dovuto al fatto che, soprattutto dal secondo dopoguerra in poi, la maggior parte delle spiagge italiane sono entrate in una fase di erosione sempre più progressiva che ha costretto gli organi competenti ad effettuare tali interventi di difesa.

Esistono molte tipologie di tali opere ed una prima distinzione può essere fatta tra opere attive ed opere passive. Le prime hanno lo scopo di alterare l'idrodinamica costiera e il trasporto solido litoraneo, mentre le seconde proteggono la fascia costiera senza modificare sostanzialmente il trasporto solido longitudinale, assicurando quindi la protezione dall'impatto diretto dei moti ondosi. Altre suddivisioni possibili sono anche quelle tra difese rigide, morbide e miste, in relazione alla deformabilità offerta all'azione del mare, e tra opere continue, discontinue, permeabili e impermeabili, in relazione alle caratteristiche geometriche e funzionali.

In generale comunque le tipologie più utilizzate all'interno dei nostri confini e nel Mediterraneo sono:

- Difese aderenti rigide

Sono opere di tipo passivo, realizzate mediante il posizionamento di strutture rigide parallele e aderenti alla linea di costa, che possono estendersi sulla fascia emersa, arrivando a interessare il retro-spiaggia e (se presente) il piede della duna.

Appartengono alle difese aderenti i rivestimenti con mantellate di massi naturali e artificiali, le scogliere radenti, i muri di sponda, le paratie e/o palancolati e gli argini a mare.

Tali opere sono spesso realizzate in condizioni di emergenza e con una estensione limitata ai soli tratti di costa in erosione per la loro efficacia nel limitare l'azione meccanica ed erosiva delle onde incidenti e nel prevenire le inondazioni dovute a forti mareggiate.



Figura 1: Tipico esempio di barriera aderente con utilizzo sia di massi naturali che lastre in calcestruzzo (fonte APAT 2007)

- Difese aderenti morbide

A tale categoria di difese appartengono le opere di stabilizzazione di arenili a matrice prevalentemente sabbiosa con ubicazione in situ di una copertura di materiale ghiaioso sciolto. In genere sono realizzate a difesa di siti particolarmente critici e di limitata estensione dalla cui salvaguardia dipende la messa in sicurezza delle infrastrutture (strade, linee ferroviarie ecc.) a ridosso dell'arenile. L'impiego di materiale più grossolano aumenta la stabilità e la resistenza all'erosione, perché favorisce l'assorbimento dell'energia delle onde frangenti, producendo al contempo sensibili variazioni del profilo di spiaggia.

- Ripascimenti

Il ripascimento è un intervento di difesa di tipo "morbido", che consiste nel versamento di sedimenti idonei, di provenienza marina o terrestre, sulla spiaggia (emersa e/o sommersa). Il materiale viene in parte lavorato mediante l'impiego di mezzi di terra e in parte ridistribuito dalle onde lungo il profilo di equilibrio. Lo scopo dell'intervento è generalmente quello di ripristinare o stabilizzare una spiaggia in erosione.

La funzione del ripascimento è infatti quella di agire sul bilancio dei sedimenti di un tratto di litorale, rendendo lo stesso positivo o nullo. Tale intervento può essere eseguito in un'unica soluzione o mediante alimentazione periodica, con quantità di sedimento da stabilirsi in base alle specifiche di progetto. La scelta del sedimento da utilizzare costituisce un fattore essenziale per la riuscita degli interventi di ripascimento: esso deve essere opportunamente scelto, tenendo conto delle caratteristiche granulometriche e mineralogiche e, se possibile, cromatiche dei sedimenti originari. Per quello che concerne in particolare l'aspetto granulometrico, il sedimento scelto dovrebbe avere un diametro medio confrontabile (uguale o di poco maggiore) rispetto a quello dei sedimenti originari. Infatti, sebbene i sedimenti a granulometria più grossolana siano generalmente più stabili, il loro impiego può dar luogo a profili di spiaggia più ripidi in seguito all'azione di rimaneggiamento delle onde.

- Difese trasversali alla riva

Le difese trasversali sono opere di tipo attivo-rigido con la funzione primaria di intercettare le correnti litoranee e interrompere totalmente o parzialmente il trasporto solido longitudinale. Generalmente trovano immediata applicazione in presenza di moto ondoso obliquo alla costa e pertanto hanno un andamento planimetrico ortogonale o leggermente obliquo rispetto alla linea di riva, in funzione della direzione principale del moto ondoso incidente.

A questo gruppo di opere appartengono i pennelli, che si distinguono a loro volta in impermeabili, permeabili e compositi, e gli headlands (diffusi prevalentemente in Australia).

Inoltre esse possono essere tipologie di opere realizzate totalmente emerse, totalmente sommerse od in parte emersa ed in parte sommersa. Ovviamente al variare di tale parametro si modificano le quantità di materiale intercettate e quindi può cambiare drasticamente l'effetto prodotto sul litorale.



Figura 2: Esempio di opere di difesa trasversali alla spiaggia nei pressi di Pellestrina (fonte: <u>www.mosevenezia.eu</u>)

- Difese parallele distaccate da riva

Le difese distaccate (o barriere distaccate) sono opere di tipo attivo-rigido costruite a una certa distanza dalla linea di riva per proteggere le coste basse e quelle alte dall'azione diretta delle onde.

Generalmente hanno un andamento parallelo alla costa (barriere parallele) e trovano il loro principale campo applicativo nel caso di moto ondoso ortogonale alla riva. Sono realizzate anche con giaciture planimetriche diverse nel caso di onde provenienti da un settore direzionale obliquo rispetto alla normale alla linea di riva.

Tali opere sono costituite da strutture fisse o, più raramente, galleggianti e possono essere isolate o costituire un sistema di barriere segmentate intervallate da varchi. In base alla quota di coronamento rispetto al l.m.m. sono distinte in emergenti e sommerse.

Le barriere, soprattutto quelle emergenti, offrono una protezione diretta al litorale dalle onde perché ne attenuano il potere erosivo sui bassi fondali e creano una zona di bassa agitazione a tergo della struttura.

Quelle sommerse invece sono considerate un sistema di protezione più "soft", sono più gradite da un punto di vista di impatto ambientale, ma ovviamente hanno un effetto di attenuazione minore sul moto ondoso. Tra le due configurazioni inoltre cambiano anche le modalità di funzionamento:

le opere emerse infatti si fondano sul meccanismo della diffrazione, mentre quelle sommerse su quello della trasmissione.



Figura 3: Esempio di sistema di barriere emerse parallele alla riva realizzato sulla spiaggia di S.Girogio (AP) (fonte: Atlante delle opere di sistemazione costiera)

Sono un caso particolare di barriere distaccate da riva le strutture prescelte per la protezione del litorale situato dinnanzi al centro abitato di Castiglione della Pescaia e che rappresentano quindi il fulcro di questo studio, ossia le piattaforme-isola.

Esse sono infatti delle scogliere artificiali di forma circolare e dimensioni limitate, realizzate con massi, naturali od artificiali, e spesso nel passato contenevano un anello di calcestruzzo nella parte centrale con funzione di stabilizzazione e rinforzo.



Figura 4: Schema tipico di una piattaforma-isola (fonte: Linee Guida ISPRA 2014)

Sono quindi delle opere di facile costruzione ed il loro dimensionamento è molto simile a quello utilizzato per la testata di un pennello.

Tali opere agiscono sui fenomeni che si verificano nella zona dei frangenti (2-5 m di profondità) e possono influire sulle correnti generate da moto ondoso rallentando il trasporto dei sedimenti che rimane confinato sottocosta. In particolare l'ingegnere Giorgio Berriolo, a cui appartiene il brevetto di tali strutture, descrive così il meccanismo di funzionamento delle piattaforme-isola turistici": nel libro "Spiagge suo е porti " il meccanismo di funzionamento delle piattaforme isole è il seguente: durante le grandi mareggiate, la struttura è investita dal frangente già in fase di avanzata rottura e ne assorbe una parte della energia con conseguente protezione della zona di spiaggia immediatamente retrostante e delle sue adiacenze.

Durante le agitazioni medie e minori, l'onda si presenta in corrispondenza del manufatto ancora integra e nella rifrazione intorno ad esso cambia di direzione e diminuisce di intensità. In conseguenza nella zona protetta dalla piattaforma, si assiste alla formazione di un tombolo costituito da sabbia decisamente più fine di quella che si osserva sul resto dell'arenile. A questa azione di protezione di una parte, sia pure ridotta del lido, si associa il fatto che la stessa presenza della struttura, influisce profondamente sul regime delle correnti radenti che si generano lungo l'arenile e nella zona dei frangenti in conseguenza del moto ondoso. La presenza dei manufatti in una certa successione sposta queste correnti obbligandole a passare all'esterno dove, per effetto della maggiore profondità, la loro velocità si smorza diminuendo di conseguenza la capacità di trasporto."

La forma circolare consente inoltre un rapido smorzamento dell'onda riflessa che avrebbe come conseguenza l'escavazione al piede della scogliera nella parte esterna.

In definitiva tale tipologia di opere è considerata un intervento più "soft" rispetto alle classiche scogliere parallele distaccate da riva, ma che in litorali dove non sussistono gravi situazioni di erosione possono rappresentare un'ottima soluzione soprattutto se in funzione di proteggere un ripascimento.

Infine ovviamente anche tali opere possono essere realizzate emerse o sommerse, anche se in passato, come vedremo nel prossimo capitolo, si è praticamente sempre optato per la prima soluzione.

3.INTERVENTI DI DIFESA EFFETTUATI CON LA REALIZZAZIONE DI PIATTAFORME ISOLA

Come anticipato nel capitolo precedente le piattaforme-isola sono state brevettate dall'ingegner Berriolo alla fine degli anni '60 e da quel momento in poi sono state utilizzate in varie occasioni come opere di difesa dei litorali.

In particolar modo si è avuta una consistente realizzazione di tali opere a cavallo proprio tra gli anni '60 e '70 in tutta la riviera ligure, dalla spiaggia di Bordighera, vicina a Ventimiglia e quindi al confine francese, fino a Marinella di Sarzana, alla foce del Magra, che si trova al confine tra Liguria e Toscana. Inoltre proprio nel nord della Toscana, a Marina di Massa per l'esattezza, sempre negli stessi anni è stato attuato un ulteriore intervento della medesima natura.

Infine l'unica altra zona d'Italia dove è stata realizzata questa tipologia di opera è la Campania, in particolare ad Ischia ed anche sul litorale di Miliscola, nei pressi del promontorio del Monte Procida, in provincia di Napoli, dove ad inizio anni '80 è stato realizzato un progetto di protezione della costa che ha previsto l'utilizzo di piattaforme isola.

Nessun intervento di questo tipo è stato invece effettuato sia nel versante Ionico che in quello Adriatico.

Si riporta di seguito una breve descrizione di tutti gli interventi effettuati con le piattaformeisola sulle coste italiane.

- BORDIGHERA

Lungo il litorale di Bordighera, fino a Capo Sant'Ampelio, si venne a creare fin dall'immediato dopoguerra una notevole situazione di erosione, dovuta principalmente alle ingenti quantità di inerti che venivano prelevati dai letti dei fiumi e dei torrenti che sfociavano in quel tratto di mare. Tale materiale serviva per le ricostruzioni dopo le distruzioni avvenute nella seconda guerra mondiale.

Tuttavia questo prelievo smodato, senza alcuna norma che lo regolasse, creò un deficit sedimentario alla foce dei vari corsi d'acqua e quindi le spiagge non erano più rifornite.

Questa fu la causa principale delle erosioni che poi sempre più si sono manifestate nelle coste italiane.

Alla fine degli anni'60, divenendo la situazione sempre più insostenibile, nonostante fossero state nel frattempo realizzate delle scogliere parallele ed un pennello, l'Ufficio Opere Marittime del Genio Civile di Genova, predispose un intervento che prevedeva un ripascimento protetto dalla costruzione di una serie di piattaforme-isola e dal prolungamento del pennello già in precedenza costruito presso Capo Sant'Ampelio. L'intervento inoltre prevedeva la cessazione del rilascio di concessioni riguardanti l'estrazione di inerti nei corsi d'acqua della zona.

I lavori furono svolti tra il 1972 ed il 1973 e nelle figure seguenti si possono osservare essi da poco ultimati.



Figura 5: Foto aeree del 1973 che raffigurano l'intervento realizzato mediante piattaforme-isola lungo il litorale di Bordighera (fonte Regione Liguria)

L'intervento conseguì inizialmente un buon risultato, ma, a causa della mancata sospensione delle concessioni per l'estrazione di inerti (che terminò solo nel 1990), la struttura imperniata sulle piattaforme isola risultò insufficiente a contrastare il fenomeno di erosione in atto.

Si intervenne quindi con la costruzione di opere rigide, scogliere parallele e pennelli, in un crescendo disordinato, ottenendo anche localizzati marcati avanzamenti a ponente che però comportarono evidenti compensi sottoflutto con il risultato di un assetto caotico ed instabile. Si assistette ad un progressivo spostamento della erosione a ponente, tamponata nel tratto terminale di Bordighera con continue operazioni di ripascimento e con il prolungamento del pennello di capo S. Ampelio.

Nella figura seguente si riporta la situazione attuale di tale tratto di costa



Figura 6: Situazione attuale del litorale di Bordighera (fonte: Google Earth, Marzo 2017)

In definitiva tuttavia questo intervento, anche se solo parzialmente riuscito, assunse una particolare importanza in quanto dimostrò come un dispositivo di difesa morbida (il ripascimento), coadiuvato da opere di semplice rallentamento del flusso detritico (le piattaforme isola) potesse avere successo, a patto naturalmente che fosse accompagnato da una fortissima flessione delle estrazioni di inerti dai corsi d'acqua.

- Sanremo

A Sanremo agli inizi degli anni'70 fu varato un progetto che prevedeva il recupero di 900m di litorale dinnanzi la stazione ferroviaria. L'obiettivo era quello di raggiungere un avanzamento di 90m, dei quali 40m destinati alla viabilità ed i rimanenti alla spiaggia. Per fare ciò si prevedeva di sversare grandi quantità di materiale di risulta proveniente dall'Autostrada dei Fiori (di scarsa qualità), di realizzare delle strutture di difesa che consistevano in un grande pennello a levante in prossimità della foce del rio S.Romolo, uno minore all'estremo di ponente e due isole intermedie. Infine l'intervento doveva essere completato con un ripascimento di sedimento pregiato.

L'Amministrazione Comunale però decise di destinare oltre 70 metri del terrapieno a viabilità, giardini e parcheggio. Inoltre non venne realizzato il versamento di finitura a protezione e completamento della spiaggia.



Figura 7: Foto aerea del 1973 che mostra la realizzazione dell'intervento di difesa del litorale dinnanzi la stazione ferroviaria di Sanremo (fonte: Regione Liguria)

Conseguentemente, davanti al muro che limitava la zona viabile rimanevano, nel 1983, solo una ventina di metri di spiaggia costituita di materiale detritico estremamente eterogeneo e di varie dimensioni. Inoltre le piattaforme isola sono state in seguito unite a terra, formando in definitiva altri due pennelli.



Figura 8: Foto aerea del 1993 che mostra la situazione nel litorale dinnanzi la stazione ferroviaria di San Remo (fonte: Regione Liguria)

Comunque nei decenni successivi la situazione è rimasta stabile e la spiaggia non ha subito arretramenti, come si può osservare dalla figura 9, e ciò è una testimonianza della bontà della scelta progettuale adottata.



Figura 9: Situazione attuale del litorale di Sanremo (fonte:Google Earth, Marzo 2017)

- Porto Maurizio

Altro intervento che ha previsto l'utilizzo di piattaforme isola ha avuto luogo lungo il litorale di Porto Maurizio, in località Borgo Prino per l'esattezza, sempre in provincia di Imperia. La situazione qui è sempre stata precaria, fin dagli inizi del '900, e peggiorò ulteriormente verso la fine degli anni '60 e ciò convinse l'amministrazione comunale a finanziare un progetto di ricostruzione della spiaggia.

I lavori interessarono un fronte di 700m. Inizialmente venne realizzata sulla sponda sinistra del torrente Prino una discarica con i detriti provenienti dai lavori di scavo per la realizzazione dell'Autostrada dei Fiori.

Contemporaneamente, fu avviato lo smantellamento di un vecchio pennello e di un lembo di scogliera parallela preesistenti. Significativo il fatto che questo fu il primo caso in Italia in cui si autorizzò la demolizione di un'opera marittima di protezione della costa. In sostituzione delle vecchie strutture furono realizzati un nuovo pennello, a levante, e tre "piattaforme-isola" in prossimità delle case del borgo.

La prima struttura garantiva un appoggio alla spiaggia ed impediva la dispersione dei sedimenti verso levante, mentre le altre opere avevano la funzione di evitare la perdita di materiale, favorendone l'accumulo con un effetto "tombolo" senza però limitare il passaggio dei sedimenti da una cella alla successiva.

Il progetto ebbe successo e si stabilì un nuovo equilibrio ed un avanzamento immediato della spiaggia di 15-20 metri.



Figura 10: Foto aerea del 1973 che mostra l'intervento realizzato presso Borgo Prino (fonte: Regione Liguria)

Purtroppo tale intervento fu vanificato dalla costruzione di nuove opere. Nel 1980 infatti, con la chiusura della discarica, il piazzale realizzato grazie al versamento di inerti venne stabilizzato mediante la realizzazione di una scogliera aderente che privò il litorale di questi apporti sedimentari. La stessa amministrazione, pensando di migliorare la situazione, realizzò a levante della foce del torrente Prino un lungo molo inclinato che privò la spiaggia anche dei sedimenti provenienti dal corso d'acqua. Questa struttura determinò anche la traslazione dei sedimenti fini presenti sulla spiaggia verso la zona protetta creata dal nuovo molo. La spiaggia arretrò vistosamente e peggiorò anche granulometricamente, diventando ghiaiosa. Anche in questo caso, non comprendendo le reali cause del fenomeno, proseguirono gli interventi che irrigidirono ulteriormente il litorale. Le isole furono trasformate in pennelli, ad eccezione della struttura di ponente, che solo recentemente, nel 2000, è stata collegata a terra. Questi interventi ottennero il solo risultato di frammentare il litorale in tre celle non comunicanti, rendendo praticamente impossibile lo scambio di sedimenti. La situazione, a tutt'oggi, risulta essere particolarmente critica, aggravata anche dalla presenza nella spiaggia sottomarina di una depressione che convoglia verso il largo, disperdendoli in profondità, i sedimenti trasportati dal torrente Prino; questi sedimenti sono spinti all'esterno dall'azione di riflesso determinata dalle strutture presenti in prossimità dell'ex discarica.

Infine, la piattaforma isola già collegata a terra nel 2000 è stata ulteriormente ampliata con la costruzione di un nuovo tratto ricurvo verso levante. Presumibilmente l'obiettivo che s'intende raggiungere con questo intervento è quello di creare una zona protetta.

Questo tuttavia probabilmente comporterà la formazione di una spiaggia sabbiosa nella zona protetta dalla struttura ed il rapido depauperamento del rimanente tratto di litorale.

In definitiva anche in questo caso l'intervento progettato e realizzato mediante piattaforme isola ha avuto un buon impatto iniziale ed ottenuto i risultati sperati, che però sono stati vanificati dalla poca accortezza delle varie amministrazioni nelle successive scelte progettuali.



Figura 11: Situazione attuale della spiaggia di Borgo Prino (fonte: Google Earth, Marzo 2017)

- Ceriale

Situazione molto simile quella che si è verificata nel litorale compreso tra Albenga e Ceriale. In tale tratto infatti si è sempre avuto una situazione erosiva fina dagli inizi del'900, che impose la costruzione di alcuni pennelli. Inoltre le estrazioni di inerti e la costruzione della ferrovia fecero peggiorare la situazione che poi precipitò a seguito del raddoppiamento della sede ferroviaria avvenuto negli anni '30.

Per difendere il litorale si ricorse allora alla realizzazione di scogliere radenti che tuttavia accuì la situazione erosiva, la quale non diminuì nemmeno dopo la cessazione del prelievo di inerti che avvenne nel 1960.

L'amministrazione decise allora di intervenire e venne progettato un intervento che prevedeva la costruzione di cinque piattaforme isola sommerse a protezione di un ripascimento di 50000 m³ di sabbia.

Il lavoro, realizzato nel periodo 1968-1969, permise, già dopo la costruzione della prima piattaforma, un'immediata deposizione di sabbie fini lungo la battigia e importanti avanzamenti in coincidenza della struttura.

Le altre opere realizzate, unitamente ai limitati versamenti di fortuna, determinarono un avanzamento del litorale con la deposizione di sabbia fine che ne migliorò anche la qualità. Come previsto si manifestò a levante un modesto fenomeno erosivo che venne però prontamente arginato attraverso la realizzazione di una nuova piattaforma sommersa e con il versamento di materiale. Il fenomeno fu tenuto sotto controllo e la situazione si stabilizzò con un aumento progressivo della spiaggia verso levante.



Figura 12: Foto aerea del 1973 che mostra l'intervento realizzato presso il litorale di Ceriale. Si possono notare da sinistra verso destra le 5 piattaforme realizzate inizialmente e la sesta sommersa realizzata successivamente. Inoltre le 2 piattaforme realizzate presso la foce del Rio Torsero sono già state unite a terra. (fonte: Regione Liguria)

Dopo qualche anno tuttavia il litorale era oggetto di una nuova, seppur blanda, crisi erosiva.

Infatti ampie fasce della spiaggia furono utilizzate per migliorare la viabilità e la passeggiata e le due isole presso la foce del Rio Torsero erano state collegate a terra.

Ciò creò un conseguente stravolgimento del drift litoraneo e comportò l'unione a terra di tutte le piattaforme isola con snaturamento totale del progetto originario.

Tali interventi mandarono in crisi erosiva il litorale a levante costringendo l'Ufficio del Genio Civile Opere Marittime a realizzare un ulteriore intervento, costruendo ulteriori due piattaforme isole ed un pennello in questo tratto.



Figura 13: Foto aerea del 1994 che mostra il litorale di Ceriale. Si possono notare in fondo a destra le ultime 2 piattaforme isola progettate nel 1980. (fonte: Regione Liguria)

Quest'ultimo lavoro ha stabilizzato la situazione, con il litorale che è ancora oggi in condizioni di equilibrio.



Figura 14: Situazione attuale del litorale di Ceriale. L'ultima isola è ora sormontata da un molo di recente costruzione (fonte: Google Earth, Marzo 2017

- Litorale compreso tra Capo Santo Spirito ed il porto di Loano

Tale caso è molto simile al precedente, essendo tale litorale subito a levante di quello di Ceriale.

La situazione della spiaggia infatti non è stata critica fino agli inizi del '900, quando a causa dei continui e massicci prelievi di inerti ed alle opere costruite più a ponente che limitavano il flusso detritico, le spiagge dinnanzi sia a Borghetto Santo Spirito che a Loano entrarono in crisi erosiva.

Nonostante il proliferare di opere di difesa, soprattutto pennelli nel primo dopoguerra, scogliere parallele negli anni '50, la situazione non viene modificata, anche perché sono continuate le ingenti estrazioni di materiali nei torrenti della zona.

Quando nel 1966 una serie di mareggiate distrugge la spiaggia di Loano e demolisce alcuni stabilimenti balneari, l'amministrazione comunale, con fondi propri, finanzia e realizza la costruzione di tre piattaforme-isole ed un pennello e procede ad un ripascimento di 20000 m³ con materiali di cava. Fu questa la prima applicazione di tale tipologia di opera di difesa.

Questa operazione, unitamente alla istituzione di una discarica alimentata da materiali di fortuna a Borghetto, presso l'uscita della galleria ferroviaria, e versamenti periodici di ripascimento, restituisce una sorta di equilibrio alla spiaggia.



Figura 15: Spiaggia di Loano alla fine dei lavori nel 1967



Figura 16:Foto aerea del 1973 che mostra l'intervento realizzato dinnanzi al centro abitato di Loano, concernente 3 piattaforme isola ed un pennello (fonte: Regione Liguria)

Questa situazione di stabilità è perdurata fino agli anni '80 quando, la cessazione di periodici versamenti di materiale e la chiusura della discarica presso Borghetto mandò nuovamente in crisi tutto il litorale. Per tale motivo si optò per una serie di interventi disordinati, tra cui anche il collegamento a terra delle piattaforme isola. Nessuno degli interventi effettuati ha migliorato di molto la situazione, si sono creati soltanto dei benefici localizzati a scapito di altri tratti vicini.

Infine nel 2007 sono state realizzate, a circa 30m dalla riva di Borghetto Santo Spirito, tre piattaforme isola semisommerse di diametro di 50m.

Ancora però non sono disponibili dati di monitoraggio delle opere che consentano di darne un giudizio.



Figura 17: Immagine attuale che mostra le tre piattaforme semi sommerse realizzate presso Borghetto Santo Spirito (fonte Google Earth, Marzo 2017)



Figura 18: Immagine attuale che mostra le tre piattaforme isola realizzate presso Loano unite alla spiaggia (fonte Google Earth, Marzo 2017)

- Litorale compreso tra il porto di Loano e Punta Caprazoppa

Questo litorale si trova subito a levante rispetto ai due precedentemente descritti e quindi ha una storia analoga ad essi ed è ovviamente stato influenzato dalle opere che li hanno interessati.

Tuttavia il fattore importante che più ha inciso nell'evoluzione di questo tratto di spiaggia è la presenza del porto di Loano, la cui costruzione è iniziata nel 1955, che costituisce un limite invalicabile di unità fisiografica ed isola di fatto questo tratto di litorale dagli apporti provenienti da Ponente.

Prima della realizzazione di tale opera questo tratto di costa si trovava già in erosione, ma dopo la situazione peggiorò ulteriormente. Si aprì una nuova fase erosiva verso Pietra Ligure, che fu tamponata con interventi quali nuove scogliere aderenti a difesa della via litoranea e della ferrovia, che però portò alla definitiva scomparsa della spiaggia delle Vignasse, l'ultima spiaggia del comune di Loano. Alla fine degli anni Cinquanta il litorale era estremamente compromesso, ma la situazione fu affrontata per la prima volta in modo organico dall'ingegner Volta, che per prima cosa proibì le estrazioni di inerti dalle spiagge e dalle aste dei torrenti. Nel 1967 a Pietra Ligure vennero costruite due piattaforme isola affiancate da un versamento di 20000 m³ di ghiaia di cava. Una terza piattaforma venne costruita alla foce del torrente Bottassano. Questo, unitamente alla presenza della cava di capo Caprazoppa per la produzione della calce (cava della Ghigliazza) e agli apporti del torrente Maremola, portò ad un deciso avanzamento nel tempo del litorale adiacente al capo.



Figura 19: Foto aerea del 1973 che mostra le due piattaforme isola realizzate davanti al centro abitato di Pietra Ligure (fonte: Regione Liguria)



Figura 20: Foto aerea del 1973 che mostra la piattaforma isola realizzata alla foce del torrente Bottassano (fonte: Regione Liguria)

Il litorale rimase stabile per una decina d'anni, ma tornò in crisi a cavallo degli anni'80, anche in seguito alla chiusura della cava della Ghigliazza. Si susseguirono quindi una serie di interventi per cercare di ripristinare le spiagge che andavano a scomparire, furono realizzati nuovi pennelli, collegate le piattaforme a riva ed eseguiti nuovi ripascimenti, ma nulla di tutto ciò ha potuto contrastare efficacemente l'erosione fino a che non si è determinata una nuova condizione di equilibrio e stabilità. Infine in questo litorale nel 2007 sono state realizzate altre tre piattaforme, questa volta sommerse, una dinnanzi a Pietra Ligure, di dimensione di circa 30 metri, distaccata da riva di circa 50 metri e posta accanto alle due emerse, ed altre due davanti la spiaggia di Borgio Verezzi, di dimensioni di circa 50 metri e distaccate da riva di circa 70 metri. Entrambi gli interventi sono stati accompagnati da ripascimento artificiale rispettivamente di 10000 m³ e di 14000 m³, e hanno determinato la formazione di un saliente nella zona di spiaggia retrostante l'opera con avanzamento della linea di riva di circa 12 m. Ovviamente sono attesi ulteriori monitoraggi per analizzare più approfonditamente l'efficacia dell'intervento.



Figura 21: Immagine che mostra la situazione attuale nella spiaggia dinnanzi Pietra Ligure e dove è visibile, a destra delle sue piattaforme emerse, la piattaforma semisommersa realizzata nel 2007 (fonte: Google Earth, Marzo 2017)



Figura 22: Immagine che mostra a destra della piattaforma isola emersa presso la foce del torrente Bottassano le due piattaforme semisommerse realizzata nel 2007 dinnanzi Borgio Verezzi (fonte: Google Earth, Marzo 2017)

- Spiaggia di Fiumaretta

Tale spiaggia si trova presso Marinella di Sarzana, in provincia di La Spezia, al confine con la regione Toscana.

Nel 1972 per iniziativa del ministero dei LL.PP. è stato predisposto un progetto di riequilibrio di questa spiaggia ormai quasi scomparsa con pericolo per la stabilità dei fabbricati.

Il progetto prevedeva la costruzione di quattro piattaforme ed il versamento di ripascimento con materiale prelevato dal fiume Magra e l'apertura di un varco nel molo guardiano di sinistra alla foce dello stesso corso d'acqua.

Il progetto fu attuato senza però realizzare il varco nel molo.



Figura 23: Foto aerea del 1973 che mostra l'intervento realizzato presso la spiaggia di Fiumaretta (fonte: Regione Liguria)

Inizialmente la spiaggia fu ricostruita e rimase stabile per qualche tempo ma la mancanza del varco non ne consentiva l'alimentazione e perciò lentamente si assistette ad un certo ritiro.

In seguito furono effettuati lavori non previsti di saldatura delle piattaforme alla spiaggia che ovviamente accelerarono il processo erosivo verso Marinella.

Nel 1994 fu aperto il varco previsto nel molo e si ebbe un immediato protendimento nella parte adiacente, ma l'alimentazione della parte più ad est fu impedita dai collegamenti fra piattaforme e spiaggia.

Ultimamente è stato chiuso il varco e ovviamente le cose stanno, sia pur lentamente, peggiorando.



Figura 24: Immagine che mostra la situazione attuale della spiaggia di Fiumaretta (fonte: Google Earth, Marzo 2017)

Marina di Massa

La spiaggia di Marina di Massa è posizionata pochi chilometri più a sud rispetto a Marinella di Sarzana.

La dinamica e l'evoluzione di questo tratto di litorale è legato in massima parte alla costruzione, poco più a nord, del porto di Carrara (1920), che ha provocato l'intercettazione dei sedimenti provenienti proprio da quella direzione, generando una forte situazione di erosione in tutta questa zona.

Prima di allora infatti la spiaggia era in continuo avanzamento, anche se tale progradazione stava diminuendo a causa dell'apporto di sedimenti sempre minore da parte del fiume Magra. La costruzione di questa opera ha però sconvolto totalmente l'equilibrio del litorale, che a partire dagli anni '30 è entrato in una tremenda situazione erosiva che ha portato alla realizzazione di barriere aderenti per salvaguardare le infrastrutture viarie costiere, le quali tuttavia non hanno fatto altro che comportare la scomparsa della spiaggia in tutto questo tratto.

Tra il 1938 ed il 1954 si è assistito ad un arretramento di 90-100 m, circa 6-7 m all'anno.

Negli anni '60 la situazione si è aggravata ulteriormente a causa anche delle pesanti escavazioni in alveo e ciò ha portato le varie amministrazioni a realizzare diversi interventi atti a difendere questo tratto di costa (scogliere distaccate, pennelli, ripascimenti, etc).

Uno di questi ha previsto l'utilizzo di piattaforme isole; tra il 1974 ed il 1977 infatti sono state realizzate 6 piattaforme isola emerse distaccate a protezione di un ripascimento di 100000mc.



Figura 25: Foto aerea del 1976 che mostra la costruzione delle piattaforme a difesa della spiaggia

Tali isole non hanno avuto l'effetto sperato, infatti probabilmente la condizione del litorale era troppo critica perché questo intervento avesse potuto avere effetto, e quindi con la speranza di migliorare la situazione fu pensato di collegarle a terra e trasformarli in pennelli.

Tra il 1978 ed il 1986 l'intero litorale di Marina di Massa fu oggetto di un intervento complessivo che ha previsto la costruzione di numerosi pennelli, le cui testate furono collegate ad una barriera sommersa. Nel 1989 anche i pennelli che erano nati per collegare le piattaforme a riva furono allungati e collegati ad una barriera sommersa, creando altre 4 celle identiche a quelle realizzate nel 1986.



Figura 26: Intervento di difesa del litorale di Massa realizzato tra il 1978 ed il 1986

Ovviamente tutti questi interventi hanno sì determinato la fine dell'erosione in questo tratto e la creazione di una spiaggia, però hanno solo spostato il problema poco più a sud, determinando nella vicina spiaggia di Marina dei Ronchi, un arretramento tra il 1985 ed il 1999 di 4m all'anno, costringendo quindi la realizzazione di nuovi interventi anche in questo tratto, innescando un vero e proprio circolo vizioso.

In definitiva nessun intervento di risoluzione definitiva è mai stato effettuato su questo litorale e ciò costringe ancora oggi la realizzazione di ripascimenti prima dell'avvio della stagione balneare.

Nella seguente figura 27 è possibile osservare la situazione attuale del litorale di Marina di Massa, dove sono evidenti anche i vari passaggi storici descritti precedentemente.



Figura 27: Immagine del 2016 di Marina di Massa (fonte: Google Earth)

- Litorale di Miliscola

Questo l'unico intervento che ha previsto l'utilizzo di piattaforme isola realizzato al di fuori della zona Liguria-Nord della Toscana di cui si ha una buona documentazione. Tale litorale si estende per circa 2 km con orientamento Ovest-Est tra i promontori di Monte di Procida e di Capo Miseno ed è limitato verso l'interno da un lago costiero (lago di Miseno-Maremorto).

L'equilibrio dinamico della spiaggia ha iniziato ad alterarsi negli anni '50/60, quando si è proceduto al prolungamento del canale di comunicazione tra il bacino di Maremorto (Lago Miseno) ed il mare: tale canale, fungendo da pennello, ha provocato un repentino arretramento (13 m nel periodo 1965-1974) dell'arenile di sottoflutto, posto ad est.

Sul litorale in erosione si è abbattuta nel 1976 una violenta mareggiata che ha indotto la realizzazione di un progetto organico di difesa attraverso la messa in opera di barriere radenti e di otto piattaforme isola tra il 1980 ed il 1988. Il progetto originale, mai ultimato, prevedeva la realizzazione di una nona piattaforma isola e di due pennelli collegati alle piattaforme più esterne, la prima e la nona.

Tali opere furono poste a 50 metri dalla riva ed a distanza l'una dall'altra sempre di 50 metri. Inoltre le loro dimensioni sono di circa 50m X 30m.



Figura 28: Situazione del litorale di Miliscola appena prima (sopra) e alcuni anni dopo (sotto) la realizzazione dell'intervento di protezione del litorale

Un monitoraggio continuo dell'evoluzione di tale tratto di spiaggia ha potuto constatare l'efficacia di questo intervento.

Fino al 1986 infatti c'è stata una rapida ricostruzione della spiaggia nell'area "protetta" dalle opere di difesa, con valori medi di avanzamento pari a 3 metri per anno; nel periodo 1986-1996 la posizione della linea di riva a tergo delle piattaforme-isole è rimasta sostanzialmente immutata, eccezion fatta per l'area situata posteriormente le ultime due piattaforme, posizionate proprio tra il 1986 ed il 1988, dove si è verificato un notevole ripascimento (5m/a). Nella parte orientale del settore, dove tali opere sono assenti, si è instaurato invece una tendenza di tipo erosionale con valori di arretramento nell'ordine di 0,5 m/a.

- Ischia

Come si può osservare dalla figura 29, anche a protezione della costa dell'isola d'Ischia, sul versante antistante l'isola di Procida, sono state realizzate numerose piattaforme isola.



Figura 29: Piattaforme isola realizzate a protezione delle coste dell'isola d'Ischia (fonte: Google Earth, Marzo 2017)

Purtroppo non si hanno documenti che descrivono i tempi ed i dettagli dell'intervento eseguito e nemmeno monitoraggi che hanno riportato gli effetti e le conseguenze ottenute sul litorale.

Con tale descrizione si conclude l'excursus riguardanti i vari interventi di protezione dei litorali eseguiti in Italia che hanno avuto come protagonista l'utilizzo delle piattaforme isola.

In definitiva è possibile trarre diverse conclusioni: innanzitutto in tutti i casi esaminati le conseguenze iniziali sono state buone, con avanzamenti e stabilizzazioni dei litorali senza peraltro produrre gravi ripercussioni nei tratti vicini.

Con il prosieguo del tempo molti di questi interventi si sono poi rivelati inefficaci, ma ciò non è dovuto alla tipologia di intervento ma al cambiamento delle condizioni che si sono avute. Nella maggior parte dei casi infatti sono cessati i ripascimenti periodici che erano previsti in fase di progetto oppure sono venuti a mancare meno gli apporti naturali di sedimenti che invece esistevano in precedenza. Tali accadimenti hanno spesso spinto le amministrazioni competenti a stravolgere l'idea di progetto iniziale, collegando a riva tali opere, trasformandoli di fatto in pennelli, e provocando nella quasi totalità dei casi più danni che benefici.

In conclusione quindi tali esperienze passate testimoniano che l'intervento mediante piattaforme isola può funzionare se progettato bene e risulta meno impattante rispetto ad altri, come possono essere le barriere parallele, però non devono mai venire meno le condizioni per le quali vengono progettate ed è essenziale ricorrere a periodici ripascimenti di materiale.

Infine è importante osservare come nel passato si sono avuti quasi esclusivamente esempi di piattaforme emerse, mentre solo più recentemente sono state realizzate anche strutture sommerse (come saranno quelle realizzate presso Castiglione della Pescaia), ma di cui ancora non si hanno dati di monitoraggio a disposizione, per cui è ancor più difficile poter fare previsioni a riguardo. Si può tuttavia supporre che se adeguatamente dimensionate e coadiuvate da un idoneo ripascimento artificiale, esse possano portare dei buoni effetti su litorali in fase erosiva (non troppo critica), senza peraltro avere ripercussioni sui tratti vicini.

4. CASO STUDIO CASTIGLIONE DELLA PESCAIA

Il caso studio in esame riguarda il litorale di Castiglione della Pescaia, per il quale la Regione Toscana ha progettato un ampio ed integrato intervento di difesa, poiché si trova in fase erosiva.

Esso riguarda tutta la porzione di costa compresa tra la foce del fiume Bruna e Punta Rocchette, per un'estensione totale di circa 7 km.



Figura 30: Posizione dell'area di studio (riquadro al centro) dalla Carta nautica I.I.M.

In particolare sono stati individuati diversi tratti dove intervenire, scelti tenendo conto sia del livello di criticità raggiunto, sia del posizionamento di attività turistiche e balneari da salvaguardare.

Si riportano dunque sommariamente gli interventi previsti per l'intera zona:

- ripascimento con l'obiettivo di far avanzare la linea di riva di 20 m nel tratto di 750 m subito a sud di Punta Capezzolo, protetto dalla costruzione di piattaforme isola sommerse;

 - ripascimento con l'obiettivo di far avanzare la linea di riva di 20 m nel tratto di 900 m subito a nord di Punta Capezzolo, protetto dalla costruzione di pennelli in parte emersi ed in parte sommersi;

 - ripascimento con l'obiettivo di far avanzare la linea di riva di 20 m nel tratto di 600 m nei pressi di Riva del Sole, dinnanzi al campeggio Sans Souci, protetto dalla costruzione di pennelli in parte emersi ed in parte sommersi;

- ripascimento con l'obiettivo di far avanzare la linea di riva di 10 m nel tratto di 150 m subito a sud della foce del Tonfone, abbinato alla costruzione di un pennello in parte emerso ed in parte sommerso;

- ripascimento con l'obiettivo di far avanzare la linea di riva di 20 m nel tratto di 250 m nei pressi della spiaggia di Roccamare, dinnanzi al campeggio Santa Pomata, protetto dalla costruzione di pennelli in parte emersi ed in parte sommersi;

- ripascimento con l'obiettivo di far avanzare la linea di riva di 20 m nel tratto di 250 m nella spiaggia delle Rocchette, protetto dalla costruzione di barriere sommerse;

La sabbia necessaria per il ripascimento verrà in gran parte dragata e trasportata dalla barra presente subito a sud del porto di Marina di Grosseto, mentre una piccola parte, di granulometria maggiore, verrà presa e trasportata da cava.

Per quanto riguarda le opere esse saranno tutte realizzate tramite massi naturali provenienti da cava.

Dopo avere effettuato una panoramica generale dell'intervento previsto per il ripristino ed il riequilibrio dell'arenile di Castiglione della Pescaia, questo studio sarà focalizzato sul primo tratto di progetto, ossia quello subito a sud di Punta Capezzolo, proprio a protezione del centro abitato di Castiglione della Pescaia, ed in particolare l'obiettivo sarà quello di studiare e modellare una forma ed una disposizione delle piattaforme isola che possa ottimizzare l'intervento.



Figura 31: Descrizione area d'intervento compresa tra la foce del Bruna e Punta Capezzolo

Per eseguire tale studio sarà utilizzato il codice di calcolo alle differenze finite SWASH (Simulating Wave till Shore), e quindi nei due seguenti paragrafi saranno riportate prima una breve descrizione del software, illustrandone sommariamente il funzionamento e le capacità da esso possedute, e poi la parte di validazione e calibrazione del modello, preludio necessario per poi eseguire lo studio sulle piattaforme isola.

4.1 SWASH MODEL

In questo breve capitolo è riportata una descrizione sommaria del codice di calcolo SWASH, il quale, come già detto, è lo strumento con cui è stato modellato il caso studio delle piattaforme isola progettate per difendere il litorale di Castiglione della Pescaia dall'erosione, che rappresenta il fulcro di questo elaborato.

Il software open source SWASH è un modello numerico alle differenze finite, creato e sviluppato dall'Università di Delft a partire dagli inizi degli anni duemila e basato sul lavoro di

Stelling and Zijlema (2003), Stelling and Duinmeijer (2003), Zijlema and Stelling (2005, 2008) e Smit et al. (2013), con lo scopo di simulare il moto di propagazione delle onde nelle zone costiere fino alla riva, con la possibilità di poter descrivere il fenomeno in una, due o tre dimensioni, a seconda della volontà dell'utente.

Questa possibilità di modellare in tre dimensioni, una scelta che non tutti i software operanti in tale campo permettono, è consentita perché oltre ad una griglia computazionale orizzontale che permette di indagare il moto in un campo bidimensionale, il modello dà anche la possibilità di suddividere la verticale in più strati, tanti quanti ne desidera l'utente (ovviamente maggiore sarà la suddivisione e maggiore sarà la precisione ottenuta con il modello ma d'altro canto anche l'onere computazionale e quindi la durata complessiva della simulazione), i quali permettono quindi di discretizzare il dominio soggetto a studio anche in verticale e dunque determinare caratteristiche del moto variabili con la profondità e di conseguenza ottenere risultati più accurati rispetto a software che operano solo in due dimensioni e che mediano le variabili sull'intera verticale.

Le equazioni alla base del modello sono le Nonlinear Shallow Water Equations (NSWE), ossia le equazioni di Navier-Stokes in forma non lineare caratteristiche delle acque poco profonde che includono la pressione non idrostatica e alcune equazioni di trasporto e che quindi permettono al software di rappresentare tutti i fenomeni di propagazione delle onde: diffrazione, rifrazione, riflessione e frangimento.

Parlando più in generale il codice di calcolo SWASH è in grado di simulare:

- Trasformazione delle onde sia nella surf che nella swash zone a causa di interazioni onda-onda non lineari, interazione di onde con correnti, interazione di onde con strutture, smorzamento delle onde dovuto alla vegetazione e onde che si infrangono, nonché run-up sul litorale;
- cambiamenti complessi dovuti a flussi rapidamente variabili che si hanno tipicamente nelle inondazioni costiere, ad es. rotture di diga, tsunami e onde di inondazione;
- flussi guidati dalla densità nei mari costieri, negli estuari, nei laghi e nei fiumi;
- circolazione oceanica su larga scala, maree e mareggiate.

In definitiva la filosofia di base del codice SWASH è quella di fornire un modello efficiente e robusto che consenta lo studio della propagazione di diversi tipi di onde e flussi d'acqua anche

in ambienti complessi e su un'ampia gamma di scale temporali e spaziali. Di conseguenza, SWASH consente di eseguire l'intero processo di modellazione in qualsiasi area di interesse. Ciò include sia applicazioni costiere su piccola scala, come le onde che si avvicinano alla spiaggia, la penetrazione delle onde in un porto, le onde di piena in un fiume, intrusione di sale in un estuario, sia applicazioni a larga scala riguardanti sistemi oceanici e forze meteorologiche per simulare le maree e le inondazioni dovute a tempeste.

Entrando maggiormente nello specifico del programma, la prima cosa da rimarcare è che, come molti altri codici open source, esso non presenta un'interfaccia grafico, ma quindi è necessario interagirci elaborando diversi file di testo, che compilati con un "mix" di parole chiave e valori numerici consente la modellazione dei fenomeni suddetti.

La facoltà di simulare una così ampia gamma di fenomeni è permessa grazie alla possibilità di creare diverse e numerose griglie orizzontali di input, anche di dimensioni e con risoluzione diverse l'una dall'altra, a seconda su quali aspetti e fenomeni del moto l'utente si vuole concentrare.

Tra queste griglie ovviamente le più importanti e imprescindibili sono quella computazionale e quella batimetrica, ma oltre ad esse SWASH dà la possibilità all'utilizzatore di poter descrivere la distribuzione spaziale all'interno del dominio considerato di diverse variabili quali: coefficiente di attrito al fondo, campo di corrente, water level, velocità del vento, pressione atmosferica, densità di vegetazione, distribuzione e tipologia di opere.

Inoltre consente anche l'immissione di griglie di input stazionarie riguardanti la salinità, la temperatura ed il carico solido in sospensione presenti all'interno del campo considerato e tali proprietà possono essere inserite anche in maniera non uniforme lungo la verticale, dando il programma la possibilità di immetterle per strati.

In tal modo è dunque possibile descrivere abbastanza nel dettaglio il dominio indagato, tenendo conto di diversi parametri.

Allo stesso modo SWASH permette un'ampia scelta per quanto riguarda le condizioni al contorno da applicare ai vari confini, che possono essere delle portate per unità di ampiezza ortogonali al campo scelto, o campi di velocità o, come avvenuto nel presente studio, generazione di moti ondosi.

A tal proposito il software permette diverse modalità di generazione:

- moto ondoso regolare con assegnata una determinata altezza ed un determinato periodo;
- moto ondoso descritto per mezzo di una serie di Fourier;
- moto ondoso descritto tramite uno spettro (che può essere il JONSWAP o quello di Pierson-Moskowitz) assegnando determinati parametri significativi;
- moto ondoso determinato da una serie temporale registrata.

Inoltre i confini stessi del dominio possono essere modellati come completamente riflettenti o confini aperti, possibilità consentita mediante l'inserimento di appositi "sponge layer", che permettono, modificando la loro ampiezza, diversi gradi di assorbimento delle onde.

Vi è infine la parte di computazione che può essere di qualsiasi durata ed è possibile richiedere gli output anche ad intervalli regolari durante la simulazione. Gli output che possono essere richiesti sono molteplici e vari, infatti si può ottenere campi di velocità della corrente, altezze significative d'onda, andamento della superficie libera, run up, set up, salinità e temperatura dell'acqua e molti altri ancora.

Alcuni di questi parametri possono essere anche calcolati mediati in un certo intervallo di tempo, oppure, se usata la stratificazione in più layer, è possibile richiederne il valore per ogni strato.

Infine essi possono essere ottenuti in qualsiasi punto del dominio anche se non appartenente a nessuna griglia poiché il software è in grado di determinarli per interpolazione.

Come già affermato in precedenza SWASH lavora alle differenze finite e di default utilizza le differenze centrate per risolvere il fenomeno, però a discrezione dell'utente è possibile utilizzare anche schemi upwind del primo, secondo e terzo ordine.

Questo soprattutto è consigliato in caso di moti dominati dai termini convettivi, poiché con il metodo delle differenze centrate potrebbero instaurarsi delle instabilità nelle soluzioni.

Un ultimo fattore importante di questo programma è che gli output possono essere restituiti sia in formato di testo che in un formato apposito per essere postprocessati tramite Matlab in maniera semplice e rapida e quindi rappresenta un'alternativa molto buona al fatto che non possiede un'interfaccia grafico.
4.1.1 VALIDAZIONE DEL MODELLO

Prima di entrare nel merito del caso studio è necessario effettuare una validazione del modello, ossia viene simulato un caso semplice, di cui è noto il comportamento e si verifica che la modellazione tramite SWASH restituisca buoni risultati.

Il caso preso in considerazione è il seguente:

- Campo da indagare di dimensioni pari a 1600 m long-shore e 600 m cross-shore;
- Batimetria regolare rettilinea parallela alla linea di riva (assunta anch'essa rettilinea) con profondità massima pari a circa 28 m. L'andamento batimetrico in direzione crossshore è stato ottenuto ipotizzando un profilo di Dean, quindi dato dalla relazione d= $A*y^{(2/3)}$, dove d è la profondità del fondo, y è la distanza cross-shore dalla linea di riva ed A è un parametro ricavabile in funzione del D₅₀ caratteristico della spiaggia. In questo caso è stato ipotizzato un D₅₀= 3 mm (una spiaggia di ghiaietta) al quale corrisponde un A pari a circa 0.39.

Applicando la formula di Dean per tutta la lunghezza cross-shore è stata ottenuta la batimetria del dominio;

 Moto ondoso incidente regolare con H= 2 m T= 7 s e direzione inclinata di 10° (in senso antiorario) rispetto alla normale alla linea di riva.

Per la modellazione su SWASH il caso è stato studiato nel seguente modo:

- Griglia computazionale di dimensioni 2400 m X 1260 m orientata ortogonalmente alla direzione principale del moto e suddivisa in celle di calcolo di dimensioni 2 m X 2 m (ovviamente la batimetria è stata ampliata in modo da coprire tutta la griglia computazionale);
- È stato considerato un unico strato verticale, quindi si è evitata la modellazione tridimensionale, in quanto non era intenzione studiare tale caso dettagliatamente, ma era solo una simulazione per vedere l'efficacia del modello, quindi si è preferito ottenere risultati più grossolani ma risparmiando onere computazionale e quindi tempo;
- Sponge Layer come condizioni al contorno, al fine di assorbire il più possibile il moto ai lati del dominio ed evitare quindi la riflessione, poiché se non viene specificata alcuna

condizione al contorno i confini del dominio sono considerati da SWASH come pareti riflettenti al 100%;

- Coefficiente di attrito al fondo assunto costante per tutto il dominio e pari a 0.03 m^{-1/3}s (utilizzando la formulazione di Manning);
- Viscosità cinematica turbolenta assunta costante e pari a 10⁻⁶ m²/s.

L'obiettivo primario ed iniziale era verificare innanzitutto che il modello riuscisse a simulare il fenomeno richiesto, quindi è stata effettuata una prima simulazione di 15 minuti richiedendo per tutti i punti del dominio in oggetto ed ad intervalli di 30 secondi il livello del water level ed i punti in cui avveniva il frangimento del moto ondoso.

Si riportano di seguito alcune immagini, a determinati time step della simulazione, degli output ottenuti da SWASH (in tutte le figure a seguire la linea rossa rappresenta la linea di riva).



Figura 32: Propagazione del moto ondoso a diversi time step: 1 minuto, 2 minuti, 5 minuti, 10 minuti e 15 minuti.



Figura 33: Linea dei frangenti a diversi time step: 2 minuti, 3 minuti e 5 minuti.

I risultati ottenuti sono da ritenersi molto positivi, infatti è possibile notare come sia la propagazione del moto che il frangimento nei pressi della costa siano realistici, nonostante (soprattutto per quanto riguarda il frangimento) si potesse temere, a causa di una scarsa risoluzione verticale in concomitanza con un fondale abbastanza pendente e profondo, di ottenere risultati poco veritieri.

Dall'andamento del water level inoltre è possibile osservare come anche il fenomeno della rifrazione sia bene rappresentato e che le condizioni al contorno utilizzate diano dei buoni effetti, infatti i confini del dominio approssimano bene l'ipotesi di confine aperto e la riflessione all'interno del campo di moto è minima, soprattutto nel centro del campo indagato. Infine ultima cosa che si può notare è che i primi frangimenti si iniziano ad avere dopo circa 2 minuti e che al terzo minuto già si verificano in tutto il dominio considerato. Il passo successivo è stato quindi quello di indagare il campo delle velocità, dove lo scopo era quello di identificare l'andamento di tale grandezza nel tempo, sia analizzandola in termini di valore assoluto, sia in termini di componente litoranea.

È da aspettarsi infatti una velocità, in senso assoluto, che abbia un andamento crescente nel tempo, con un brusco innalzamento soprattutto con l'iniziare del fenomeno di frangimento e che inseguito ad esso continui a crescere fino ad arrivare ad una condizione di stazionarietà.

Analogamente essendo un moto con una certa inclinazione rispetto alla linea di riva, una volta iniziata la fase di frangimento dovrebbe crearsi una corrente litoranea con una velocità crescente man a mano continui a verificarsi tale fenomeno fintanto che anche in questo caso non si raggiunga una situazione di stazionarietà.

Quindi sono state "runnate" diverse simulazioni con gli stessi parametri della precedente, tutte con durata diversa, partendo da 1 minuto ed arrivando a 10 ed in ognuna di esse sono stati richiesti sia il valore della velocità in senso assoluto, sia quello delle sue componenti cross-shore e long-shore, mediati, in ognuno dei casi, nell'ultimo minuto della simulazione.

Sono riportati di seguito i grafici che riassumono i risultati ottenuti e dove i vari punti rappresentano il valore massimo della velocità ottenuto per ogni intervallo di tempo:



Figura 34: Andamento della velocità assoluta nel tempo.



Figura 35: Andamento della velocità litoranea nel tempo.

Come già precedentemente anticipato si può osservare che la velocità si innalza subito dopo che ha inizio il frangimento e che la componente long-shore inizia ad avere valori non trascurabili proprio da quel momento. Inoltre si raggiunge una condizione di stazionarietà dopo circa 6 minuti.

A titolo di esempio sono riportate anche le immagini rappresentative del campo di velocità all'interno del dominio di interesse tra il 6° ed il 7° minuto, quindi nel primo intervallo di tempo nel quale è stata raggiunta la massima velocità.



Figura 36: Distribuzione dei valori della velocità assoluta all'interno del dominio mediati nell'ultimo minuto della simulazione di durata di 7 minuti.



Figura 37: Distribuzione dei valori della velocità litoranea all'interno del dominio mediati nell'ultimo minuto della simulazione di durata di 7 minuti.

Da osservare come la corrente litoranea viene a formarsi solo all'interno della surf zone mentre presenta valore praticamente nullo prima di essa.

A questo punto, l'ultimo passo della validazione del modello è stata la calibrazione dei coefficienti di attrito al fondo e di viscosità del fluido, in modo da vedere che cambiamento si ha nel moto simulato al variare di tali parametri.

Iniziando dal primo, è stato simulato il medesimo caso lanciato nelle precedenti "run", ma modificando il valore di attrito al fondo (con formulazione di Manning) da 0.03 m^{-1/3}s a 0.025 m^{-1/3}s.

Il risultato dovrebbe essere un andamento della velocità analogo a quello riportato in figura 34 ma con il raggiungimento di valori più alti, poiché è minore la resistenza offerta dal fondo. Anche in questo caso sono state lanciate dieci diverse simulazioni di durata crescente tra 1 e 10 ed in ognuna di esse è stata richiesta la velocità mediata all'interno dell'ultimo minuto di simulazione.

Inoltre la fascia considerata in questo test è quella centrale di ampiezza di 400 m, dove il moto si può considerare del tutto uniforme al suo interno poiché praticamente per nulla influenzato dai, seppur piccoli, effetti di riflessioni dovuti ai bordi.

I risultati rappresentativi dei massimi della velocità assoluta e di quella litoranea per ogni intervallo di tempo sono riportati rispettivamente nelle figure 38 e 39.

42



Figura 38: Andamento della velocità assoluta nel tempo nel caso in cui il fattore di attrito con formulazione di Manning sia posto pari a 0.03 ed a 0.025.



Figura 39: Andamento della velocità litoranea nel tempo nel caso in cui il fattore di attrito con formulazione di Manning sia posto pari a 0.03 ed a 0.025.

Le aspettative sono state confermate, infatti nel caso con attrito al fondo minore la velocità assoluta arriva fino a 1.25 m/s e quella litoranea a 0.99 m/s, mentre nel caso con resistenza maggiore si ferma a 1.12 m/s quella assoluta ed a 0.83 m/s la litoranea. La condizione di stazionarietà si raggiunge sempre intorno ai 6 minuti circa.

Si riporta infine anche il confronto dell'andamento della velocità long-shore lungo la sezione cross-shore:



Figura 40: Andamento della velocità litoranea mediata nell'ultimo minuto della simulazione di durata di 7 minuti lungo la sezione cross-shore nel caso in cui il fattore di attrito con formulazione di Manning sia posto pari a 0.03 ed a 0.025.

Si può vedere come in entrambi i casi la velocità litoranea venga a formarsi praticamente alla stessa distanza da riva, e quindi è evidente che l'ampiezza della surf zone sia la medesima in entrambi i casi, ma come, in linea con quanto detto finora, nel caso con meno attrito la velocità litoranea raggiunga valori più alti.

Esaminati gli effetti prodotti dalla variazione del coefficiente di attrito, si effettua lo stesso procedimento per analizzare l'influenza della viscosità turbolenta orizzontale sul campo di moto.

A tal proposito è necessaria una precisazione, ossia che il codice di calcolo SWASH permette tre diverse formulazioni per tale parametro:

- Modellazione tramite parametro costante (m²/s);
- Modellazione tramite il modello di Smagorinsky e quindi attribuendo un valore alla costante adimensionale di Smagorinsky;
- Modellazione tramite l'ipotesi di lunghezza di miscelamento di Prandtl e quindi assegnando un valore in metri di tale lunghezza.

Nel caso studiato è stata scelta per semplicità la prima formulazione ed è stato fatto variare tale parametro v, partendo dal valore di 10^{-6} m²/s ed incrementandolo via via (in questo caso l'incremento va visto in termini di ordini di grandezza di differenza).

Il coefficiente di attrito al fondo è stato, ovviamente, sempre tenuto costante e pari a 0.03. Quello che ci si aspetterebbe in questo caso è che aumentando la viscosità turbolenta di conseguenza aumenti anche l'interazione e quindi il trascinamento tra le particelle fluide e che quindi in definitiva tale incremento dovrebbe sfociare in una maggiore uniformità del campo di moto.

Tutto ciò dovrebbe tradursi, facendo riferimento ai grafici mostrati finora ed in particolare alla figura 40, in un ingrandimento della surf zone con diminuzione dell'apice della campana, poiché l'aumento di sforzi tangenziali all'interno del fluido coinvolge un maggior volume di esso ma diminuisce il valore dell'intensità massima.

Di seguito si riporta l'andamento della velocità long-shore all'interno della sezione cross-shore del dominio sempre considerando l'intervallo tra il sesto ed il settimo minuto della simulazione (preso oramai come periodo di riferimento) e prendendo i seguenti valori di v $[m^2/s]$: 10^{-6} , 10^{-5} , 10^{-4} , 0.1, 0.5 e 1.





Da questi grafici è possibile dedurre diverse osservazioni.

Innanzitutto risulta evidente come per valori molto bassi della viscosità (risultati ottenuti con v compreso tra 10^{-6} m²/s e 10^{-4} m²/s) i valori ottenuti sono pressochè identici ed infatti le curve si sovrappongono perfettamente senza alcuna possibilità di distinguerle tra loro.

All'incrementare ancora del valore del parametro si inizia invece a denotare un abbassamento dell'apice della curva, come precedentemente anticipato, mentre è molto meno visibile l'allargamento della surf zone che era lecito aspettarsi. Questo tuttavia presumibilmente è dovuto al tipo di batimetria preso in esame, poiché, come già osservato, si ha un frangimento proprio a ridosso della linea di riva, dati i fondali abbastanza profondi anche avvicinandosi a costa, e quindi la zona dove la turbolenza assume un ruolo importante è molto ristretta.

Per comprovare questa ipotesi si effettua la medesima simulazione su un fondale con pendenza molto più dolce (ricavato supponendo un profilo di Dean riferito a un diametro caratteristico pari a 0.3 mm). Così facendo è ottenuta una batimetrica che all'interno dello stesso dominio varia tra circa -9 m a 0 (mentre prima si arrivava a -27 m).

Si riportano di seguito le immagini che mostrano l'intensità della velocità totale e di quella litoranea all'interno del dominio (si riportano ad esempio quelle corrispondenti a v= 10^{-5} m²/s).



Figura 42: Distribuzione dei valori della velocità assoluta all'interno del dominio mediati nell'ultimo minuto della simulazione di durata di 7 minuti ottenuta assegnando una batimetria corrispondente ad un profilo di Dean associato ad un D₅₀=0.3 mm



Figura 43: Distribuzione dei valori della velocità litoranea all'interno del dominio mediati nell'ultimo minuto della simulazione di durata di 7 minuti ottenuta assegnando una batimetria corrispondente ad un profilo di Dean associato ad un $D_{50}=0.3$ mm

Come si può ben vedere la zona interessata dalla corrente litoranea è ben più estesa rispetto al caso di fondo ripido.

46

Quindi ricavando anche in questo contesto l'andamento della velocità long-shore lungo la sezione trasversale si ottiene il seguente grafico:



Figura 44: Andamento della velocità litoranea mediata nell'ultimo minuto della simulazione di durata di 7 minuti lungo la sezione cross-shore nel caso in cui la viscosità sia posta pari rispettivamente a 10⁻⁵, 0.1, 0.5 ed 1.

Tale figura conferma ampiamente quanto appena sopra ipotizzato e si può vedere nettamente l'allargamento unito all'abbassamento della campana rappresentante la surf zone con l'aumentare della viscosità (in questo caso abbiamo diminuito le viscosità testate escludendo $v=10^{-6}$ m²/s e $v=10^{-4}$ m²/s che come si è osservato in precedenza producono gli stessi risultati di $v=10^{-5}$ m²/s).

Per concludere questa validazione è stato eseguito un ultimo test case, considerando in questo caso la presenza di un bacino chiuso all'interno del campo in esame, situato, in direzione cross-shore, a partire circa da metà della surf zone fino a costa ed occupante, in direzione long-shore, circa metà del dominio. Per maggiore chiarezza si può vedere tale schematizzazione in figura 45.

L'obiettivo di tale simulazione è osservare, al variare sempre della viscosità turbolenta orizzontale, come varia il campo di moto posto subito lateralmente al bacino, poiché a regola aumentando la viscosità esso dovrebbe essere sempre più uniforme, con l'acqua che tende a muoversi tutta nella solita direzione, mentre in caso di viscosità bassa o addirittura nulla (come ipotizzato in una delle nostre simulazioni), si dovrebbe avere una maggiore dispersione delle particelle fluide ed una maggiore formazione di vortici.

47

La batimetria utilizzata è quella di fondale dolce e le varie simulazioni sono corrispondenti a valori di v $[m^2/s]$ pari rispettivamente a 0, 0.1, 0.5 e 1. Sono riportati di seguito i risultati ottenuti.



Figura 45: Propagazione del moto ondoso in caso di restringimento dovuto alla presenza di un bacino chiuso.



Figura 46: Rappresentazione vettoriale del campo delle velocità nei pressi del bacino chiuso corrispondente a v=0.



Figura 47: Rappresentazione vettoriale del campo delle velocità nei pressi del bacino chiuso corrispondente a v=0.1.



Figura 48: Rappresentazione vettoriale del campo delle velocità nei pressi del bacino chiuso corrispondente a v=0.5.



Figura 49: Rappresentazione vettoriale del campo delle velocità nei pressi del bacino chiuso corrispondente a v=1.

Anche in questo test case il codice di calcolo ha restituito i risultati ipotizzati e sperati. Infatti è possibile notare facilmente dalle immagini precedenti come in caso di viscosità nulla si ha una formazione di vortici nei pressi del bacino e non vi è una vera e propria direzione prevalente ed uniforme del moto. D'altro canto invece si osserva come al crescere della viscosità diminuisca la vorticosità della zona ed il moto delle particelle tenda ad uniformarsi verso un'unica direzione, che è quella caratteristica del moto. Ovviamente al contempo diminuisce l'intensità di tale moto poiché come già sperimentato in precedenza, all'aumentare della viscosità e di conseguenza dell'uniformità fa da contraltare una diminuzione proprio dell'intensità della corrente.

4.2 MODELLAZIONE PIATTAFORME ISOLA

Per quanto riguarda la modellazione del caso studio, la prima cosa da fare è scegliere l'estensione del dominio computazionale, ossia i punti nei quali si vuole che il modello ci restituisca le soluzioni delle simulazioni. In questo caso quindi il campo di interesse ha dimensione di 750 m long-shore, a sud di punta Capezzolo, e 500 m in direzione cross-shore. All'interno di tale dominio è richiesta la soluzione su una maglia rettangolare di 1m X 1m, in modo tale da ottenere una situazione abbastanza dettagliata che permetta di comprendere bene le differenze che si hanno al variare delle configurazioni di progetto.



Figura 50: È riportata in verde la griglia rappresentante il dominio delle soluzioni

Ovviamente il dominio computazionale non coincide esattamente con la griglia computazionale, che come già spiegato nel capitolo precedente rappresenta l'insieme di punti, sempre distribuiti su una maglia rettangolare, nei quali vengono calcolate le soluzioni vere e proprie ed essa sarà maggiore del dominio, poichè per avere dei risultati abbastanza precisi all'interno di un certo campo è necessario studiarne uno maggiormente esteso dove le instabilità e le imprecisioni dovuti ai bordi non vadano ad interessare la zona di interesse.

Anch'essa avrà risoluzione di 1 m X 1m ed inoltre dovrà essere inclinata in direzione ortogonale al moto, quindi prima di poter procedere al suo dimensionamento è necessario la scelta del moto ondoso da imporre come condizione al contorno.

Per fare ciò si è fatto affidamento allo studio meteomarino effettuato per redigere il progetto preliminare, dal quale risulta che il settore prevalente è quello compreso tra 150° N e 190° N, con la direzione dalla quale provengono le mareggiate di altezza maggiore che è 160° N.

Dallo studio meteomarino si ottengono le caratteristiche d'onda a largo, ma essendo che nel caso in esame le simulazioni partono già da batimetrie minori (circa -7 m), tali risultati sono stati rielaborati tramite la teoria lineare del moto ondoso, tenendo conto dei fenomeni di rifrazione e shoaling e sono state ottenute due configurazioni di onda di progetto, una più frequente ed una più estrema:

- La prima che prevede i seguenti parametri: H=2.5 m, T=6.3 s, Dir=168 °N;
- La seconda invece caratterizzata da: H= 5 m, T= 8.2 s, Dir=172°N.

Dunque su Swash si imposteranno due differenti tipi di generazione di moto ondoso regolare con tali caratteristiche ed ogni configurazione sarà testata con entrambe le condizioni. Trovata infine la configurazione definitiva di progetto essa sarà sottoposta ad ulteriori due prove dove verranno imposte condizioni di moto irregolari che avranno come parametri significativi quelli sopra riportati.

51



Figura 51: Settore di traversia dell'area di studio (in rosso è indicato il settore di traversia principale).

Considerando quindi che la normale al litorale in oggetto ha direzione 196°N, si avranno due griglie computazionali distinte a seconda del tipo di onda prescelto.

Per quanto riguarda la configurazione di onda frequente, sarà utilizzata una griglia computazionale di dimensioni 850m X 1210m orientata perpendicolarmente alla direzione 168°N.

Nel caso invece di onda estrema si avrà una griglia di dimensioni di 1000m X 1190m orientata perpendicolarmente alla direzione 172°N.

Infine viene inserita anche la griglia batimetrica, la quale è ricavata da un rilievo eseguito su commissione degli stabilimenti balneari nel 2014 e che viene estesa in modo da ricoprire per intero la griglia computazionale ed ha risoluzione 5m X 5m.

Si riporta in figura 52 l'estratto della batimetria per il solo dominio di interesse.



Figura 52: Batimetria all'interno del dominio di interesse (la linea nera rappresenta la linea di riva)

È possibile osservare come all'interno di questi 500m la profondità massima raggiunta sia di 6.5 m circa e come il profilo del fondo sia abbastanza dolce e regolare fino a circa 150 m dalla riva, dove è presente una barra di altezza circa 1m che fa passare la profondità da -2.2m a -1.2m. Tale barra ha un'estensione di circa 50m, dopo i quali la profondità torna circa la medesima del tratto a largo della stessa per continuare a risalire dolcemente fino alla linea di riva.

4.2.1 CONFIGURAZIONI STATO ATTUALE

In questo paragrafo viene descritto lo stato attuale del litorale antistante il centro abitato di Castiglione della Pescaia (rappresentato precedentemente in figura 31) e sono analizzate le possibili cause del suo stato di erosione.

Sono dunque effettuate le simulazioni considerando le condizioni attualmente in essere in questo tratto di costa, per verificare le caratteristiche dei campi di moto presenti ed individuare le criticità della zona in esame che potrebbero di conseguenza essere la causa dello stato di erosione in cui il litorale versa.

Sono lanciate quindi due simulazione, una per configurazione d'onda, di durata complessiva di 10 minuti, dal momento che nel paragrafo 4.1.1 si era osservato come in un caso molto simile già dopo 6 minuti si era raggiunta la stazionarietà del campo di moto e quindi si aveva dei risultati attendibili su cui poter lavorare.

53

I parametri richiesti sono l'andamento del water level e le zone di frangimento ad intervalli regolari di 1 minuto, ed il campo delle velocità in valore assoluto ed il campo di altezze d'onda significative, mediati negli ultimi due minuti della simulazione.

Sono stati scelti quest'ultimi due parametri come quelli rappresentativi dello stato di moto e quindi quelli sul quale poter lavorare per trovare le configurazioni più adatte per salvaguardare il litorale.

Si riportano di seguito le immagini rappresentanti le soluzioni restituite dalla simulazione relativa ad H=2.5 m.



Figura 53: Propagazione del moto ondoso a regime con altezza d'onda pari a 2.5 metri



Figura 54:Rappresentazione della linea dei frangenti all'interno del dominio di interesse con moto ondoso di H=2.5m



Figura 55:Rappresentazione del campo delle velocità in valore assoluto all'interno del dominio di interesse mediato negli ultimi due minuti della simulazione



Figura 56:Rappresentazione del valore d'altezza d'onda significativa all'interno del dominio di interesse mediato negli ultimi due minuti della simulazione

È possibile fare delle importanti osservazioni sui risultati ottenuti, in particolare a riguardo delle zone dove avvengono i frangimenti e sul campo delle velocità (fig.54-fig.55).

Si può notare infatti come il frangimento del moto ondoso avvenga per lo più a circa 300 m dalla linea di riva, stessa zona nella quale si hanno i massimi valori del campo di velocità.

Campo di velocità che presenta un'altra zona ad elevata intensità proprio a ridosso della barra, a circa 150 m dalla linea di riva.

Inoltre sono presenti anche delle zone dove le velocità sono relativamente elevate anche proprio nei pressi della linea di riva, anche se i valori raggiunti sono notevolmente più bassi (circa 0.4 m/s) rispetto a quelli raggiunti sia nella zona dei frangenti (0.9 m/s circa), sia nel tratto subito a largo della barra (circa 0.7 m/s).

Si può presupporre tuttavia che i campi di moto vicini alla linea di riva erodano la spiaggia e la trasportino un po' più a largo oltre la barra, dove poi i campi di moto più intensi ne facilitino il trasporto verso nord oltre Punta Capezzolo, che si estende in mare proprio fino all'altezza della barra.

Per quanto riguarda invece le figure 53 e 56, esse non necessitano di ulteriori commenti, infatti rappresentano dei risultati in linea con un moto che si propaga su un fondale abbastanza dolce e regolare. L'unica cosa che si può osservare dalla figura 53 è come sia correttamente simulato il fenomeno della rifrazione dal modello, infatti il moto ondoso è generato con una discreta inclinazione rispetto alla linea di riva, ma man a man che si propaga è possibile notare come si allinei sempre di più con essa.

Sono riportati di seguito anche i risultati ottenuti per la simulazione dello stato attuale riferiti alla simulazione con H=5 m.



Figura 57: Propagazione del moto ondoso a regime con altezza d'onda pari a 5 metri.



Figura 58: Rappresentazione delle zone di frangimento all'interno del dominio di interesse con moto ondoso di H=5m



Figura 59: Rappresentazione del campo delle velocità in valore assoluto all'interno del dominio di interesse con moto ondoso di H=5m mediato negli ultimi due minuti della simulazione



Figura 60: Rappresentazione del valore d'altezza d'onda significativa all'interno del dominio di interesse con moto ondoso di H=5m mediato negli ultimi due minuti della simulazione

In questo caso di evento estremo è possibile osservare come non si abbia più una chiara linea di frangimento ma come le onde inizino a frangere molto prima, come era lecito aspettarsi, e quindi non si ha più il formarsi di uniformi ed intensi campi di velocità.

Anche osservando i valori di tali campi infatti è possibile notare come non si raggiungano gli stessi picchi massimi, ma al tempo stesso si hanno dei campi di intensità maggiore nei pressi della linea di riva con dei valori che raggiungono anche gli 0.5-0.6 m/s.

È necessario quindi riuscire a realizzare un intervento che riesca ad attenuare i campi di moto in entrambe le situazioni, perché se da una parte è vero che la condizione più frequente è quella con altezza d'onda pari a 2.5m, d'altra parte è da considerarsi che seppur rara la mareggiata con onda di 5m talvolta si verifica ed è quella che crea i maggiori danni al litorale. Terminata l'analisi sulle condizioni in cui versa attualmente il litorale in esame, nel prossimo paragrafo saranno testate e studiate varie soluzioni per cercare di porre rimedio a tale situazione.

4.2.2 CONFIGURAZIONI DI PROGETTO

L'intervento proposto per porre rimedio allo stato di erosione del litorale in oggetto è un ripascimento protetto con delle piattaforme isola sommerse.

Come già visto nei primi capitoli questo tipo di intervento è molto delicato ed inoltre molto poco sperimentato (praticamente mai se si considerano piattaforme isola sommerse), quindi non ci sono a disposizione molti casi studio su cui fare riferimento.

Le uniche considerazioni che è possibile fare è che sono una tipologia di intervento molto particolare, dove i parametri che incidono sono tre: dimensioni della piattaforma, ampiezza dei varchi e distanza da riva.

È necessario individuare la corretta posizione delle opere ed il giusto dimensionamento altrimenti si corre il rischio di arrecare un danno al litorale invece che proteggerlo.

Infine l'ultima cosa da osservare è che essendo richiesto un sistema di protezione sommerso esso avrà un effetto ancora più soft sul litorale, ed avendo già riportato nei capitoli iniziali come questo sistema di protezione sia considerato tra i più soft fra quelli esistenti, sarà necessario trovare una soluzione per la quale non vengano realizzate delle opere inutilmente.

58

Si decide quindi di iniziare testando tre diverse configurazioni di progetto:

1- 5 isole ellittiche di dimensioni in sommità (-0.5 m s.l.m) 30m x 20m, distanziate di 120m e poste a circa 70m dalla costa, subito a riva della barra, dove la profondità oscilla tra i 2 ed i 2.5 m;



Figura 61: Rappresentazione planimetrica della configurazione 1 (tutte le misure sono espresse in metri)

 2- Stessa configurazione precedente ma posta subito a largo della barra, a circa quindi 160m dalla costa, dove la profondità è circa 2.5 m;



Figura 62: Rappresentazione planimetrica della configurazione 2 (tutte le misure sono espresse in metri)

3- Configurazione identica alla prima ma con due pennelli sommersi che collegano la seconda e la quarta isola alla linea di riva.



Figura 63: Rappresentazione planimetrica della configurazione 3 (tutte le misure sono espresse in metri)

Queste prove iniziali servono innanzitutto per testare il parametro distanza da riva, ossia ricavare informazioni sulla posizione corretta dove realizzare tali opere.

Inoltre si è partiti con dimensioni abbastanza piccole per vedere se già con esse si possono notare effetti rilevanti sul moto.

Infine la terza configurazione è sperimentata per osservare il comportamento d'insieme che possono avere isole e pennelli sommersi, dal momento che in alcuni interventi, che hanno anche avuto degli esisti positivi nel passato, si è optato per tale soluzione.

Per effettuare dei confronti tra le soluzioni sperimentate e lo stato attuale si riportano le immagini, per ogni configurazione, del campo delle velocità e dell'altezza d'onda significativa all'interno del dominio di interesse, sia in caso di evento frequente, sia nel caso estremo (i valori di tale grandezze sono sempre mediati negli ultimi due minuti della simulazione).



- Configurazione 1 (5 isole ellittiche 30m X 20m a riva della barra)

Figura 64:Rappresentazione del campo delle velocità in valore assoluto nel caso di configurazione 1 con onda di H=2.5m



Figura 65: Rappresentazione del campo dell'altezza d'onda significativa nel caso di configurazione 1 con onda di H=2.5m



Figura 66: Rappresentazione del campo delle velocità in valore assoluto nel caso di configurazione 1 con onda di H=5m



Figura 67: Rappresentazione del campo dell'altezza d'onda significativa nel caso di configurazione 1 con onda di H=5m

Già solo confrontando queste immagini con le corrispondenti in assenza di opere (figure 55, 56, 59, 60) è possibile vedere come, in entrambi i casi gli effetti delle piattaforme isola sono molto lievi e soprattutto localizzati. Come si poteva immaginare, dato la notevole dimensione del varco rispetto a quella della piattaforma, le varie opere non interagiscono tra loro ed ognuna funziona come corpo isolato. Inoltre, probabilmente a causa delle piccole dimensioni di entrambi gli assi dell'ellisse, gli effetti sembrano svanire anche poco dopo l'isola ed in entrambe le situazioni i valori delle velocità nei pressi della riva sono pressochè invariate, ed anzi si può notare un instaurarsi di campi di moto di maggiore intensità a tergo di alcune di queste opere.

Per quanto riguarda il campo delle altezze d'onda si può notare una diminuzione di esso nei pressi delle piattaforme e nelle fasce strettamente a riva di esse, mentre nei varchi la situazione rimane invariata.



- Configurazione 2 (5 isole ellittiche 30m X 20m a largo della barra)

Figura 68:Rappresentazione del campo delle velocità in valore assoluto nel caso di configurazione 2 con onda di H=2.5m



Figura 69: Rappresentazione del campo dell'altezza d'onda significativa nel caso di configurazione 2 con onda di H=2.5m



Figura 70: Rappresentazione del campo delle velocità in valore assoluto nel caso di configurazione 2 con onda di H=5m



Figura 71: Rappresentazione del campo dell'altezza d'onda significativa nel caso di configurazione 2 con onda di H=5m

Con questa configurazione si è ottenuto un risultato importante, infatti se si confrontano le figure 55 e 68, si può notare come questa disposizione abbatta l'intenso campo di moto che si forma normalmente in condizione di onda frequente a largo della barra. Questo è già un primo risultato importante di cui prendere nota, anche se tale configurazione non potrà essere la prescelta poiché è facile osservare come nei pressi della riva il campo delle velocità risulti il medesimo e come nel caso di evento estremo non si noti alcun cambiamento significativo all'interno del dominio di interesse.

Per quanto riguarda invece il campo delle altezze d'onda significativa, anche in questa configurazione, analogamente alla precedente, si hanno degli effetti localizzati soltanto nei pressi e nelle zone dietro le opere, ma in generale non sono ottenute grandi modifiche al campo.

- Configurazione 3 (5 isole ellittiche 30m X 20m a riva della barra con 2 pennelli sommersi di collegamento alla costa)



Figura 72: Rappresentazione del campo delle velocità in valore assoluto nel caso di configurazione 3 con onda di H=2.5m



Figura 73: Rappresentazione del campo dell'altezza d'onda significativa nel caso di configurazione 3 con onda di H=2.5m



Figura 74: Rappresentazione del campo delle velocità in valore assoluto nel caso di configurazione 3 con onda di H=5m





Come per la configurazione 2, anche in questo caso è stato ottenuto un risultato importante, da tenere a mente, per riuscire a determinare poi la configurazione di progetto definitiva, che comunque non può essere questa.

È possibile osservare come infatti in tale caso, contrariamente al precedente e come era lecito aspettarsi, non si ha, analogamente alla configurazione 1, alcuna modifica al campo di moto a largo della barra, ma a differenza di essa si può notare un attenuamento del valore della velocità nei pressi della costa, soprattutto nei tratti interessati dalla realizzazione dei pennelli sommersi.

D'altro canto per quanto riguarda le altezze d'onda, valgono le stesse considerazione fatte per le configurazioni precedenti.

- Ulteriori osservazioni

Le immagini finora riportate sono abbastanza esplicative della situazione, però allo stesso tempo non sono sempre di facile lettura e talvolta possono sfuggire dei dettagli importanti.

Quindi i risultati delle simulazioni sono stati sottoposti a successive elaborazioni con lo scopo di ottenere ulteriori informazioni sulla situazione.

È stato perciò deciso di suddividere l'ultima parte del dominio in fasce, ossia considerando il sistema di coordinate delle figure, si è partiti dall'altezza 680m in direzione cross-shore e si è suddiviso il dominio fino alla linea di riva, che si situa a circa 870m, in fasce di ampiezza variabile tra i 20m ed i 40m e per ognuna di essa sono stati ricavati i valori medi dei campi delle velocità e delle altezze d'onda.

Per il campo di velocità, in verità, è stato ricavato anche il valore medio all'interno della fascia comprendente i 10 metri subito antistanti la linea di riva, poiché considerato un parametro molto rappresentativo per descrivere il fenomeno di erosione in atto.

Sono stati inoltre ottenuti anche dei profili dell'andamento di queste grandezze sia per tali fasce, sia per strisce trasversali alla linea di riva, in modo da far vedere come varia il profilo sia della velocità, che dell'altezza d'onda, quando si è in presenza di piattaforme isola.

Per maggior chiarezza, nelle seguenti figure 76 e 77 sono rappresentate tali zone prendendo come esempio la configurazione 1.



Figura 76: Suddivisione in fasce del dominio studiato



Figura 77: Suddivisione in strisce trasversali alla linea di riva del dominio studiato

Sono quindi riportati di seguito alcuni dei risultati ottenuti (quelli ritenuti più significativi), sia

sotto forma di tabella che di grafico.

CAMPO DELLE VELOCITA'					
H= 2.5m	STATO ATTUALE [m/s]	ISOLE A RIVA DELLA BARRA [m/s]	ISOLE A LARGO DELLA BARRA [m/s]	ISOLE CON PENNELLI [m/s]	
FASCIA 1	0.288	0.274	0.173	0.289	
FASCIA 2	0.399	0.401	0.252	0.404	
FASCIA 3	0.284	0.300	0.213	0.296	
FASCIA 4	0.132	0.104	0.139	0.098	
FASCIA 5	0.135	0.185	0.179	0.166	
FASCIA 6	0.224	0.242	0.245	0.226	
MEDIA TOTALE	0.244	0.251	0.200	0.247	

Tabella 1: Valori medi delle velocità per le varie configurazioni all'interno delle varie fasce del dominio in caso di evento frequente

CAMPO DELLE VELOCITA'				
H= 2.5m	STATO ATTUALE [m/s]	ISOLE A RIVA DELLA BARRA [m/s]	ISOLE A LARGO DELLA BARRA [m/s]	ISOLE CON PENNELLI [m/s]
ULTIMI 10 m	0.248	0.241	0.247	0.229

Tabella 2: Valori medi delle velocità per le varie configurazioni negli ultimi 10m antistanti la linea di riva in caso di evento frequente

CAMPO DELLE ALTEZZE D'ONDA				
H= 2.5m	STATO ATTUALE [m]	ISOLE A RIVA DELLA BARRA [m]	ISOLE A LARGO DELLA BARRA [m]	ISOLE CON PENNELLI [m]
FASCIA 1	1.25	1.25	1.16	1.25
FASCIA 2	1.01	1.02	0.93	1.02
FASCIA 3	0.77	0.77	0.76	0.78
FASCIA 4	0.65	0.59	0.64	0.60
FASCIA 5	0.53	0.47	0.51	0.47
FASCIA 6	0.23	0.22	0.22	0.22
MEDIA TOTALE	0.74	0.72	0.70	0.72

Tabella 3: Valori medi delle altezze d'onda per le varie configurazioni all'interno delle varie fasce del dominio in caso di evento frequente

CAMPO DELLE VELOCITA'				
H= 5m	STATO ATTUALE [m/s]	ISOLE A RIVA DELLA BARRA [m/s]	ISOLE A LARGO DELLA BARRA [m/s]	ISOLE CON PENNELLI [m/s]
FASCIA 1	0.207	0.215	0.147	0.234
FASCIA 2	0.243	0.256	0.199	0.271
FASCIA 3	0.179	0.193	0.188	0.189
FASCIA 4	0.121	0.092	0.138	0.083
FASCIA 5	0.141	0.179	0.177	0.132
FASCIA 6	0.247	0.260	0.268	0.220
MEDIA TOTALE	0.190	0.199	0.186	0.188

Tabella 4: Valori medi delle velocità per le varie configurazioni all'interno delle varie fasce del dominio in caso di evento estremo

CAMPO DELLE VELOCITA'				
H= 5m	STATO ATTUALE [m/s]	ISOLE A RIVA DELLA BARRA [m/s]	ISOLE A LARGO DELLA BARRA [m/s]	ISOLE CON PENNELLI [m/s]
ULTIMI 10 m	0.262	0.265	0.275	0.239

Tabella 5: Valori medi delle velocità per le varie configurazioni negli ultimi 10m antistanti la linea di riva in caso di evento estremo

CAMPO DELLE ALTEZZE D'ONDA				
H= 5m	STATO ATTUALE [m]	ISOLE A RIVA DELLA BARRA [m]	ISOLE A LARGO DELLA BARRA [m]	ISOLE CON PENNELLI [m]
FASCIA 1	1.30	1.31	1.18	1.30
FASCIA 2	1.07	1.09	0.96	1.09
FASCIA 3	0.83	0.83	0.78	0.83
FASCIA 4	0.69	0.63	0.66	0.63
FASCIA 5	0.54	0.49	0.54	0.48
FASCIA 6	0.30	0.29	0.29	0.28
MEDIA TOTALE	0.79	0.77	0.74	0.77

Tabella 6: Valori medi delle velocità per le varie configurazioni negli ultimi 10m antistanti la linea di riva in caso di evento estremo



Figura 78:Andamento della velocità mediata nella fascia di 40m a largo della barra in caso di evento frequente



Figura 79:Andamento della velocità mediata nella fascia di 10m antistante la linea di riva in caso di evento frequente



Figura 80: Andamento dell'altezza d'onda mediata nella fascia di 40m a largo della barra in caso di evento frequente



Figura 81: Andamento dell'altezza d'onda mediata nella fascia di circa 30m antistante la linea di riva in caso di evento frequente


Figura 82: Andamento della velocità mediata nella fascia di 40m a largo della barra in caso di evento estremo



Figura 83: Andamento della velocità mediata nella fascia di 10m antistante la linea di riva in caso di evento estremo



Figura 84: Andamento dell'altezza d'onda mediata nella fascia di 40m a largo della barra in caso di evento estremo



Figura 85: Andamento dell'altezza d'onda mediata nella fascia di circa 30m antistante la linea di riva in caso di evento estremo

Di seguito si riportano anche i profili delle velocità e delle altezze d'onda trasversali alla linea di riva.

Essi sono stati ricavati per tutte e 5 le isole e i 4 varchi presenti, ma essendo essi molto simili tra di loro e per non appesantire troppo la descrizione se ne riportano soltanto quattro, due riguardanti le isole e due i varchi. Per quanto riguarda la nomenclatura si fa riferimento alla figura 77.



Figura 86: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza del primo varco nel caso di evento frequente



Figura 87: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza della seconda isola nel caso di evento frequente



Figura 88: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza della terza isola nel caso di evento frequente



Figura 89: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza del terzo varco nel caso di evento frequente



Figura 90: Profilo trasversale alla linea di riva dell'altezza d'onda in presenza del primo varco nel caso di evento frequente



Figura 91: Profilo trasversale alla linea di riva dell'altezza d'onda in presenza della seconda isola nel caso di evento frequente



Figura 92: Profilo trasversale alla linea di riva dell'altezza d'onda in presenza della terza isola nel caso di evento frequente



Figura 93: Profilo trasversale alla linea di riva dell'altezza d'onda in presenza del terzo varco nel caso di evento frequente



Figura 94: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza del primo varco nel caso di evento estremo



Figura 95: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza della seconda isola nel caso di evento estremo



Figura 96: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza della terza isola nel caso di evento estremo



Figura 97: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza del terzo varco nel caso di evento estremo



Figura 98: Profilo trasversale alla linea di riva dell'altezza d'onda in presenza del primo varco nel caso di evento estremo



Figura 99: Profilo trasversale alla linea di riva dell'altezza d'onda in presenza della seconda isola nel caso di evento estremo



Figura 100: Profilo trasversale alla linea di riva dell'altezza d'onda in presenza della terza isola nel caso di evento estremo



Figura 101: Profilo trasversale alla linea di riva dell'altezza d'onda in presenza del terzo varco nel caso di evento estremo

Osservando i dati riportati nelle tabelle e gli andamenti dei grafici, si può facilmente dedurre come tali risultati confermino le considerazioni ricavate dalle figure riportate in precedenza, ossia che tali configurazioni abbattono localmente i campi di velocità ed altezze d'onda nei luoghi nelle quali sono posizionate le opere e nelle zone immediatamente adiacenti, ma non comportano grandi modifiche generali al campo di moto all'interno del dominio di interesse. Questo lieve effetto prodotto è presumibile che sia dovuto alle esigue dimensioni delle piattaforme isola, soprattutto se confrontate con quelle dei varchi ed anche rispetto alla lunghezza d'onda che si ha in entrambi i casi di mareggiata. Inoltre è da ricordare che essendo opere sommerse il meccanismo di funzionamento principale è l'abbattimento del campo di moto tramite la trasmissione e non la diffrazione come accade per le opere emerse e tale meccanismo è tanto più efficace quanto è maggiore l'estensione della berma della piattaforma. Si può quindi presumere che non solo una, ma entrambe le dimensioni delle isole vadano ingrandite.

Ciò nonostante già delle informazioni utili su cui ripartire sono state trovate:

la disposizione a largo della barra infatti mostra come può essere molto utile per quanto riguarda soprattutto il caso di evento frequente, poiché abbatte l'intenso campo di velocità che si trova nei pressi della barra, mentre al contrario è una disposizione che sembra poco funzionale in caso di evento estremo, poiché in tale situazione gli effetti maggiori si hanno più vicino riva e qui essa non permette di ottenere grandi risultati.

Al contrario la configurazione che, seppur di poco, migliora la situazione nei pressi della riva, specialmente nei casi estremi è quella con piattaforme isola a riva della barra collegate alla costa tramite pennelli sommersi; osservando infatti i risultati riportati sopra è quella che presenta valori più bassi, soprattutto per quanto riguarda quelli relativi alla velocità, nella zona vicino costa, presentando dei dimezzamenti di entrambe le grandezze osservate nei tratti dove sono realizzate tali opere.

Partendo da tali considerazioni e traendo anche spunto da configurazioni già testate in passato che hanno ottenuto buoni risultati è stato deciso di sperimentare sei nuove configurazioni di progetto:

4- 5 isole ellittiche di dimensioni in sommità (-0.5 m s.l.m) 70m x 30m, distanziate di 80m e poste a subito a riva della barra;

79



Figura 102: Rappresentazione planimetrica della configurazione 4 (tutte le misure sono espresse in metri)

5- Configurazione identica alla numero 4, ma posto subito a largo della barra;



Figura 103: Rappresentazione planimetrica della configurazione 5 (tutte le misure sono espresse in metri)

 6- Configurazione identica alla numero 4, ma con 3 pennelli sommersi che collegano le 2 isole poste alle estremità e quella centrale alla spiaggia;



Figura 104: Rappresentazione planimetrica della configurazione 6 (tutte le misure sono espresse in metri)

7- 7 isole ellittiche di dimensioni in sommità (-0.5 m s.l.m) 50m x 30m, distanziate di 50m e poste a subito a riva della barra;



Figura 105: Rappresentazione planimetrica della configurazione 7 (tutte le misure sono espresse in metri)

8- Configurazione identica alla numero 7, ma posto subito a largo della barra;



Figura 106: Rappresentazione planimetrica della configurazione 8 (tutte le misure sono espresse in metri)

 9- Configurazione identica alla numero 7, ma con 3 pennelli sommersi che collegano le 2 isole poste alle estremità e quella centrale alla spiaggia;



Figura 107: Rappresentazione planimetrica della configurazione 8 (tutte le misure sono espresse in metri)

Quindi, come già effettuato per le tre configurazioni precedenti, si riportano di seguito per ognuna di esse le immagini dei risultati ottenuti, ovviamente sia per il caso di evento frequente che per quello estremo, con relativi commenti.



- Configurazione 4 (5 isole ellittiche 70m X 30m a riva della barra)

Figura 108: Rappresentazione del campo delle velocità in valore assoluto nel caso di configurazione 4 con onda di H=2.5m



Figura 109: Rappresentazione del campo delle altezze d'onda nel caso di configurazione 4 con onda di H=2.5m



Figura 110: Rappresentazione del campo delle velocità in valore assoluto nel caso di configurazione 4 con onda di H=5m



Figura 111: Rappresentazione del campo delle altezze d'onda nel caso di configurazione 4 con onda di H=5m

Analogamente a quanto già visto per la configurazione 1 si può notare come non vi siano grosse differenze rispetto alla situazione attuale; certo le dimensioni maggiori delle opere influenzano leggermente di più il campo di moto e soprattutto creano un maggior abbattimento dell'altezza d'onda, ma non si può certamente affermare che si tratti di un intervento che modifichi rilevantemente il campo di moto della zona in oggetto ed anzi sembra che nel caso di evento estremo si vengano a creare dei campi di velocità più intensi a ridosso di alcune isole e nei pressi della linea di riva.



- Configurazione 5 (5 isole ellittiche 70m X 30m a largo della barra)

Figura 112: Rappresentazione del campo delle velocità in valore assoluto nel caso di configurazione 5 con onda di H=2.5m



Figura 113: Rappresentazione del campo delle altezze d'onda nel caso di configurazione 5 con onda di H=2.5m



Figura 114: Rappresentazione del campo delle velocità in valore assoluto nel caso di configurazione 5 con onda di H=5m



Figura 115: Rappresentazione del campo delle altezze d'onda nel caso di configurazione 5 con onda di H=5m

In questo caso si può notare un ulteriore miglioramento rispetto a quanto già evidenziato per la configurazione 2. Prestando infatti attenzione ad i risultati ottenuti nel caso di evento frequente, si ottiene ovviamente sempre l'abbattimento dell'intenso campo delle velocità presente subito a largo della barra, ma in più con tale disposizione si può notare dei miglioramenti, seppur di non troppa elevata entità, rispetto alla situazione attuale anche nei pressi della linea di riva.

Inoltre pure l'abbattimento dell'altezza d'onda ottenuto in entrambe le condizioni d'onda è il maggiore osservato sinora, mentre l'unica nota dolente è la modifica del campo delle velocità nel caso di mareggiata estrema. In tal caso infatti è da osservare un peggioramento della situazione nella zona più vicina alla costa.

- Configurazione 6 (5 isole ellittiche 70m X 30m a riva della barra con 3 pennelli sommersi di collegamento alla costa)



Figura 116: Rappresentazione del campo delle velocità in valore assoluto nel caso di configurazione 6 con onda di H=2.5m



Figura 117: Rappresentazione del campo delle altezze d'onda nel caso di configurazione 6 con onda di H=2.5m



Figura 118: Rappresentazione del campo delle velocità in valore assoluto nel caso di configurazione 6 con onda di H=5m





Le osservazioni da fare, per tale configurazione, sono molto simili a quelle fatte per la precedente, dal momento che anche in questo caso tale disposizione amplifica gli effetti positivi che già si erano iniziati a manifestare con la configurazione 3.

Infatti, anche se non si hanno modifiche del campo di moto fino a riva della barra, da questo punto in poi è la soluzione che evidenzia i maggiori benefici, poiché è facilmente osservabile come in tutto il tratto compreso tra le opere e la linea di riva si ha una diminuzione generale del campo delle velocità ed anche proprio nei pressi della costa stessa tale grandezza sembra assumere valori molto più bassi rispetto alla situazione attuale ed a quanto ottenuto tramite le altre disposizioni testate.

Inoltre tale miglioramento si ha in entrambe le condizioni di mareggiata.

Per quanto riguarda invece il campo delle altezze d'onda, si può notare come l'abbattimento ottenuto sia una condizione intermedia tra quelli avuti con le due configurazioni precedenti.

- Ulteriori osservazioni

Prima di proseguire con i risultati ottenuti dalle ultime tre configurazioni testate, si riportano i grafici e le tabelle analoghe a quelle ricavate per le disposizioni precedenti, in modo da avere un quadro più chiaro della situazione, poiché, come già spiegato in precedenza, le immagini da sole, senza un'ulteriore elaborazione dei dati che permette di trovare dei parametri significativi dei vari campi di moto e di visualizzare l'andamento dei profili delle varie grandezze analizzate, non consentono di realizzare un'analisi esaustiva della situazione. Mentre per quanto riguarda le fasce esse corrispondono sempre a quanto rappresentato in



Figura 120: Schema di suddivisione in strisce trasversali alla linea di riva valido per le configurazioni 4-5-6

CAMPO DELLE VELOCITA'				
H= 2.5m	STATO ATTUALE [m/s]	ISOLE A RIVA DELLA BARRA [m/s]	ISOLE A LARGO DELLA BARRA [m/s]	ISOLE CON PENNELLI [m/s]
FASCIA 1	0.288	0.284	0.102	0.289
FASCIA 2	0.399	0.399	0.128	0.401
FASCIA 3	0.284	0.287	0.154	0.273
FASCIA 4	0.132	0.073	0.115	0.060
FASCIA 5	0.135	0.206	0.165	0.142
FASCIA 6	0.224	0.242	0.216	0.162
MEDIA TOTALE	0.244	0.249	0.147	0.221

Tabella 7: Valori medi delle velocità per le varie configurazioni all'interno delle varie fasce del dominio in caso di evento frequente

CAMPO DELLE VELOCITA'				
H= 2.5m	STATO ATTUALE [m/s]	ISOLE A RIVA DELLA BARRA [m/s]	ISOLE A LARGO DELLA BARRA [m/s]	ISOLE CON PENNELLI [m/s]
ULTIMI 10 m	0.248	0.229	0.213	0.156

Tabella 8: Valori medi delle velocità per le varie configurazioni negli ultimi 10m antistanti la linea di riva in caso di evento frequente

CAMPO DELLE ALTEZZE D'ONDA				
H= 2.5m	STATO ATTUALE [m]	ISOLE A RIVA DELLA BARRA [m]	ISOLE A LARGO DELLA BARRA [m]	ISOLE CON PENNELLI [m]
FASCIA 1	1.25	1.25	0.95	1.26
FASCIA 2	1.01	1.02	0.73	1.02
FASCIA 3	0.77	0.78	0.67	0.78
FASCIA 4	0.65	0.51	0.58	0.51
FASCIA 5	0.53	0.37	0.47	0.37
FASCIA 6	0.23	0.20	0.22	0.20
MEDIA TOTALE	0.74	0.69	0.60	0.69

Tabella 9: Valori medi delle altezze d'onda per le varie configurazioni all'interno delle varie fasce del dominio in caso di evento frequente

CAMPO DELLE VELOCITA'				
H= 5m	STATO ATTUALE [m/s]	ISOLE A RIVA DELLA BARRA [m/s]	ISOLE A LARGO DELLA BARRA [m/s]	ISOLE CON PENNELLI [m/s]
FASCIA 1	0.207	0.225	0.100	0.225
FASCIA 2	0.243	0.260	0.129	0.269
FASCIA 3	0.179	0.201	0.160	0.192
FASCIA 4	0.121	0.072	0.137	0.067
FASCIA 5	0.141	0.198	0.181	0.138
FASCIA 6	0.247	0.259	0.264	0.177
MEDIA TOTALE	0.190	0.202	0.162	0.178

Tabella 10: Valori medi delle velocità per le varie configurazioni all'interno delle varie fasce del dominio in caso di evento estremo

CAMPO DELLE VELOCITA'				
H= 5m	STATO ATTUALE [m/s]	ISOLE A RIVA DELLA BARRA [m/s]	ISOLE A LARGO DELLA BARRA [m/s]	ISOLE CON PENNELLI [m/s]
ULTIMI 10 m	0.262	0.272	0.272	0.192

Tabella 11: Valori medi delle velocità per le varie configurazioni negli ultimi 10m antistanti la linea di riva in caso di evento estremo

CAMPO DELLE ALTEZZE D'ONDA				
H= 5m	STATO ATTUALE [m]	ISOLE A RIVA DELLA BARRA [m]	ISOLE A LARGO DELLA BARRA [m]	ISOLE CON PENNELLI [m]
FASCIA 1	1.30	1.30	1.00	1.30
FASCIA 2	1.07	1.09	0.75	1.09
FASCIA 3	0.83	0.84	0.67	0.83
FASCIA 4	0.69	0.55	0.59	0.54
FASCIA 5	0.54	0.40	0.50	0.39
FASCIA 6	0.30	0.26	0.28	0.25
MEDIA TOTALE	0.79	0.74	0.63	0.73

Tabella 12: Valori medi delle altezze d'onda per le varie configurazioni all'interno delle varie fasce del dominio in caso di evento estremo



Figura 121: Andamento della velocità mediata nella fascia di 40m a largo della barra in caso di evento frequente



Figura 122: Andamento della velocità mediata nella fascia di 10m antistante la linea di riva in caso di evento frequente



Figura 123: Andamento dell'altezza d'onda mediata nella fascia di 40m a largo della barra in caso di evento frequente



Figura 124: Andamento dell'altezza d'onda mediata nella fascia di circa 30m antistante la linea di riva in caso di evento frequente



Figura 125: Andamento della velocità mediata nella fascia di 40m a largo della barra in caso di evento estremo



Figura 126: Andamento della velocità mediata nella fascia di 10m antistante la linea di riva in caso di evento estremo



Figura 127: Andamento dell'altezza d'onda mediata nella fascia di 40m a largo della barra in caso di evento frequente



Figura 128: Andamento dell'altezza d'onda mediata nella fascia di circa 30m antistante la linea di riva in caso di evento estremo



Figura 129: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza del primo varco nel caso di evento frequente



Figura 130: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza della seconda isola nel caso di evento frequente



Figura 131: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza della terza isola nel caso di evento frequente



Figura 132: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza del terzo varco nel caso di evento frequente



Figura 133: Profilo trasversale alla linea di riva dell'altezza d'onda in presenza del primo varco nel caso di evento frequente



Figura 134: Profilo trasversale alla linea di riva dell'altezza d'onda in presenza della seconda isola nel caso di evento frequente



Figura 135: Profilo trasversale alla linea di riva dell'altezza d'onda in presenza della terza isola nel caso di evento frequente



Figura 136: Profilo trasversale alla linea di riva dell'altezza d'onda in presenza del terzo varco nel caso di evento frequente



Figura 137: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza del primo varco nel caso di evento estremo



Figura 138: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza della seconda isola nel caso di evento estremo



Figura 139: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza della terza isola nel caso di evento estremo



Figura 140: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza del terzo varco nel caso di evento estremo



Figura 141: Profilo trasversale alla linea di riva dell'altezza d'onda in presenza del primo varco nel caso di evento estremo



Figura 142: Profilo trasversale alla linea di riva dell'altezza d'onda in presenza della seconda isola nel caso di evento estremo



Figura 143: Profilo trasversale alla linea di riva dell'altezza d'onda in presenza della terza isola nel caso di evento estremo



Figura 144: Profilo trasversale alla linea di riva dell'altezza d'onda in presenza del terzo varco nel caso di evento estremo

I risultati riportati in tabella e l'andamento rappresentato nei grafici è una conferma ulteriore delle considerazioni dedotte dalle immagini.

Trascurando infatti i dati ottenuti per la configurazione 4, che dimostrano come essa non migliori od addirittura in taluni casi peggiori la situazione attuale, ciò che si ottiene invece dall'elaborazione dei risultati delle altre due disposizioni dimostra come entrambe, anche se in maniera completamente diverso, portano ad un miglioramento generale all'interno del dominio di interesse.

La disposizione a largo della barra nel caso di mareggiata frequente abbatte, più che dimezzandolo, il campo delle velocità nei pressi di essa e comporta un beneficio, seppur di minore entità, anche nei pressi della riva. In totale nella fascia di 200m antistante la costa il valore medio della velocità è abbattuto di circa il 40%. Anche per quanto riguarda l'altezza d'onda c'è un abbattimento di circa il 20%. D'altra parte tuttavia, come si era già notato in precedenza, nel caso di mareggiata estrema i risultati riguardanti i valori delle velocità non sono così netti, al contrario dell'effetto che si ha sull'altezza d'onda che rimane praticamente invariato.

In questo caso infatti il valore della velocità negli ultimi 200m è abbattuto solo di circa il 15% e nei pressi della linea di riva si ha anche un peggioramento delle condizioni come dimostrano i valor medi riportati in tabella, anche se dai grafici rappresentanti i profili si può vedere che questa non sia una situazione generale, ma locale, ossia solo in alcune zone del litorale si hanno dei picchi di velocità che sono più intensi rispetto alla situazione attuale, mentre in altre zone succede il contrario. (vedi fig.126-137-138-139-140).

Passando invece ad analizzare la configurazione 6, è possibile vedere come anche in questo caso sono confermate le deduzioni fatte in precedenza, infatti sia i valori in tabella che i profili (sia longitudinali che trasversali alla costa) mostrano come essa sia la disposizione più efficace per avere una diminuzione dell'intensità del campo di moto vicino riva. In particolare negli ultimi 10m prima della costa si ha una diminuzione del valore medio della velocità di circa il 40% ed il 30%, rispettivamente per il caso di mareggiata frequente ed estrema. Ovviamente più ci si allontana da riva più il miglioramento ottenuto si attenua, ma comunque non si denotano effetti collaterali di peggioramento localizzato. Al contempo l'abbattimento dell'altezza d'onda è maggiormente contenuto rispetto alla configurazione 5, con un valore che si mantiene stabile per entrambe le 2 casistiche di mareggiate ed intorno al valore dell'8%.

102

A questo punto si riportano di seguito le immagini rappresentanti i campi di velocità e di altezze d'onda ottenute lanciando le simulazioni delle ultime tre configurazioni rimaste da testare. Come è facile immaginare sono molto simili a quelle viste per le disposizioni 4-5-6, quindi i commenti già effettuati per esse valgono anche per le seguenti e non sono quindi ripetuti.

Inoltre è importante sottolineare che seppur essendo due tipi di disposizioni abbastanza diverse tra loro, poiché variano numero e dimensioni delle piattaforme ed ampiezza pure dei varchi, si ottengono risultati analoghi. Ciò suggerisce che il fattore realmente importante nella progettazione di tale tipo di intervento è il rapporto che sussiste tra ampiezza varchi e lunghezza isola, senza dimenticare l'altro parametro fondamentale, il quale rimane costante in entrambe le ipotesi di progetto, che è l'ampiezza della berma, che come già affermato in precedenza è ciò che governa il fenomeno della trasmissione d'onda.



- Configurazione 7 (7 isole ellittiche 50m X 30m a riva della barra)

Figura 145: Rappresentazione del campo delle velocità in valore assoluto nel caso di configurazione 7 con onda di H=2.5m



Figura 146: Rappresentazione del campo delle altezze d'onda nel caso di configurazione 7 con onda di H=2.5m



Figura 147: Rappresentazione del campo delle velocità in valore assoluto nel caso di configurazione 7 con onda di H=5m



Figura 148: Rappresentazione del campo delle altezze d'onda nel caso di configurazione 7 con onda di H=5m



- Configurazione 8 (7 isole ellittiche 50m X 30m a largo della barra)

Figura 149: Rappresentazione del campo delle velocità in valore assoluto nel caso di configurazione 8 con onda di H=2.5m



Figura 150: Rappresentazione del campo delle altezze d'onda nel caso di configurazione 8 con onda di H=2.5m



Figura 151: Rappresentazione del campo delle velocità in valore assoluto nel caso di configurazione 8 con onda di H=5m



Figura 152: Rappresentazione del campo delle altezze d'onda nel caso di configurazione 8 con onda di H=5m

- Configurazione 9 (7 isole ellittiche 50m X 30m a riva della barra con 3 pennelli sommersi di collegamento alla costa)



Figura 153: Rappresentazione del campo delle velocità in valore assoluto nel caso di configurazione 9 con onda di H=2.5m



Figura 154: Rappresentazione del campo delle altezze d'onda nel caso di configurazione 9 con onda di H=2.5m



Figura 155: Rappresentazione del campo delle velocità in valore assoluto nel caso di configurazione 9 con onda di H=5m



Figura 156: Rappresentazione del campo delle altezze d'onda nel caso di configurazione 9 con onda di H=5m
- Ulteriori osservazioni

Si riportano infine anche per le configurazioni 7,8 e 9 le rispettive tabelle ed i rispettivi grafici, come fatto per tutte le altre disposizioni testate.

Anche in questo caso cambia lo schema di riferimento per quanto riguarda il dimensionamento e la nomenclatura delle strisce trasversali come si può ben notare dalla figura 157.



Figura 157: Schema di suddivisione in strisce trasversali alla linea di riva valido per le configurazioni 7-8-9

Di seguito sono comunque riportati, come per le configurazioni precedenti, i risultati ottenuti solo per quattro delle tredici strisce esaminate, ossia quelle comprendenti il primo ed il terzo varco e la seconda e la quarta isola.

Sono state scelte queste perché in questo modo è rappresentato il comportamento tipo, sia in presenza di varchi che in presenza di isole, che si osserva sia in una parte più esterna che in una più interna del dominio e di conseguenza nel restante campo di interesse il comportamento è analogo all'uno od all'altro caso.

CAMPO DELLE VELOCITA'					
H= 2.5m	STATO ATTUALE [m/s]	ISOLE A RIVA DELLA BARRA [m/s]	ISOLE A LARGO DELLA BARRA [m/s]	ISOLE CON PENNELLI [m/s]	
FASCIA 1	0.288	0.291	0.095	0.290	
FASCIA 2	0.399	0.408	0.106	0.408	
FASCIA 3	0.284	0.288	0.115	0.278	
FASCIA 4	0.132	0.058	0.121	0.049	
FASCIA 5	0.135	0.212	0.173	0.141	
FASCIA 6	0.224	0.254	0.217	0.163	
MEDIA TOTALE	0.244	0.252	0.138	0.221	

Tabella 13: Valori medi delle velocità per le varie configurazioni all'interno delle varie fasce del dominio in caso di evento frequente

CAMPO DELLE VELOCITA'					
H= 2.5m	STATO ATTUALE [m/s] ISOLE A RIVA DELLA BARRA [m/s] ISOLE A LARGO DELLA BARRA [m/s] ISOLE CON PENNELLI [m/s]				
ULTIMI 10 m	0.248	0.243	0.209	0.160	

Tabella 14: Valori medi delle velocità per le varie configurazioni negli ultimi 10m antistanti la linea di riva in caso di evento frequente

	CAMPO DELLE ALTEZZE D'ONDA				
H= 2.5m	STATO ATTUALE [m]	ISOLE A RIVA DELLA BARRA [m]	ISOLE A LARGO DELLA BARRA [m]	ISOLE CON PENNELLI [m]	
FASCIA 1	1.25	1.26	0.94	1.26	
FASCIA 2	1.01	1.02	0.73	1.02	
FASCIA 3	0.77	0.78	0.67	0.78	
FASCIA 4	0.65	0.51	0.58	0.51	
FASCIA 5	0.53	0.38	0.47	0.37	
FASCIA 6	0.23	0.20	0.22	0.20	
MEDIA TOTALE	0.74	0.69	0.60	0.69	

Tabella 15: Valori medi delle altezze d'onda per le varie configurazioni all'interno delle varie fasce del dominio in caso di evento frequente

	CAMPO DELLE VELOCITA'				
H= 5m	STATO ATTUALE [m/s]	ISOLE A RIVA DELLA BARRA [m/s]	ISOLE A LARGO DELLA BARRA [m/s]	ISOLE CON PENNELLI [m/s]	
FASCIA 1	0.207	0.217	0.100	0.223	
FASCIA 2	0.243	0.255	0.115	0.256	
FASCIA 3	0.179	0.183	0.124	0.181	
FASCIA 4	0.121	0.063	0.125	0.062	
FASCIA 5	0.141	0.203	0.194	0.140	
FASCIA 6	0.247	0.262	0.277	0.174	
MEDIA TOTALE	0.190	0.197	0.156	0.173	

Tabella 16: Valori medi delle velocità per le varie configurazioni all'interno delle varie fasce del dominio in caso di evento estremo

	CAMPO DELLE VELOCITA'				
H= 5m	STATO ATTUALE [m/s]	ISOLE A RIVA DELLA BARRA [m/s]	ISOLE A LARGO DELLA BARRA [m/s]	ISOLE CON PENNELLI [m/s]	
ULTIMI 10 m	0.262	0.271	0.278	0.188	

Tabella 17: Valori medi delle velocità per le varie configurazioni negli ultimi 10m antistanti la linea di riva in caso di evento estremo

	CAMPO DELLE ALTEZZE D'ONDA				
H= 5m	STATO ATTUALE [m]	ISOLE A RIVA DELLA BARRA [m]	ISOLE A LARGO DELLA BARRA [m]	ISOLE CON PENNELLI [m]	
FASCIA 1	1.30	1.30	0.98	1.28	
FASCIA 2	1.07	1.07	0.75	1.08	
FASCIA 3	0.83	0.81	0.68	0.83	
FASCIA 4	0.69	0.53	0.60	0.54	
FASCIA 5	0.54	0.39	0.53	0.39	
FASCIA 6	0.30	0.27	0.29	0.26	
MEDIA TOTALE	0.79	0.73	0.64	0.73	

Tabella 18: Valori medi delle altezze d'onda per le varie configurazioni all'interno delle varie fasce del dominio in caso di evento estremo



Figura 158: Andamento della velocità mediata nella fascia di 40m a largo della barra in caso di evento frequente



Figura 159: Andamento della velocità mediata nella fascia di 10m antistante la linea di riva in caso di evento frequente



Figura 160: Andamento dell'altezza d'onda mediata nella fascia di 40m a largo della barra in caso di evento frequente



Figura 161: Andamento dell'altezza d'onda mediata nella fascia di circa 30m antistante la linea di riva in caso di evento frequente



Figura 162: Andamento della velocità mediata nella fascia di 40m a largo della barra in caso di evento estremo



Figura 163: Andamento della velocità mediata nella fascia di 10m antistante la linea di riva in caso di evento estremo



Figura 164: Andamento dell'altezza d'onda mediata nella fascia di 40m a largo della barra in caso di evento estremo



Figura 165: Andamento dell'altezza d'onda mediata nella fascia di circa 30m antistante la linea di riva in caso di evento estremo



Figura 166: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza del primo varco nel caso di evento frequente



Figura 167: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza della seconda isola nel caso di evento frequente



Figura 168: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza del terzo varco nel caso di evento frequente



Figura 169: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza della quarta isola nel caso di evento frequente



Figura 170: Profilo trasversale alla linea di riva dell'altezza d'onda in presenza del primo varco nel caso di evento frequente



Figura 171: Profilo trasversale alla linea di riva dell'altezza d'onda in presenza della seconda isola nel caso di evento frequente



Figura 172: Profilo trasversale alla linea di riva dell'altezza d'onda in presenza del terzo varco nel caso di evento frequente



Figura 173: Profilo trasversale alla linea di riva dell'altezza d'onda in presenza della quarta isola nel caso di evento frequente



Figura 174: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza del primo varco nel caso di evento estremo



Figura 175: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza della seconda isola nel caso di evento estremo



Figura 176: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza del terzo varco nel caso di evento estremo



Figura 177: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza della quarta isola nel caso di evento estremo



Figura 178: Profilo trasversale alla linea di riva dell'altezza d'onda in presenza del primo varco nel caso di evento estremo



Figura 179: Profilo trasversale alla linea di riva dell'altezza d'onda in presenza della seconda isola nel caso di evento estremo



Figura 180: Profilo trasversale alla linea di riva dell'altezza d'onda in presenza del terzo varco nel caso di evento estremo



Figura 181: Profilo trasversale alla linea di riva dell'altezza d'onda in presenza della quarta isola nel caso di evento estremo

Come anticipato in precedenza, sia le immagini raffiguranti i campi delle velocità e le altezze d'onda, sia le tabelle, sia i vari grafici, mostrano una forte similitudine delle configurazioni 7-8-9 con le 4-5-6.

- Rimane infatti nullo o quasi dannoso l'effetto portato dalla realizzazione di sole isole a riva della barra;
- produce sempre un ottimo effetto nel caso di mareggiata frequente la disposizione a largo della barra (configurazione 8), con in questo caso una diminuzione ulteriore, anche se molto lieve, del valore della velocità sia negli ultimi 200m, sia proprio nei pressi della riva. Nel caso di mareggiata estrema invece si dimostra anch'essa per lo più inefficace, soprattutto in determinate zone ed inoltre confrontando la disposizione a 7 isole con quelle a 5 si può vedere come la prima è più funzionale nei pressi della barra, mentre la seconda presenta risultati migliori vicino riva, ma si tratta sempre di differenze molto piccole, ed il comportamento generale è il medesimo.

I risultati riguardanti le altezze d'onda sono ancor più identici a quelli dati dalla configurazione 5, ed è un risultato intuibile dal momento che il fenomeno di abbattimento è quasi totalmente correlabile alla capacità di trasmettere l'onda da parte dell'opera e come ormai già detto più volte è fortemente dipendente dalla larghezza della piattaforma che in tutti e due i casi è mantenuta identica;

- infine anche la configurazione 9, che prevede la realizzazione di piattaforme a riva della barra unita a quella di tre pennelli di collegamento a riva, mostra analogie con la 6, essendo l'unica che produce degli effetti di miglioramento in entrambi i casi di mareggiata ed è sempre la disposizione più efficace vicino a riva anche nel caso di evento frequente, anche se in tale situazione se si considera una zona allargata fino alla barra, l'effetto migliore è dato sempre dalla configurazione 8 (come lo era la 5 rispetto alla 6).

Se si confronta la 9 con la 6 inoltre si può notare, ma si parla comunque di differenze davvero minime, un effetto leggermente migliore della prima in caso di mareggiata estrema, mentre viceversa in caso di evento frequente.

Anche in questo caso valgono le stesse considerazione appena scritte sopra per quanto riguarda le variazioni di altezze d'onda.

118

In definitiva quindi sono state trovate quattro configurazioni che mostrano dei buoni risultati se applicate a questo caso studio e sono la 5, la 6, la 8 e la 9.

Più in particolare le disposizioni 5 e 8 sarebbero senza dubbio le migliori se si considerasse il verificarsi solo di un evento frequente, tuttavia come già detto non è possibile trascurare il comportamento in caso di mareggiata estrema, dove l'effetto migliore è dato dalle altre due configurazioni.

È stato quindi deciso di testare due ulteriori e definitive configurazioni di progetto, date praticamente dalla fusione dei casi precedenti e che si presume daranno i migliori effetti possibili in entrambi i casi di mareggiata. Tali due configurazioni sono le seguenti:

10- 5 isole ellittiche di dimensioni in sommità (-0.5m s.l.m.) 70m X 30m, distanziate tra loro 80m, poste a largo della barra e con 3 pennelli sommersi che collegano le due piattaforme laterali e quella centrale alla costa;



Figura 182: Rappresentazione planimetrica della configurazione 10 (tutte le misure sono espresse in metri)

11- 7 isole ellittiche di dimensioni in sommità (-0.5m s.l.m.) 50m X 30m, distanziate tra loro 50m, poste a largo della barra e con 3 pennelli sommersi che collegano le due piattaforme laterali e quella centrale alla costa.



Figura 183: Rappresentazione planimetrica della configurazione 11 (tutte le misure sono espresse in metri)

4.2.3 CONFIGURAZIONI DEFINITIVE

Dal momento che è presumibile, visti i risultati precedenti, ottenere un comportamento molto simile tra le due configurazioni in esame, sono riportate di seguito le rappresentazioni dei campi delle velocità e delle altezze d'onda di entrambe le disposizioni, seguite poi dai relativi commenti. - Configurazione 10 (5 isole ellittiche 70m X 30m a largo della barra con 3 pennelli sommersi di collegamento alla costa)



Figura 184: Rappresentazione del campo delle velocità in valore assoluto nel caso di configurazione 10 con onda di H=2.5m



Figura 185: Rappresentazione del campo delle altezze d'onda nel caso di configurazione 10 con onda di H=2.5m



Figura 186: Rappresentazione del campo delle velocità in valore assoluto nel caso di configurazione 10 con onda di H=5m



Figura 187: Rappresentazione del campo delle altezze d'onda nel caso di configurazione 10 con onda di H=5m

- Configurazione 11 (7 isole ellittiche 50m X 30m a largo della barra con 3 pennelli sommersi di collegamento alla costa)



Figura 188: Rappresentazione del campo delle velocità in valore assoluto nel caso di configurazione 11 con onda di H=2.5m



Figura 189: Rappresentazione del campo delle altezze d'onda nel caso di configurazione 11 con onda di H=2.5m



Figura 190: Rappresentazione del campo delle velocità in valore assoluto nel caso di configurazione 11 con onda di H=5m





I risultati ottenuti già da queste rappresentazioni, prima di avere una conferma dai dati numerici e andamento dei grafici, sembrano veramente essere ottimi e la soluzione progettuale data dall'unione di piattaforme isola a largo della barra e pennelli sommersi di collegamento alla costa, pare essere veramente quella ideale per il caso studio analizzato.

Considerando il campo delle velocità infatti, poiché dal punto di vista delle altezze d'onda la situazione rimane praticamente invariata rispetto al caso di piattaforme isola realizzate a largo della barra ma senza pennelli, visto che la presenza di essi non inficia molto sotto questo aspetto come già ampiamente ribadito più volte, se si effettua un confronto, per entrambi i casi di mareggiata, tra le immagini relative alle varie configurazioni testate, sia per lo schema con 5 isole che per quello con 7, si può facilmente osservare come quest'ultima soluzione proposta sia non solo la più efficace ma proprio la sintesi di quelle provate in precedenza. Per

maggiore chiarezza espositiva e al fine di facilitare la comprensione di quanto sopra esposto sono riportati tali confronti nelle seguenti quattro figure:



Figura 192: Confronto tra i campi delle velocità riguardanti lo stato attuale (in alto a sinistra), la configurazione 5 (in alto a destra), la configurazione 6 (in basso a sinistra) e la configurazione 10 (in basso a destra) nel caso di evento frequente



Figura 193: Confronto tra i campi delle velocità riguardanti lo stato attuale (in alto a sinistra), la configurazione 5 (in alto a destra), la configurazione 6 (in basso a sinistra) e la configurazione 10 (in basso a destra) nel caso di evento estremo



Figura 194: Confronto tra i campi delle velocità riguardanti lo stato attuale (in alto a sinistra), la configurazione 8 (in alto a destra), la configurazione 9 (in basso a sinistra) e la configurazione 11 (in basso a destra) nel caso di evento frequente



Figura 195: Confronto tra i campi delle velocità riguardanti lo stato attuale (in alto a sinistra), la configurazione 8 (in alto a destra), la configurazione 9 (in basso a sinistra) e la configurazione 11 (in basso a destra) nel caso di evento estremo

- Ulteriori osservazioni

Si riportano infine anche per quest'ultime due configurazioni le tabelle ed i grafici ottenuti dalla elaborazione dei risultati restituiti dalle simulazioni.

CAMPO DELLE VELOCITA'				
H= 2.5m	STATO ATTUALE [m/s]	5 ISOLE 70 X 30 [m/s]	7 ISOLE 50 X 30 [m/s]	
FASCIA 1	0.288	0.107	0.097	
FASCIA 2	0.399	0.133	0.106	
FASCIA 3	0.284	0.155	0.107	
FASCIA 4	0.132	0.108	0.090	
FASCIA 5	0.135	0.133	0.132	
FASCIA 6	0.224	0.137	0.139	
MEDIA TOTALE	0.244	0.129	0.112	

Tabella 19: Valori medi delle velocità per le varie configurazioni all'interno delle varie fasce del dominio in caso di evento frequente

CAMPO DELLE VELOCITA'				
H= 2.5m	STATO ATTUALE [m/s]	5 ISOLE 70 X 30 [m/s]	7 ISOLE 50 X 30 [m/s]	
ULTIMI 10 m	0.248	0.144	0.148	

Tabella 20: Valori medi delle velocità per le varie configurazioni negli ultimi 10m antistanti la linea di riva in caso di evento frequente

CAMPO DELLE ALTEZZE D'ONDA				
H= 2.5m	STATO ATTUALE [m]	5 ISOLE 70 X 30 [m]	7 ISOLE 50 X 30 [m]	
FASCIA 1	1.25	0.97	0.95	
FASCIA 2	1.01	0.73	0.71	
FASCIA 3	0.77	0.66	0.64	
FASCIA 4	0.65	0.56	0.55	
FASCIA 5	0.53	0.45	0.45	
FASCIA 6	0.23	0.21	0.21	
MEDIA TOTALE	0.74	0.60	0.59	

Tabella 21: Valori medi delle altezze d'onda per le varie configurazioni all'interno delle varie fasce del dominio in caso di evento frequente

CAMPO DELLE VELOCITA'				
H= 5m	STATO ATTUALE [m/s]	5 ISOLE 70 X 30 [m/s]	7 ISOLE 50 X 30 [m/s]	
FASCIA 1	0.207	0.106	0.098	
FASCIA 2	0.243	0.133	0.107	
FASCIA 3	0.179	0.145	0.108	
FASCIA 4	0.121	0.101	0.084	
FASCIA 5	0.141	0.125	0.138	
FASCIA 6	0.247	0.166	0.202	
MEDIA TOTALE	0.190	0.129	0.123	

Tabella 22: Valori medi delle velocità per le varie configurazioni all'interno delle varie fasce del dominio in caso di evento estremo

CAMPO DELLE VELOCITA'				
H= 5m	STATO ATTUALE [m/s]	5 ISOLE 70 X 30 [m/s]	7 ISOLE 50 X 30 [m/s]	
ULTIMI 10 m	0.262	0.187	0.215	

Tabella 23: Valori medi delle velocità per le varie configurazioni negli ultimi 10m antistanti la linea di riva in caso di evento estremo

CAMPO DELLE ALTEZZE D'ONDA				
H= 5m	STATO ATTUALE [m]	5 ISOLE 70 X 30 [m]	7 ISOLE 50 X 30 [m]	
FASCIA 1	1.30	1.01	0.99	
FASCIA 2	1.07	0.76	0.73	
FASCIA 3	0.83	0.67	0.66	
FASCIA 4	0.69	0.59	0.57	
FASCIA 5	0.54	0.49	0.52	
FASCIA 6	0.30	0.27	0.29	
MEDIA TOTALE	0.79	0.63	0.63	

Tabella 24: Valori medi delle altezze d'onda per le varie configurazioni all'interno delle varie fasce del dominio in caso di evento estremo



Figura 196: Andamento della velocità mediata nella fascia di 40m a largo della barra in caso di evento frequente



Figura 197: Andamento della velocità mediata nella fascia di 10m antistante la linea di riva in caso di evento frequente



Figura 198: Andamento dell'altezza d'onda mediata nella fascia di 40m a largo della barra in caso di evento frequente



Figura 199: Andamento dell'altezza d'onda mediata nella fascia di circa 30m antistante la linea di riva in caso di evento estremo



Figura 200: Andamento della velocità mediata nella fascia di 40m a largo della barra in caso di evento estremo



Figura 201: Andamento della velocità mediata nella fascia di 10m antistante la linea di riva in caso di evento estremo



Figura 202: Andamento dell'altezza d'onda mediata nella fascia di 40m a largo della barra in caso di evento estremo



Figura 203: Andamento dell'altezza d'onda mediata nella fascia di circa 30m antistante la linea di riva in caso di evento estremo

Per quanto riguarda i profili longitudinali che saranno di seguito riportati è necessaria una precisazione. Non saranno esposti quelli raffiguranti l'andamento delle altezze d'onda poiché ritenuti di poca utilità, dal momento che sono pressochè uguali ai rispettivi schemi di opere realizzate a largo della barra ma senza pennelli.

Inoltre in questo caso le due configurazioni in esame, ossia la 10 e la 11, non saranno raffrontate tra di loro, bensì ognuna con i risultati ottenuti precedentemente dalle disposizioni con la medesima tipologia.

In particolare si inizierà con i vari profili ottenuti per lo schema a 5 isole di dimensioni 70 X 30, prima in caso di mareggiata frequente e poi estrema, e dopo di proseguirà con quelli ottenuti con lo schema a 7 isole di dimensioni 50 X 30 (sempre in entrambe le condizioni di moto ondoso).

Occorre infine puntualizzare che per i primi si utilizza lo schema di riferimento delle strisce rappresentato in figura 120 mentre per gli altri quello di figura 157.



Figura 204: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza del primo varco nel caso di evento frequente considerando gli schemi con 5 isole di dimensioni 70X30



Figura 205: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza della seconda isola nel caso di evento frequente considerando gli schemi con 5 isole di dimensioni 70X30



Figura 206: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza della terza isola nel caso di evento frequente considerando gli schemi con 5 isole di dimensioni 70X30



Figura 207: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza del terzo varco nel caso di evento frequente considerando gli schemi con 5 isole di dimensioni 70X30



Figura 208: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza del primo varco nel caso di evento estremo considerando gli schemi con 5 isole di dimensioni 70X30



Figura 209: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza della seconda isola nel caso di evento estremo considerando gli schemi con 5 isole di dimensioni 70X30



Figura 210: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza della terza isola nel caso di evento estremo considerando gli schemi con 5 isole di dimensioni 70X30



Figura 211: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza del terzo varco nel caso di onda estrema considerando gli schemi con 5 isole di dimensioni 70X30



Figura 212: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza del primo varco nel caso di evento frequente considerando gli schemi con 7 isole di dimensioni 50X30



Figura 213: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza della seconda isola nel caso di evento frequente considerando gli schemi con 7 isole di dimensioni 50X30



Figura 214: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza del terzo varco nel caso di evento frequente considerando gli schemi con 7 isole di dimensioni 50X30



Figura 215: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza della quarta isola nel caso di evento frequente considerando gli schemi con 7 isole di dimensioni 50X30



Figura 216: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza del primo varco nel caso di evento estremo considerando gli schemi con 7 isole di dimensioni 50X30



Figura 217: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza della seconda isola nel caso di evento estremo considerando gli schemi con 7 isole di dimensioni 50X30



Figura 218: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza del terzo varco nel caso di evento estremo considerando gli schemi con 7 isole di dimensioni 50X30



Figura 219: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza della quarta isola nel caso di evento estremo considerando gli schemi con 7 isole di dimensioni 50X30

Partendo proprio dall'andamento di questi profili trasversali si può notare come per entrambi gli schemi la soluzione con piattaforme isola a largo della barra con pennelli segua un profilo intermedio tra la soluzione con solo isole a largo della barra e quella composta da isole a riva della barra con pennelli, mantenendo quindi un andamento abbastanza regolare negli ultimi 200m, in modo da far ottenere un valor medio di velocità minore rispetto alle altre ipotesi applicate, sia in presenza di varchi, che di piattaforme isola.

Passando invece ad analizzare i grafici rappresentanti l'andamento delle velocità per le varie fasce parallele alla riva è molto positivo osservare come entrambe le configurazioni, sia la 10 che la 11, in entrambe le due condizioni di moto ondoso (frequente ed estrema), mostrino un andamento abbastanza regolare e che esso resti quasi sempre al di sotto della linea rappresentate la situazione attuale, sia nei pressi della riva che nei pressi della barra (figure 196-197-200-201). Questo era il risultato cercato fin dall'inizio, ossia riuscire ad ottenere un miglioramento generalizzato delle condizioni di moto in tutta l'area di interesse, qualunque fosse la condizione di moto ondoso imposta al contorno. Obiettivo che prima di testare queste ultime due disposizioni non era mai stato possibile raggiungere, perché gli effetti positivi erano mostrati o solo in una certa fascia del dominio o solo sotto un determinato tipo di evento. Finalmente invece le configurazioni 10 e 11 sono riuscite nell'intento di far collimare il tutto.

Infine ciò è ben rappresentabile dai parametri numerici che danno l'idea dei valori medi del campo delle velocità nelle varie fasce analizzate e che in questo caso raggiungono i valori più bassi mai visti finora arrivando anche al dimezzamento del valore di partenza. In particolare per il caso di mareggiata con altezza d'onda paria a 2.5 m si ha, con entrambe le configurazioni, una diminuzione maggiore del 50% considerando il valor medio in tutta la fascia di ampiezza di 200m antistante la riva, e maggiore del 40% solo negli ultimi 10m.

Se si considerano invece condizioni estreme la configurazione 10 fa ottenere una diminuzione di circa il 30% in entrambe le zone, mentre la 11 abbatte il campo delle velocità del 35% considerando la zona più ampia e circa del 20% solo nei pressi della riva.

Comunque per completezza si riportano anche le 2 seguenti tabelle che mostrano per le configurazioni studiate il grado di efficacia, considerando sia la zona più ampia che la più ristretta, sia entrambe le condizioni di moto ondoso:

139

CAMPO DELLE VELOCITA'								
H=2.5m	STATO ATTUALE [m/s]	CONF.5 [m/s]	CONF.6 [m/s]	CONF.8 [m/s]	CONF.9 [m/s]	CONF.10 [m/s]	CONF.11 [m/s]	
MEDIA SU 200m	0.244	0.147	0.221	0.138	0.221	0.129	0.112	
DIMINUZIONE	-	40%	9%	43%	9%	47%	54%	

Figura 220: Confronto tra i valori medi delle velocità con le varie configurazione all'interno degli ultimi 200m davanti la costa in condizioni di evento frequente

CAMPO DELLE VELOCITA'								
H=2.5m	STATO ATTUALE [m/s]	CONF.5 [m/s]	CONF.6 [m/s]	CONF.8 [m/s]	CONF.9 [m/s]	CONF.10 [m/s]	CONF.11 [m/s]	
MEDIA SU 10m	0.248	0.213	0.156	0.209	0.160	0.144	0.148	
DIMINUZIONE	-	14%	37%	16%	35%	42%	40%	

Figura 221: Confronto tra i valori medi delle velocità con le varie configurazione all'interno degli ultimi 10m davanti la costa in condizioni di evento frequente

CAMPO DELLE VELOCITA'								
H=5m	STATO ATTUALE [m/s]	CONF.5 [m/s]	CONF.6 [m/s]	CONF.8 [m/s]	CONF.9 [m/s]	CONF.10 [m/s]	CONF.11 [m/s]	
MEDIA SU 200m	0.190	0.162	0.178	0.156	0.173	0.129	0.123	
DIMINUZIONE	-	15%	6%	18%	9%	32%	35%	

Figura 222: Confronto tra i valori medi delle velocità con le varie configurazione all'interno degli ultimi 200m davanti la costa in condizioni di evento estremo

CAMPO DELLE VELOCITA'								
H=5m	STATO ATTUALE [m/s]	CONF.5 [m/s]	CONF.6 [m/s]	CONF.8 [m/s]	CONF.9 [m/s]	CONF.10 [m/s]	CONF.11 [m/s]	
MEDIA SU 10m	0.262	0.272	0.192	0.278	0.188	0.187	0.215	
DIMINUZIONE	-	-4%	27%	-6%	28%	29%	18%	

Figura 223: Confronto tra i valori medi delle velocità con le varie configurazione all'interno degli ultimi 10m davanti la costa in condizioni di evento estremo

Non sono stati invece approfonditi i risultati riguardanti l'altezza d'onda, ma perché essi rispecchiano quello che già si era presunto dalle immagini inziali, ossia che l'abbattimento è praticamente identico a quello già evidenziato per il caso di piattaforme isola a largo della barra, ma senza pennelli, che comunque era la soluzione che garantiva i risultati maggiori.

In definitiva quindi è possibile concludere che le configurazioni 10 e 11 sono quelle che hanno restituito i risultati migliori e che sembrano garantire una buona protezione al ripascimento previsto per il litorale di Castiglione della Pescaia.

Inoltre non sussistono delle grandi differenze fra esse tali che possano permettere una scelta decisa fra l'una e l'altra, perché è vero che è possibile notare come lo schema con 5 isole leggermente più grandi mostri dei maggiori miglioramenti nei tratti più vicini al litorale, mentre l'altra configurazione abbatta maggiormente l'intensità del moto ondoso un po' più a largo, nei pressi della barra, ma comunque queste differenze sono minime ed il comportamento generale è il medesimo.

Quindi per arrivare ad una scelta definitiva che poi rappresenterà la configurazione di progetto reale dell'intervento, è stato deciso di eseguire un'analisi dei costi di entrambe per vedere quale di esse sia più economicamente vantaggiosa e sulla quale quindi ricadrà la scelta finale.

4.2.4 ANALISI DEI COSTI

Per effettuare l'analisi dei costi di entrambe le configurazioni è stato fatto ricorso al prezziario ufficiale della regione Lazio, che è un documento molto attendibile dal momento che in tale zona sono molti diffusi e frequenti tali tipi di lavorazioni.

Al fine di stimare la spesa totale necessaria per costruire le piattaforme isola è imprescindibile partire prima dal calcolo del materiale utile alla costruzione.

In entrambi gli schemi le strutture sono state progettate identicamente, ad eccezion del fatto per le dimensioni in pianta ovviamente, ma quindi tutte le piattaforme isola possiedono le seguenti caratteristiche:

- Imbasamento di spessore 0,5 m composto da pietrame proveniente da cava con peso medio di circa 250 kg;
- Nucleo centrale dell'opera composta da massi naturali di I categoria (0,05-1 t);
- Mantellata composta da massi naturali di III categoria (3-7 t);
- Pendenza dell'opera 1:2.

Per maggiore chiarezza si riportano le sezioni tipo di una piattaforma isola per ciascuna configurazione:



Figura 224: Vista in pianta della configurazione di progetto 10





Figura 225: Sezioni tipo della piattaforma isola di dimensioni 70m X 30m (tutte le misure sono espresse in metri)



Figura 226: Vista in pianta della configurazione di progetto 11





Figura 227: Sezioni tipo della piattaforma isola di dimensioni 50m X 30m ((tutte le misure sono espresse in metri)
Per quanto riguarda i pennelli di collegamento non si riporta il disegno delle sezioni, ma comunque la sezione è trapezoidale analogamente a quella delle piattaforme isola, tuttavia a differenza di esse la pendenza dei paramenti è maggiore, 2:3 invece che 1:2, e la sommità ha una larghezza di soli 5 metri.

È stato quindi possibile stimare facilmente il volume di materiale necessario per la costruzione del sistema di difesa. Moltiplicando poi esso per la densità è stato calcolato il peso totale, di essenziale importanza poiché i prezzi dei vari materiali costituenti sono espressi in relazione al peso e non al volume.

Altro passaggio fondamentale è la scelta sul modo di eseguire la lavorazione, ossia se la costruzione dovrà avvenire da terra, con la conseguente necessaria realizzazione di piste, sia sulla spiaggia che in mare, per permettere ai mezzi di trasportare i massi fino al sito di costruzione, oppure da mare tramite l'utilizzo di idonei mezzi marittimi.

La prima soluzione consente ovviamente un risparmio sui costi per quanto riguarda il noleggio dei mezzi ed il trasporto e la gettata dei massi però al contempo presenta anche due problemi non di poco conto:

- Costo aggiuntivo di piste e pennelli necessari per arrivare al luogo designato e successivo smantellamento di essi;
- Discreto impatto ambientale causato da un continuo passaggio di mezzi sulla spiaggia.

Dal momento che è parte comunque integrante del progetto anche la realizzazione dei 3 pennelli sommersi che collegano la spiaggia ad altrettante piattaforme, la soluzione più vantaggiosa è quella di realizzare tali 3 opere via terra usufruendo dei pennelli come pista, che non presentano quindi un costo aggiuntivo alla progettazione, mentre le restanti isole da costruire (2 in un caso e 4 nell'altro) saranno realizzate via mare evitando quindi la costruzione di ulteriori pennelli di collegamento, i quali andrebbero successivamente rimossi.

A tal punto è bastato moltiplicare il peso di ogni componente per il relativo prezzo necessario per la lavorazione ed è stato possibile determinare il costo totale, prima per ogni singola opera e poi per la configurazione in generale.

Ovviamente il costo dei tre pennelli sommersi è identico in entrambi gli schemi quindi il confronto viene fatto solo sulla spesa necessaria alla realizzazione delle piattaforme isola. Sono riportate di seguito le tabelle riassuntive di tale analisi:

PREZZI			
LAVORAZIONI DA	TERRA		
MASSI I CATEGORIA	22.43	€/t	
MASSI III CATEGORIA	25.53	€/t	
FONDAZIONE	26.13	€/t	
LAVORAZIONI DA MARE			
MASSI I CATEGORIA	26.92	€/t	
MASSI III CATEGORIA	31.91	€/t	
FONDAZIONE	31.35	€/t	

Tabella 25: Prezzi inerenti opere marittime tratti dal prezziario della regione Lazio

5 ISOLE 70 X 30		
volume nucleo	1208.35	mc
peso nucleo	2537.53	t
volume mantellata	2749.47	mc
peso mantellata	5773.88	t
volume fondazione	1163.96	mc
peso fondazione	1978.73	t
		-
costo nucleo da terra	56,916.89	€
costo mantellata da terra	147,407.23	€
costo fondazione da terra	51,704.27	€
		-
costo singola opera da terra	256,028.39	€
numero isole da terra	3	
costo totale da terra	768,085.16	€
costo nucleo da mare	68,310.42	€
costo mantellata da mare	184,244.60	€
costo fondazione mare	62,033.25	€
		-
costo singola opera da mare	314,588.27	€
numero isole da mare	2	
costo totale da mare	629,176.54	€
costo totale	1.397.261.70	€

 Tabella 26: Analisi costo complessiva della soluzione con 5 isole di dimensioni 70m X 30

7 ISOLE 50 X 30		
volume nucleo	832.76	mc
peso nucleo	1748.80	t
volume mantellata	2058.68	mc
peso mantellata	4323.22	t
volume fondazione	865.51	mc
peso fondazione	1471.36	t

costo nucleo da terra	39,225.61	€
costo mantellata da terra	110,371.80	€
costo fondazione da terra	38,446.77	€
costo singola opera da terra	188,044.18	€
numero isole da terra	3	
costo totale da terra	564,132.53	€
costo nucleo da mare	47,077.73	€
costo mantellata da mare	137,953.94	€
costo fondazione mare	46,127.29	€
costo singola opera da mare	231,158.96	€
numero isole da mare	4	
costo totale da mare	924,635.85	€
costo totale	1,488,768.38	€

Tabella 27: Analisi costo complessiva della soluzione con 5 isole di dimensioni 70m X 30m

Come si può ben vedere la configurazione con 5 isole di dimensioni 70m X 30m risulta, seppur di poco la più conveniente, con un risparmio stimato in poco più di 90,000 euro.

In definitiva quindi la scelta definitiva di progetto ricade su tale configurazione.

4.2.5 TEST ONDA IRREGOLARE SU CONFIGURAZIONE DEFINITIVA DI PROGETTO

Per concludere lo studio, una volta che è stata determinata la configurazione definitiva di progetto, essa è stata sottoposta a due ulteriori simulazioni, sempre una rappresentante le condizioni di evento frequente e l'altra di evento estremo, ma dove, diversamente da quanto sempre fatto in precedenza, è stata imposta al contorno la generazione di moto ondoso irregolare.

Ciò è dovuto al fatto che una volta trovata la soluzione migliore per il litorale essa deve essere necessariamente testata anche con le condizioni più simili a quelle che possono accadere naturalmente così da assicurarsi che è funzionante anche in questi frangenti; essendo che in natura non si avrà mai un moto ondoso veramente regolare, si rende necessario l'esecuzione di quest'ultime due prove.

Per generare un tale moto ondoso è stata utilizzata l'opzione di SWASH che permette di imporre uno spettro di tipo JONSWAP come condizione di moto ondoso al contorno. Sono stati impostati i seguenti parametri significativi dello spettro:

- Evento frequente: Y=3 Hs= 2.5m Tp= 7.5s dir= 168°N
- Evento estremo: Y=3 Hs= 5m Tp= 9.8s dir= 172°N

Per il resto le simulazioni sono state lasciate perfettamente identiche a quelle lanciate in precedenza ed anche in questi due casi sono stati richiesti come risultati i campi delle velocità (in valore assoluto) e delle altezze d'onda mediati negli ultimi due minuti della simulazione. Si riportano di seguito i risultati ottenuti.



Moto ondoso irregolare evento frequente

Figura 228: Confronto tra i campi di velocità in valore assoluto determinati per la configurazione attuale (a sinistra) e la configurazione definitiva di progetto (a destra) sotto condizione di moto ondoso irregolare in caso di evento frequente



Figura 229: Confronto tra i campi delle altezze d'onda determinati per la configurazione attuale (a sinistra) e la configurazione definitiva di progetto (a destra) sotto condizione di moto ondoso irregolare in caso di evento frequente

È facilmente osservabile come i risultati siano analoghi a quelli avuti in caso di moto ondoso regolare e soprattutto nel caso dei campi della velocità si può notare che vi sia un grosso abbattimento del valore della velocità, sia subito a largo della barra che soprattutto negli ultimi 200 metri.

Si riportano di seguito anche le tabelle che mostrano chiaramente le diminuzioni che si ottengono sia sulle velocità che sulle altezze d'onda.

CAMPO DELLE VELOCITA'			
H= 2.5m	STATO ATTUALE [m/s]	5 ISOLE 70 X 30 [m/s]	DIMINUZIONE
FASCIA 1	0.545	0.120	78%
FASCIA 2	0.554	0.147	73%
FASCIA 3	0.327	0.148	55%
FASCIA 4	0.202	0.131	35%
FASCIA 5	0.208	0.159	24%
FASCIA 6	0.247	0.197	20%
MEDIA TOTALE	0.347	0.150	57%

Tabella 28: Confronto tra i valori medi delle velocità all'interno delle varie fasce del dominio in caso di evento frequente

CAMPO DELLE VELOCITA'			
H= 2.5m	STATO ATTUALE [m/s]	5 ISOLE 70 X 30 [m/s]	DIMINUZIONE
ULTIMI 10 m	0.308	0.222	28%

Tabella 29: Confronto tra i valori medi delle velocità negli ultimi 10 metri del dominio in caso di evento frequente

CAMPO DELLE ALTEZZE D'ONDA			
H= 2.5m	STATO ATTUALE [m]	5 ISOLE 70 X 30 [m]	DIMINUZIONE
FASCIA 1	1.35	1.06	21%
FASCIA 2	1.11	0.78	30%
FASCIA 3	0.89	0.69	23%
FASCIA 4	0.79	0.61	22%
FASCIA 5	0.67	0.53	20%
FASCIA 6	0.50	0.39	23%
MEDIA TOTALE	0.88	0.68	24%

Tabella 30: Confronto tra i valori medi delle altezze d'onda all'interno delle varie fasce del dominio in caso di evento frequente

Si ha quindi un abbattimento maggiore del 50% del campo delle velocità negli ultimi 200 metri, con una diminuzione di esso andando da largo verso riva. Oltre la barra infatti si può notare come il valore medio della velocità subisca una diminuzione di quasi l'80%, mentre negli ultimi 20 metri solo del 20%.

Abbastanza stabile invece il dato per quanto riguarda l'abbattimento dell'altezza d'onda, infatti esso è sempre in media intorno al 25% per tutta la zona interessata dalle piattaforme isola.

Si riportano infine anche in questo caso, per completezza, i grafici rappresentanti i confronti tra gli andamenti long-shore e cross-shore delle due grandezze studiate.



Figura 230: Andamento della velocità mediata nella fascia di 40m a largo della barra in caso di evento frequente



Figura 231: Andamento della velocità mediata nella fascia di 10m antistante la linea di riva in caso di evento frequente



Figura 232: Andamento dell'altezza d'onda mediata nella fascia di 40m a largo della barra in caso di evento frequente



Figura 233: Andamento dell'altezza d'onda mediata nella fascia di circa 30m antistante la linea di riva in caso di evento frequente



Figura 234: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza del primo varco nel caso di evento frequente



Figura 235: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza della seconda isola nel caso di evento frequente



Figura 236: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza della terza isola nel caso di evento frequente



Figura 237: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza del terzo varco nel caso di evento frequente



Figura 238: Profilo trasversale alla linea di riva dell'altezza d'onda in presenza del primo varco nel caso di evento frequente



Figura 239: Profilo trasversale alla linea di riva dell'altezza d'onda in presenza della seconda isola nel caso di evento frequente



Figura 240: Profilo trasversale alla linea di riva dell'altezza d'onda in presenza della terza isola nel caso di evento frequente



Figura 241: Profilo trasversale alla linea di riva dell'altezza d'onda in presenza del terzo varco nel caso di evento frequente

I grafici rappresentanti i profili long-shore (figure 230-233) mostrano dei risultati forse anche migliori rispetto a quelli visti per moti ondosi regolari, infatti gli andamenti corrispondenti alla configurazione di progetto presentano valori praticamente sempre inferiori a quelli relativi allo stato attuale.

Molto interessanti anche i grafici rappresentanti i profili cross-shore (figure 234-241), soprattutto quelli riguardanti le velocità, dove infatti è possibile vedere che sia nelle fasce relative ai varchi che a quelle delle isole, i valori di questa grandezza sono notevolmente abbattuti negli ultimi 200 metri circa.

È inoltre possibile notare che invece si ha la formazione di un campo di velocità un po' più intenso subito a largo delle piattaforme (fatto che si poteva notare anche nella figura 228),

ma che non sono raggiunti i picchi di intensità massimi che si registrano nella configurazione attuale subito a largo della barra.



- Moto ondoso irregolare evento estremo

Figura 242: Confronto tra i campi di velocità in valore assoluto determinati per la configurazione attuale (a sinistra) e la configurazione definitiva di progetto (a destra) sotto condizione di moto ondoso irregolare in caso di evento estremo



Figura 243: Confronto tra i campi delle altezze d'onda determinati per la configurazione attuale (a sinistra) e la configurazione definitiva di progetto (a destra) sotto condizione di moto ondoso irregolare in caso di evento estremo

Anche nel caso di evento estremo i risultati sono netti e inconfondibili. Osservando la figura 242 emerge nettamente come il sistema di piattaforme isole rappresenti un ottimo sistema di difesa per il litorale retrostante. È infatti possibile vedere chiaramente come si crei una zona

uniforme di quiete negli ultimi 200 metri, con dei campi di velocità un po' più intensi solo subito a largo delle isole e in alcuni varchi sempre nell'intorno delle piattaforme.

Per il resto il campo delle velocità presenta valori nettamente inferiori rispetto a quanto ottenuto in condizioni di stato attuale, sia verso riva, che subito a largo della barra.

Inoltre in questo caso il miglioramento apportato in caso di evento estremo è anche maggiore di quello che era stato appurato in condizioni di moto regolare e ciò è confermato anche dai risultati riportati nelle seguenti tabelle.

CAMPO DELLE VELOCITA'			
H= 5m	STATO ATTUALE [m/s]	5 ISOLE 70 X 30 [m/s]	DIMINUZIONE
FASCIA 1	0.564	0.274	51%
FASCIA 2	0.612	0.332	46%
FASCIA 3	0.620	0.304	51%
FASCIA 4	0.478	0.214	55%
FASCIA 5	0.465	0.222	52%
FASCIA 6	0.531	0.298	44%
MEDIA TOTALE	0.545	0.274	50%

Tabella 31: Confronto tra i valori medi delle velocità all'interno delle varie fasce del dominio in caso di evento estremo

CAMPO DELLE VELOCITA'			
H= 5m	STATO ATTUALE [m/s]	5 ISOLE 70 X 30 [m/s]	DIMINUZIONE
ULTIMI 10 m	0.523	0.318	39%

Tabella 32: Confronto tra i valori medi delle velocità negli ultimi 10 metri del dominio in caso di evento estremo

CAMPO DELLE ALTEZZE D'ONDA			
H= 5m	STATO ATTUALE [m]	5 ISOLE 70 X 30 [m]	DIMINUZIONE
FASCIA 1	1.47	1.18	20%
FASCIA 2	1.32	0.96	27%
FASCIA 3	1.12	0.90	20%
FASCIA 4	0.97	0.79	19%
FASCIA 5	0.87	0.73	16%
FASCIA 6	0.73	0.65	10%
MEDIA TOTALE	1.08	0.87	20%

Tabella 33: Confronto tra i valori medi delle altezze d'onda all'interno delle varie fasce del dominio in caso di evento estremo

La diminuzione media negli ultimi 200 metri è infatti pari al 50%, nettamente superiore al 32% registrato con un moto ondoso regolare.

Da notare inoltre rispetto al caso di evento frequente sopra riportato che in questo caso non si ha un abbattimento dei valori decrescente da largo verso riva, ma abbastanza uniforme in tutte fasce, sempre intorno al 50%, con un range variabile precisamente tra il 44% ed il 55%. Anche negli ultimi 10 metri si nota un buon miglioramento rispetto al caso di moto ondoso regolare, poiché si passa da una diminuzione del 29% ad una del 39%.

Costante la situazione per quanto riguarda l'altezza d'onda che si attesta abbastanza uniformemente in tutto il dominio analizzato intorno al 20%.

Sono riportati infine di seguito, analogamente a quanto visto per tutti i precedenti casi, i profili delle velocità e delle altezze d'onda.



Figura 244: Andamento della velocità mediata nella fascia di 40m a largo della barra in caso di evento estremo



Figura 245: Andamento della velocità mediata nella fascia di 10m antistante la linea di riva in caso di evento estremo



Figura 246: Andamento dell'altezza d'onda mediata nella fascia di 40m a largo della barra in caso di evento estremo



Figura 247: Andamento dell'altezza d'onda mediata nella fascia di circa 30m antistante la linea di riva in caso di evento estremo



Figura 248: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza del primo varco nel caso di evento estremo



Figura 249: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza della seconda isola nel caso di evento estremo



Figura 250: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza della terza isola nel caso di evento estremo



Figura 251: Profilo trasversale alla linea di riva della velocità espressa in valore assoluto in presenza del terzo varco nel caso di evento estremo



Figura 252: Profilo trasversale alla linea di riva dell'altezza d'onda in presenza del primo varco nel caso di evento estremo



Figura 253: Profilo trasversale alla linea di riva dell'altezza d'onda in presenza della seconda isola nel caso di evento estremo



Figura 254: Profilo trasversale alla linea di riva dell'altezza d'onda in presenza della terza isola nel caso di evento estremo



Figura 255: Profilo trasversale alla linea di riva dell'altezza d'onda in presenza del terzo varco nel caso di evento estremo

L'andamento di questi profili è praticamente identico a quanto visto per il caso di evento frequente.

Le figure 244,245,246 e 247 mostrano gli andamenti long-shore ed evidenziano come i valori di velocità ed altezza d'onda ottenuti nella configurazione di progetto siano praticamente sempre inferiori a quelli ottenuti allo stato attuale.

Analogamente ciò può essere notato nei profili cross-shore (figure 248-255), in particolare in quelli rappresentanti l'andamento della velocità in valore assoluto, dove negli ultimi 200 metri si nota un notevole abbattimento del valore originario, con al contempo un lieve incremento nella zona subito a largo delle piattaforme isola, come già evidenziato nel caso di evento frequente.

In definitiva anche le simulazioni con moto ondoso irregolare testimoniano un netto miglioramento delle condizioni di moto nei pressi del litorale, in termini di velocità ed altezza d'onda, che si otterrebbero con la realizzazione della configurazione in esame.

Si può concludere quindi che la disposizione ottimale, considerando anche il rapporto benefici/prezzo, di piattaforme isola per proteggere la spiaggia situata dinnanzi al centro abitato di Castiglione della Pescaia è la seguente:

- 5 isole sommerse (-0.5 s.l.m.) di dimensioni 70m x 30m, poste a circa 150m dalla spiaggia e con varchi tra loro di ampiezza pari a 80m.

5.CONCLUSIONI

Il lavoro effettuato permette di trarre diverse conclusioni, sia nel particolare, a riguardo del caso-studio di Castiglione della Pescaia, che rappresentava il fulcro di tale approfondimento, sia da un punto di vista generale, sull'utilizzo ed il funzionamento delle piattaforme isola come opere di protezione dei litorali.

Innanzitutto è possibile affermare che l'obiettivo primario è stato raggiunto, ossia è stato possibile individuare una configurazione che presumibilmente permetterà una buona protezione del ripascimento che avrà luogo sulla spiaggia dinnanzi al centro abitato di Castiglione della Pescaia, consentendo quindi un avanzamento della linea di riva.

Le varie prove hanno evidenziato che il parametro principale di dimensionamento è il rapporto che sussiste tra l'ampiezza dei varchi e la lunghezza della piattaforma.

Se infatti questo rapporto fosse troppo grande si otterrebbe un funzionamento isolato delle varie isole e non come sistema unico. Ciò è dimostrato dal fatto che le due disposizioni che hanno restituito i risultati migliori presentavano o varchi di 80m e lunghezze delle opere di 70m, oppure sia varchi che lunghezze delle opere di 50m.

Oltre a tale rapporto è importante anche che le dimensioni delle piattaforme siano paragonabili alla lunghezza d'onda delle onde che si abbattono su di esse.

A seconda quindi del posizionamento di esse, in particolare della profondità alla quale sono realizzate, dipende il loro dimensionamento.

Meno importante invece si è dimostrata la distanza da riva, o meglio, è una caratteristica comunque fondamentale e da studiare quando si progettano interventi di questo genere, ma è maggiormente dipendente da condizioni sito-specifiche, come per esempio batimetria, correnti e morfologia del litorale, e quindi almeno al momento non sono stati ottenuti dei risultati che permettono una generalizzazione del tema. Da sottolineare inoltre il beneficio dato dalla realizzazione di alcuni pennelli, chiaramente sommersi, che collegano le opere a riva.

Da notare che tutte queste considerazioni sono in linea con le situazioni e le esperienze capitate in passato e riportate nel terzo capitolo.

Altro fatto di non meno importanza è che essendo strutture sommerse un ulteriore parametro fondamentale al fine di una buona progettazione oltre al rapporto varchi/dimensione è anche quello dell'ampiezza della berma, che consente un buon funzionamento per trasmissione.

Da un punto di vista generale tuttavia, e se ne deve tenere conto anche per quanto riguarda il progetto di Castiglione, le piattaforme isola hanno dimostrato di poter produrre buoni benefici in ben determinate condizioni per le quali sono state progettate, quindi si sconsiglia vivamente di effettuare variazioni in corso d'opera o apportare in seguito delle modifiche al litorale che ne muti le usuali dinamiche, perchè altrimenti tali opere potrebbero diventare inutili o addirittura nocive. Proprio per questa particolarità si consiglia sempre un costante monitoraggio delle opere e dell'area di interesse.

Inoltre proprio per quanto appena detto e dal momento che la realizzazione di queste opere modificherà sostanzialmente la batimetria del tratto interessato, si consiglia di non attuare tutto l'intervento immediatamente, ma di iniziare con la costruzione di 2 o 3 di queste opere e monitorare l'evoluzione del litorale ed il funzionamento delle opere al modificarsi delle dinamiche in atto e solo successivamente, dopo che sarà a disposizione un quadro più completo della situazione e se i risultati osservati saranno positivi ed in linea con le attese, sarà allora terminato l'intervento.

È possibile infine concludere che le piattaforme isola possono avere un buono sviluppo come sistemi di protezione dei litorali, dal momento che rappresentano una buona alternativa alle tradizionali difese ed in confronto ad esse possono essere più economiche e meno impattanti, ma tuttavia non sembrano utilizzabili in condizioni di forti disequilibrio, dove l'erosione è molto critica, poiché incidono in maniera più lieve sul moto ondoso incidente rispetto a quanto possono fare altri sistemi di difesa come per esempio le barriere distaccate parallele a riva.

BIBLIOGRAFIA

- APAT. (2007). Atlante delle opere di sistemazione costiera.
- Berriolo, G. (1972). Spiagge e porti turistici. HOEPLI.
- Cocco, E., & Yone Iacono, S. I. (2002). Lineamenti morfodinamici e sedimentari del litorale dei campi Flegrei (Campania, Italia meridionale). *Il Quaternario*, p. 209-220.
- Delft University. (s.d.). SWASH User Manual.
- Fierro, G., Berriolo, G., & Ferrari, M. (2010). Le spiagge della Liguria occidentale.
- Paganelli, D., Valle, P. L., Ercole, S., Lisi, I., Teofili, C., & Nicoletti, L. (2014). *Linee guida per gli studi ambientali connessi alla realizzazione di opere di difesa costiera*. ISPRA.
- Politecnico di Bari. (2007). Attività finalizzate alla redazione del Piano Regionale delle Coste (P.R.C.) della regione Puglia. Bari.
- Regione Liguria. (2000). Piano territoriale di coordinamento della costa.

Regione Liguria. (2013). Piano di tutela dell'ambiente marino e costiero ambito 08.