

POLITECNICO DI TORINO

Laurea Magistrale in Ingegneria Matematica



Tesi di Laurea Magistrale

**Ottimizzazione idrodinamica di un surf reef: ipotesi progettuale
per il golfo di sturla**

Supervisors:

Luca RIDOLFI

Giovanni BESIO

Candidate:

Federico BARONETTI

Luglio 2023

Abstract

Con il termine surf reef si intende una particolare conformazione del fondale, tipicamente di natura rocciosa o corallina, in corrispondenza della quale si osserva la formazione di onde adatte alla pratica del surf. Negli ultimi anni, la progettazione di una struttura soffolta in grado di riprodurre la funzione dei surf reef naturali ha riscontrato un crescente interesse. In parte motivato dall'aumento di popolarità del surf e in parte giustificato dalla possibilità di utilizzare tale opera come misura di mitigazione dei fenomeni erosivi e misura di protezione per le infrastrutture. Nonostante siano stati effettuati molteplici studi sia dal punto di vista numerico che sperimentale, il design dei surf reef è tipicamente ad hoc. Dipende fortemente dalle caratteristiche topografiche e batimetriche del sito di progetto e dalle condizioni meteo-marini locali. Il progetto di tesi presenta la progettazione di un surf reef all'interno del golfo di Sturla, situato nella parte orientale di Genova. In seguito ai sopralluoghi nel sito di progetto è stato possibile definire il profilo batimetrico del golfo e il modello dell'emerso. Successivamente è stata analizzata la climatologia del moto ondoso, con l'obiettivo di individuare un insieme di stati capaci di caratterizzare la variabilità delle condizioni del moto ondoso. La ricerca degli stati è stata sviluppata utilizzando due diversi algoritmi di classificazione: DBScan e K-Means. I risultati hanno portato all'identificazione di sei stati, utilizzati poi per forzare il modello di propagazione. La risposta idrodinamica in presenza della struttura è stata analizzata utilizzando un modello a risoluzione di fase non idrostatico, basato sul sistema di equazioni non-lineari di Navier-Stokes in acque basse (NLSWE). Sulla base delle simulazioni è stata analizzata quantitativamente la praticabilità delle onde in termini di valori di β , coefficiente di Iribarren e altezza al frangimento. I risultati numerici hanno mostrato come la struttura possa effettivamente comportare un sostanziale incremento di praticabilità delle onde. Il presente lavoro di ricerca si configura come un utile strumento per una valutazione preliminare di realizzabilità, tuttavia

gli effetti a lungo termine sulla morfodinamica del golfo in risposta alla presenza della struttura non sono stati analizzati nel dettaglio.

Indice

Elenco delle tabelle	6
Elenco delle figure	7
1 Introduzione	9
2 Surf Reef	11
2.1 Parametri Onde	11
2.1.1 Angolo di Peel	11
2.1.2 Coefficiente di Iribaren	12
2.2 Componenti funzionali	15
2.2.1 Rampa	16
2.2.2 Piattaforma	16
2.2.3 Focus	16
2.2.4 Cuneo	17
2.2.5 Mensola	18
2.2.6 Cresta	19
2.2.7 Pinnacolo	20
3 Analisi del moto ondoso: Golfo di Sturla	23
3.1 Introduzione	23
3.2 Hindcast	23
3.3 Selezione degli Stati	25
3.3.1 K-Means	27
3.3.2 DBScan	28
3.4 Risultati	29
3.4.1 K-Means	29
3.4.2 DBScan	30
3.5 Conclusioni	32

4	Descrizione del modello	35
4.1	Introduzione	35
4.2	Equazioni di governo	36
4.2.1	Sistema di coordinate e dominio	36
4.2.2	Equazioni di Navier-Stokes incomprimibili	36
4.2.3	Equazioni mediate sulla profondità	39
4.2.4	Condizioni al contorno	41
4.3	Frangimento	42
4.4	Miscelamento Turbolento	43
5	Sito di progetto	45
5.1	Batimetria ed emerso	45
5.2	Obiettivi progettuali	47
5.3	Set-up modello	49
5.3.1	Dominio computazionale	49
5.3.2	Condizioni al contorno	50
6	Risultati numerici	55
6.1	Risposta idrodinamica senza opera	55
6.1.1	Correnti superficiali indotte	55
6.1.2	Quota pelo libero	57
6.1.3	Conclusioni	61
6.2	Risposta idrodinamica reef	62
6.2.1	Correnti superficiali medie indotte	62
6.2.2	Quota pelo libero	63
6.2.3	Conclusioni	66

Elenco delle tabelle

2.1	Valutazione del livello di abilità del surfista	13
2.2	Classificazione dei regimi	14
3.1	34

Elenco delle figure

2.1	Grandezze caratteristiche	12
2.2	Angoli di <i>peel</i> in funzione dell'altezza dell'onda e dell'abilità del surfista. L'angolo di <i>peel</i> sull'asse y , l'altezza dell'onda sull'asse x e l'abilità del surfista è indicata dai numeri nel grafico [2]	14
2.3	Profilo dei frangenti	15
2.4	16
2.5	Rampa	17
2.6	Cuneo	18
2.7	Mensola	19
2.8	Cresta	19
2.9	Sezione tubante	20
2.10	Pinnacolo	21
3.1	Sulla sinistra il centro urbano di Genova, il golfo di Sturla è individuato dal riquadro arancione	24
3.2	Punti spaziali Hindcast	25
3.3	Distribuzione spaziale delle osservazioni contenute nell' <i>Hindcast</i>	26
3.4	Risultati classificatore K-Means	29
3.5	Distribuzione dei centroidi relativa a K-Means	30
3.6	31
3.7	Distribuzione dei centroidi ottenuti con <i>DBScan</i>	32
3.8	Distribuzione dei centroidi ottenuti con <i>DBScan</i>	33
4.1	37
5.1	Veduta aerea spiaggia della spiaggia di Sturla	46
5.2	Isolinee	47
5.3	Isolinee	48
5.4	Una cosiddetta onda <i>A-frame</i> , le pareti praticabili verso destra e verso sinistra	49
5.5	Isobate reef	50
5.6	Estensione del dominio computazionale	51

5.7	Griglia di calcolo	52
6.1	Correnti superficiali medie indotte per gli stati di mare L1 e L2	56
6.2	Correnti superficiali medie indotte per gli stati di mare M1 e M2	57
6.3	Correnti superficiali medie indotte per gli stati di mare S1 e S2	58
6.4	Elevazione della superficie libera stato L1, la freccia indica la direzione propagazione imposta sul margine a largo	59
6.5	Elevazione della superficie libera stato M1 e S1, la freccia indica la direzione propagazione imposta sul margine a largo .	60
6.6	Elevazione della superficie libera stato L2, la freccia indica la direzione propagazione imposta sul margine a largo	61
6.7	Elevazione della superficie libera stato M2 e S2, la freccia indica la direzione propagazione imposta sul margine a largo .	62
6.8	Correnti superficiali indotte per gli stati L1 e L2 in presenza della struttura	67
6.9	Correnti superficiali indotte per gli stati M1 e M2 in presenza della struttura	67
6.10	Correnti superficiali indotte per gli stati S1 e S2 in presenza della struttura	68
6.11	Elevazione della superficie libera stato L1 e coefficiente di Iribarren	69
6.12	Linea esterna di frangimento L1, i colori si riferiscono alle diverse onde	70
6.13	Linea esterna di frangimento e deflessione del fronte L1	71
6.14	Elevazione della superficie libera stato M2 e coefficiente di Iribarren	72
6.15	Linea dei frangenti M2	73
6.16	Evoluzione dei fronti M2, comportamento <i>A-Frame</i>	74
6.17	Evoluzione dei fronti S2, comportamento	75
6.18	Evoluzione dei fronti stato S2	76

Capitolo 1

Introduzione

Negli ultimi anni il surf è diventato uno sport sempre più popolare sia su scala globale che su scala nazionale. Per poter praticare questo sport è necessario il verificarsi di condizioni particolari e se da una parte il numero di praticanti è in aumento la quantità di onde disponibili rimane sostanzialmente invariata. La formazione di onde praticabili, in generale dipende dalla morfologia locale del fondale e dalle caratteristiche del moto ondoso incidente.

Quindi, in principio, modificando la struttura del fondale si potrebbe pensare di alterare il moto ondoso locale in modo tale da innescare un frangimento che favorisca la pratica del surf. L'idea di realizzare strutture soffolte con l'obbiettivo di ottimizzare le condizioni per il surf non è una novità.

Uno dei primissimi studi sulla realizzabilità di un'opera del genere risale al 1988. Tuttavia i primi due progetti videro la luce solamente all'inizio del XXI secolo, entrambi costruiti in Australia. Tra i progetti realizzati il più rinomato in termini di prestazioni è quello situato nella *Gold Coast*[1].

La dimensione spaziale di opere di questo tipo è tipicamente estesa e il cui costo di realizzazione può facilmente aggirarsi intorno all'ordine di milioni di euro. Un investimento di tale portata, a prima vista può risultare spropositato se si guarda al solo vantaggio sportivo. Tuttavia bisogna prendere in considerazione, come nel caso della *Gold Coast*, che la struttura può essere utilizzata come misura di mitigazione dei fenomeni erosivi.

In Italia, l'erosione litoranea è un problema reale basti pensare che la spesa annuale per contrastare l'arretramento del livello di costa messa a disposizione dallo Stato e, in parte, da Regioni e Comuni, è di circa 100 milioni di euro. Tradizionalmente le principali opere per la mitigazione

dell'erosione costiera consistono nel posizionamento di opere rigide emerse, quali pennelli e barriere frangiflutti. Nonostante le opinioni contrarie alla reale efficacia di questi tipi di opere negli ultimi anni sono in aumento.)

Infine, va osservato che i benefici della realizzazione di un'opera del genere si estendono alle attività economiche locali, poichè oltre alle persone che effettivamente praticano lo sport, il surf "attira" un vero e proprio turismo.

Il lavoro svolto è articolato nei seguenti capitoli:

- **Capitolo [2]**: vengono presentati i parametri definiti per caratterizzare le onde per il surf, successivamente viene illustrato il legame che sussiste tra questi e l'abilità del surfista. Infine, sono presentati gli elementi batimetrici peculiari identificati nei *surf breaks* naturali e ne vengono discusse le funzionalità.
- **Capitolo [3]**: viene analizzata la climatologia locale del mare, con il fine di definire gli stati significativi che ne caratterizzano la variabilità.
- **Capitolo [4]**: viene presentato il framework modellistico utilizzato per analizzare la risposta idrodinamica in presenza e in assenza della struttura.
- **Capitolo [5]**: sono riportate le caratteristiche topografiche del sito di progetto quali batimetria del fondale e emerso. Viene inoltre presentati gli aspetti computazionali e fissati gli obiettivi progettuali.
- **Capitolo [6]**: sono discussi i risultati ottenuti nelle simulazioni numeriche. In prima battuta viene discussa la risposta idrodinamica del golfo in assenza della struttura, in termini di elevazione superficiale e correnti medie indotte dal frangimento. Successivamente, viene presentata la risposta idrodinamica in presenza della struttura sovrastante, e ne vengono analizzate le prestazioni in termini di coefficiente di Iribarren, angolo di peel e altezza al frangimento.

Capitolo 2

Surf Reef

Il surf essenzialmente consiste nel "cavalcare" le onde planando lungo la parete dell'onda non ancora franta, rimanendo in piedi sulla tavola.

La formazione di onde praticabili per il surf è il risultato di un insieme di complessi fenomeni fisici. Le aree in cui si osservano onde praticabili, *surf breaks* possiedono caratteristiche topologiche peculiari.

Con il fine di caratterizzare quantitativamente la praticabilità o meno di un'onda, "surfabilità", sono stati identificati i seguenti parametri:

- **Angolo di peel**(α)
- **Coefficiente di Irribaren**(ξ_b)
- **Altezza onda**(H)

Una volta descritti questi parametri verranno discusse le configurazioni batimetriche che caratterizzano i *surf reef* naturali.

2.1 Parametri Onde

2.1.1 Angolo di Peel

E' esperienza comune, specialmente lungo le spiagge, osservare come il frangimento dell'onda avviene simultaneamente lungo la cresta. Tuttavia affinché un'onda sia praticabile è necessario che il frangimento avvenga in maniera graduale (*peel*) lungo la cresta dell'onda. Quantitativamente, il graduale frangersi viene descritto dal cosiddetto angolo di *peel*, individuato come l'angolo racchiuso tra la cresta dell'onda e la linea del frangente.

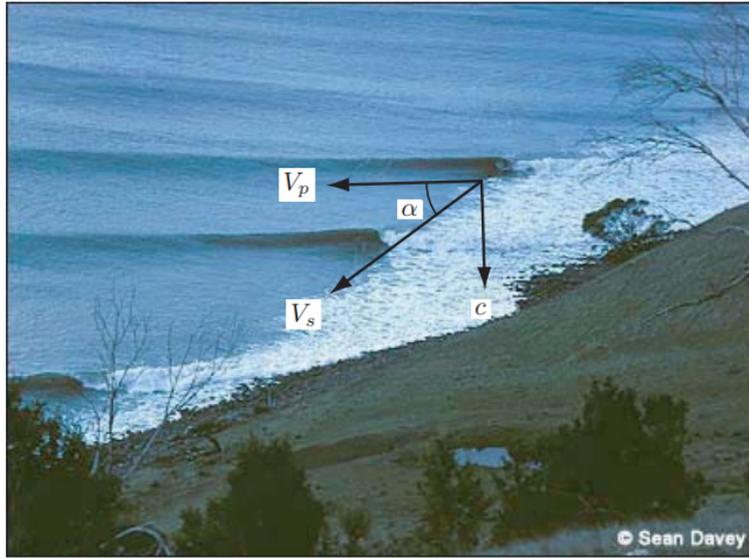


Figura 2.1: Grandezze caratteristiche

Facendo riferimento alla figura 2.1, oltre ad α si possono osservare i vettori relativi alla celerità dell'onda c e alla velocità di *peel* V_p . La velocità effettivamente sperimentata dal surfista è rappresentata dalla risultante di queste due grandezze. Risulta evidente come la praticabilità dell'onda dipenda principalmente dall'angolo di *peel*: valori troppo piccoli impongono al surfista di mantenere una velocità eccessiva. Tuttavia la velocità che un surfista può raggiungere dipende principalmente dall'altezza dell'onda H e dall'abilità del surfista. Nel lavoro di Hutt [2] vengono messi in relazione l'angolo di *peel*, l'abilità del surfista e l'altezza dell'onda H . Nella tabella 2.1 sono definiti i livelli di abilità individuati da Hutt, mentre il grafico in figura 2.2 mostra la relazione tra questi e i parametri H e α .

2.1.2 Coefficiente di Iribaren

Il profilo dell'onda che si infrange è un'altro fattore in grado di influenzare significativamente la praticabilità o meno di un'onda.

Un'altro fattore in grado di influenzare significativamente la praticabilità di un'onda è la forma assunta dal profilo del frangente. Sono stati individuati da Galvin [3] tre principali tipologie di frangimento:

Tabella 2.1: Valutazione del livello di abilità del surfista

Livello	Descrizione	$\alpha[deg]$	$H[m]$
1	I surfisti principianti non sono ancora in grado di cavalcare il fronte dell'onda e si spostano semplicemente in avanti man mano che l'onda avanza.	0	0.70-1.00
2	Surfisti principianti in grado di cavalcare lateralmente lungo la cresta dell'onda.	70	0.65-1.50
3	Surfisti che hanno sviluppato l'abilità di generare velocità "pompano" sulla faccia dell'onda.	60	0.60-2.50
4	surfisti che iniziano occasionalmente ed eseguire le manovre standard del surf.	55	0.55-4.00
5	Surfisti in grado di eseguire manovre standard consecutivamente su una singola onda.	50	0.50 +
6	surfisti in grado di eseguire le manovre standard consecutivamente e occasionalmente manovre avanzate.	40	0.45 +
7	I migliori surfisti amatoriali in grado di eseguire consecutivamente manovre avanzate.	29	0.40 +
8	Surfisti professionisti in grado di eseguire consecutivamente manovre avanzate.	27	0.35 +

- **Spilling:** si verifica se la cresta dell'onda diventa instabile e scorre lungo la faccia anteriore dell'onda producendo la schiuma. Questo regime è considerato praticabile.
- **Plunging:** si verifica se la cresta si "arriccchia" sulla faccia anteriore e cade sulla parte inferiore dell'onda, provocando uno "splash" elevato. I surfisti si riferiscono a questo fenomeno dicendo che "l'onda sta tubando". Questo regime è preferito dalla maggior parte dei surfisti.
- **Surging** si verifica se la cresta rimane non franta e il fronte dell'onda avanza verso la spiaggia con una lieve rottura.

In figura 2.3 sono riportati i profili dei regimi descritti sopra. Tradizionalmente, la tipologia di frangimento viene valutata introducendo il coefficiente di Iribarren definito in [3] come:

$$\xi_b = \frac{s}{\sqrt{\frac{H_b}{L_0}}} \quad (2.1)$$

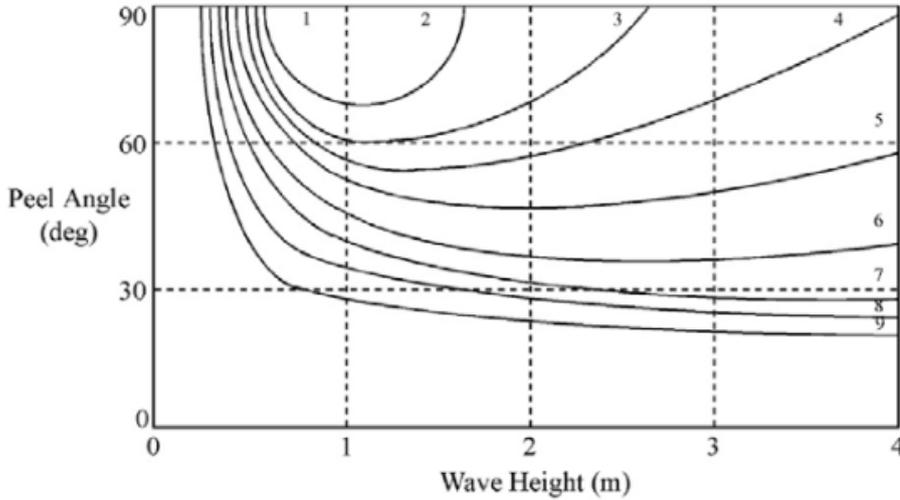


Figura 2.2: Angoli di *peel* in funzione dell'altezza dell'onda e dell'abilità del surfista. L'angolo di *peel* sull'asse y , l'altezza dell'onda sull'asse x e l'abilità del surfista è indicata dai numeri nel grafico [2]

dove H_b è l'altezza dell'onda al frangimento, L_0 è la lunghezza d'onda in acqua profonda e s è la pendenza del fondale. Il coefficiente di Iribarren, è adimensionato e fisicamente può essere interpretato come il rapporto tra la ripidità del fondale e la ripidità locale dell'onda.

Nella tabella 2.1 sono riportati i valori del coefficiente di Iribarren in relazione alle diverse tipologie di frangimento.

Tabella 2.2: Classificazione dei regimi

Regime	Intervallo
Surging	$\xi_b > 2.0$
Plunging	$0.4 > \xi_b > 2.0$
Splling	$\xi_b < 0.4$

Un'altro aspetto importante da prendere in considerazione è la formazione di correnti superficiali, poichè queste interagendo con i fronti possono alterarne la qualità, talvolta rendendo le onde impraticabili. Particolare attenzione è necessaria nei confronti delle correnti di ritorno che fluiscono verso mare, tipicamente molto intense e localizzate.

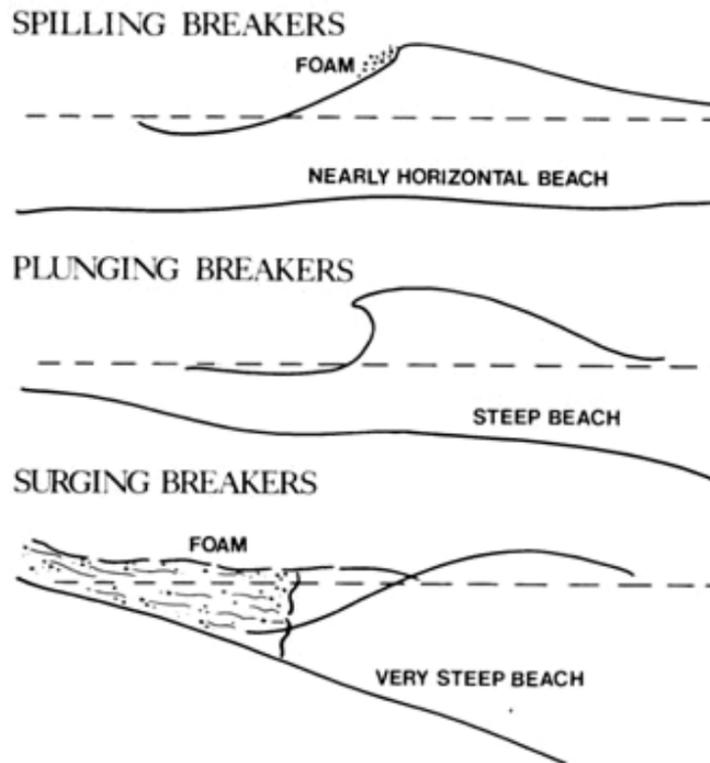


Figura 2.3: Profilo dei frangenti

Quando la corrente di ritorno attraversa la zona del frangente, la superficie dell'onda diventa ruvida e l'onda si infrange in modo esitante, rendendo così le onde inadatte al surf.

2.2 Componenti funzionali

L'identificazione delle varie componenti batimetriche che caratterizzano i migliori *surf breaks* si devono ai lavori sviluppati da Mead e Black in [4] e [5].

Le misurazioni batimetriche effettuate hanno rilevato la presenza di combinazioni di elementi geometrici ricorrenti. Il funzionamento dei vari elementi è stato poi studiato mediante l'utilizzo di modelli numerici.

In particolare sono state individuate sei zone batimetriche peculiari: rampa, piattaforma, focus, cuneo (*wedge*), mensola (*ledge*), cresta (*ridge*) e

pinnacolo (*pinnacle*). Di seguito vengono descritte le zone, è importante ricordare come nonostante vi sia una separazione di scala tra le varie componenti non sussista una netta e precisa separazione funzionale.

2.2.1 Rampa

La funzione principale della rampa consiste nell' allineare i fronti: le onde provenienti da direzioni diverse vengono rifratte verso la direzione principale, normale alle isobate, come viene mostrato in figura 2.4. Inoltre, sulla rampa viene avviato il processo di shoaling che comporta l'aumento dell'altezza dell'onda.

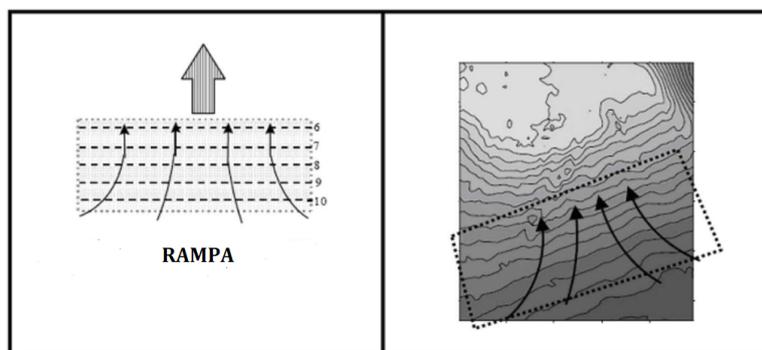


Figura 2.4

2.2.2 Piattaforma

La piattaforma è essenzialmente una zona piana, a profondità costante che ha un effetto minimo sulla traiettoria delle onde. La funzione principale è quella di mantenere le onde ortogonali, la piattaforma funge quindi da collegamento tra le componenti.

2.2.3 Focus

Come si può vedere in figura 2.5 consiste in un'innalzamento del fondale le cui isobate sono disposte in modo tale da focalizzare le onde in direzione dell'apice. Il processo di convergenza del fronte comporta un'innalzamento locale dell'onda, che prende il nome di picco, contemporaneamente a questo l'onda si irripidisce ulteriormente al diminuire della profondità sopra

l'apice. Così facendo la porzione d'onda corrispondente al picco incomincerà a frangere prima, definendo la zona di *take-off* ovvero l'area favorita dai surfisti per la partenza. Un'ulteriore vantaggio del focus rispetto al *take off* è la diminuzione della pendenza del fondale effettivamente sperimentata dall'onda. In questo modo risulterà più facile per il surfista effettuare il *take-off*. Se da un lato la focalizzazione può essere utile per produrre un picco in un'onda, dall'altro il processo stesso di focalizzazione può estrarre energia dalle parti adiacenti dell'onda. Se il focus è eccessivamente marcato, l'altezza dell'onda può ridursi notevolmente dopo il picco iniziale e può inoltre comportare un'aumento dell'angolo di *peel* dell'onda al punto tale da rendere l'onda non praticabile.

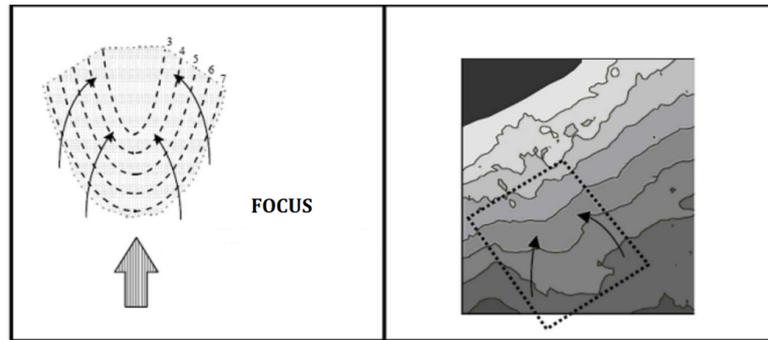


Figura 2.5: Rampa

2.2.4 Cuneo

Il cuneo ha una forma simile alla rampa ma differisce sostanzialmente da quest'ultima per orientazione, profondità e funzione. Come viene mostrato in figura 2.6, il cuneo a differenza della rampa è inclinato rispetto alla direzione principale delle onde. Si trova inoltre a una profondità tale da innescare il frangimento.

I fronti inizialmente allineati per effetto della rampa, al passaggio sul cuneo vengono deviati rispetto alla direzione principale per azione della rifrazione. L'entità di tale effetto sperimentato dall'onda prima del frangimento determina l'angolo di *peel*. Se le onde vengono rifratte troppo prima del frangimento sul cuneo, l'angolo di *peel* diminuisce al punto tale da rendere impraticabile l'onda e il frangimento avviene simultaneamente lungo la cresta. Affinchè si mantenga un angolo di *peel* accessibile, il cuneo deve

avere un'opportuna inclinazione e profondità.

Infine è importante osservare che l'azione della rifrazione è legata all'altezza dell'onda: tale effetto viene intensificato al decresce dell'altezza dell'onda. Quindi, fissata una direzione di incidenza delle onde, gli angoli di *peel* dipendono dall'altezza dell'onda: le onde più grandi si svilupperanno lungo il cuneo con angoli di *peel* più grandi (più lento) rispetto alle onde di dimensione ridotta.

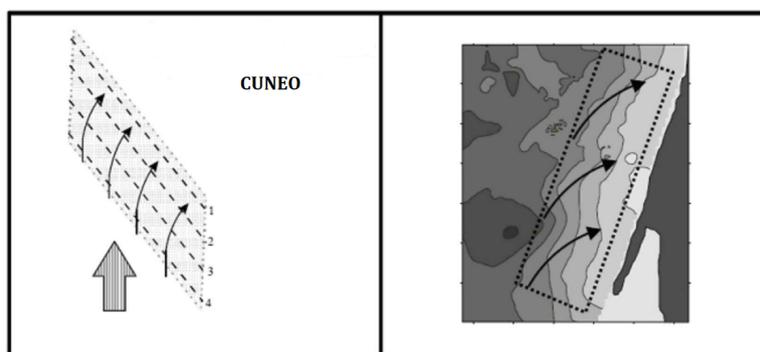


Figura 2.6: Cuneo

2.2.5 Mensola

La mensola può essere pensata come un cuneo molto ripido con una piattaforma sulla cima che si estende verso riva. Il frangimento viene innescato lungo la mensola, come nel caso del cuneo. Contrariamente a quest'ultimo, sulla mensola potrà verificarsi pochissima rifrazione prima che avvenga il frangimento poichè la pendenza delle scarpata è elevata ($> 1 : 4$). E' necessario quindi che la direzione di incidenza sia il più possibile orientata intorno alla direzione di propagazione principale come mostrato in figura 2.7.

Nonostante il il gradiente molto ripido della mensola dovrebbe portare a un frangimento di tipo *surging* (ref a Galvin, Battjes, peregrin button) grazie alla presenza della piattaforma il frangente assume una forma adatta al surf (i.e. *plunging*). La quantità d'acqua che si trova al di sopra della piattaforma agisce come "sorgente" per il trasporto dell'acqua verso il largo durante il frangimento. Tuttavia le mensole, hanno una gamma ridotta di altezze d'onda praticabili: le onde più grandi si infrangeranno oltre la mensola

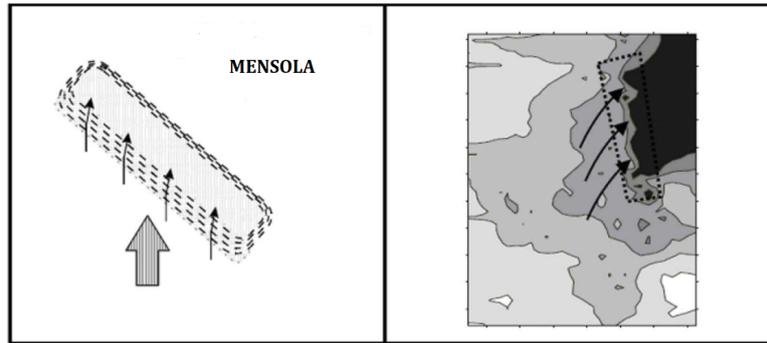


Figura 2.7: Mensola

ed inoltre l'efficacia dell'azione della mensola è suscettibile alle fluttuazione della marea.

2.2.6 Cresta

L'effetto della cresta sul frangimento è localizzato, viene interessata quindi una sezione ridotta dell'onda. Questa componente poggia sulla sommità di un cuneno o di una mensola e tipicamente è caratterizzata da isobate perpendicolari alla direzione principale di propagazione. Di conseguenza il profilo del frangente subisce un cambiamento percettibile seppur localizzato. L'onda incontra sia un gradiente di pendenza del fondale maggiore sia una deviazione verso il largo dell'orientazione delle isobate (2.8). In questa sezione

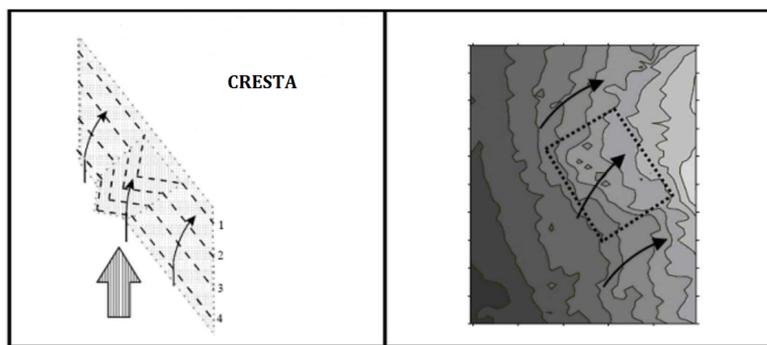


Figura 2.8: Cresta

quindi il frangimento è più "ripido" a casusa dell'aumento del gradiente del

fondale e più veloce come conseguenza della diminuzione locale dell'angolo di *peel* causato dalla deviazione verso il largo delle isobate. La cresta è simile al focus per forma, ma è allineata in modo tale da non comportare la convergenza sull'apice. Il frangimento associato a tale porzione d'onda è di tipo *plunging* estremo, noto ai surfisti come sezione a tubo e richiede un livello di abilità elevato (2.9).



Figura 2.9: Sezione tubante

2.2.7 Pinnacolo

Il pinnacolo, come la cresta, è in grado di modificare il frangimento dell'onda ma di solito ha un effetto su un'area più piccola rispetto a quella relativa alla cresta. Inoltre, mentre le creste si trovano per lo più lungo la corsa dell'onda, i pinnacoli possono facilitare la partenza del surfista nella zona di *take off*: la batimetria poco profonda del pinnacolo comporta la formazione di un picco che si infrangerà prima delle altre parti dell'onda. Questo permette al surfista di avere il tempo di alzarsi e di allinearsi all'onda che lo precede e quindi di avere maggiori possibilità di planare lungo la parete con successo. Come la cresta, il pinnacolo rende la corsa dell'onda più impegnativa e più divertente per il surfista, Entrambi quindi possono essere considerati secondari rispetto alle funzioni principali di rampa, cuneo e mensola.

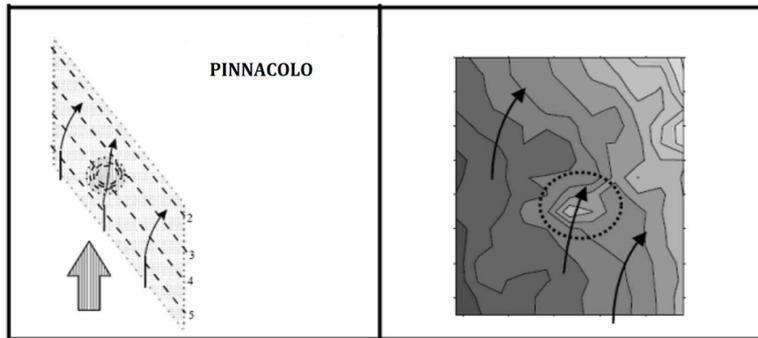


Figura 2.10: Pinnacolo

Capitolo 3

Analisi del moto ondoso: Golfo di Sturla

3.1 Introduzione

Il progetto prevede il posizionamento del reef all'interno del golfo di Sturla, situato nella parte orientale di Genova, la spiaggia all'interno del golfo rappresenta il principale affaccio sul mare dell'omonimo quartiere.

Nella figure [3.1](#) viene mostrata l'area interessata di massima, si rimanda al capitolo [5](#) per una descrizione dettagliata del sito di progetto. In questo capitolo verrà analizzato il moto ondoso locale con l'obbiettivo di individuare un set di stati, descritti in termini di H (altezza onda), Θ (direzione di propagazione), T (periodo), in grado di caratterizzare la climatologia locale del mare. La metodologia seguita fa riferimento al lavoro presentato in [\[6\]](#). Gli stati sono intesi come stazionari, e verranno estratti dal database utilizzando due diverse tecniche di classificazione, in particolare sono stati utilizzati due algoritmi: DBScan e K-Means.

3.2 Hindcast

Il database utilizzato nelle analisi è fornito dal dipartimento di Idraulica dell'Università di Genova (*DICCA*), in particolare dal gruppo MetOcean. I dati sono stati ricostruiti e convalidati per il periodo 1979 : 2019 con una risoluzione oraria, in questa sede non verrà discussa la metodologia seguita da MetOcean, per i dettagli si fa riferimento a [\[7\]](#).

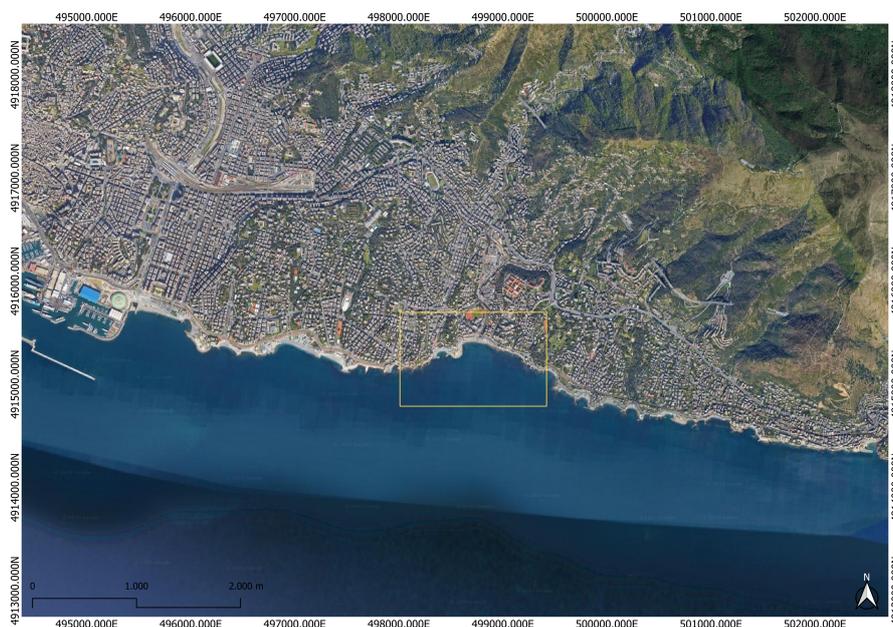


Figura 3.1: Sulla sinistra il centro urbano di Genova, il golfo di Sturla è individuato dal riquadro arancione

I dataset si compone quindi di una struttura tabulare in cui le colonne rappresentano gli osservabili fisici e a ogni riga è corrisposto un istante temporale (sequenziale).

Le variabili climatologiche sono state ricostruite per l'intera area mediterranea e organizzate su di una griglia, in 3.2 ne viene mostrata una porzione. Data la posizione e l'orientazione del golfo si è scelto di utilizzare il nodo 000230, la cui posizione è marcata in figura 3.2.

In questo lavoro si utilizzeranno le ricostruzioni temporali per il periodo compreso tra il 1979 e il 2020 dei seguenti parametri fisici:

- H_s : altezza d'onda significativa
- θ : orientazione media di propagazione
- T_m : periodo medio

Risulta quindi naturale rappresentare i dati in un spazio di tridimensionale, in cui gli assi coordinati rappresentano le variabili fisiche. La ridotta dimensionalità offre la possibilità di visualizzare i dati in maniera diretta, nelle figure 3.3 sono riportate le distribuzioni dei valori.



Figura 3.2: Punti spaziali Hindcast

3.3 Selezione degli Stati

Le informazioni disponibili si trovano in acque profonde e verranno trasferite alle acque basse utilizzando un modello di propagazione ondosa in grado di simulare i più importanti processi di trasformazione delle onde.

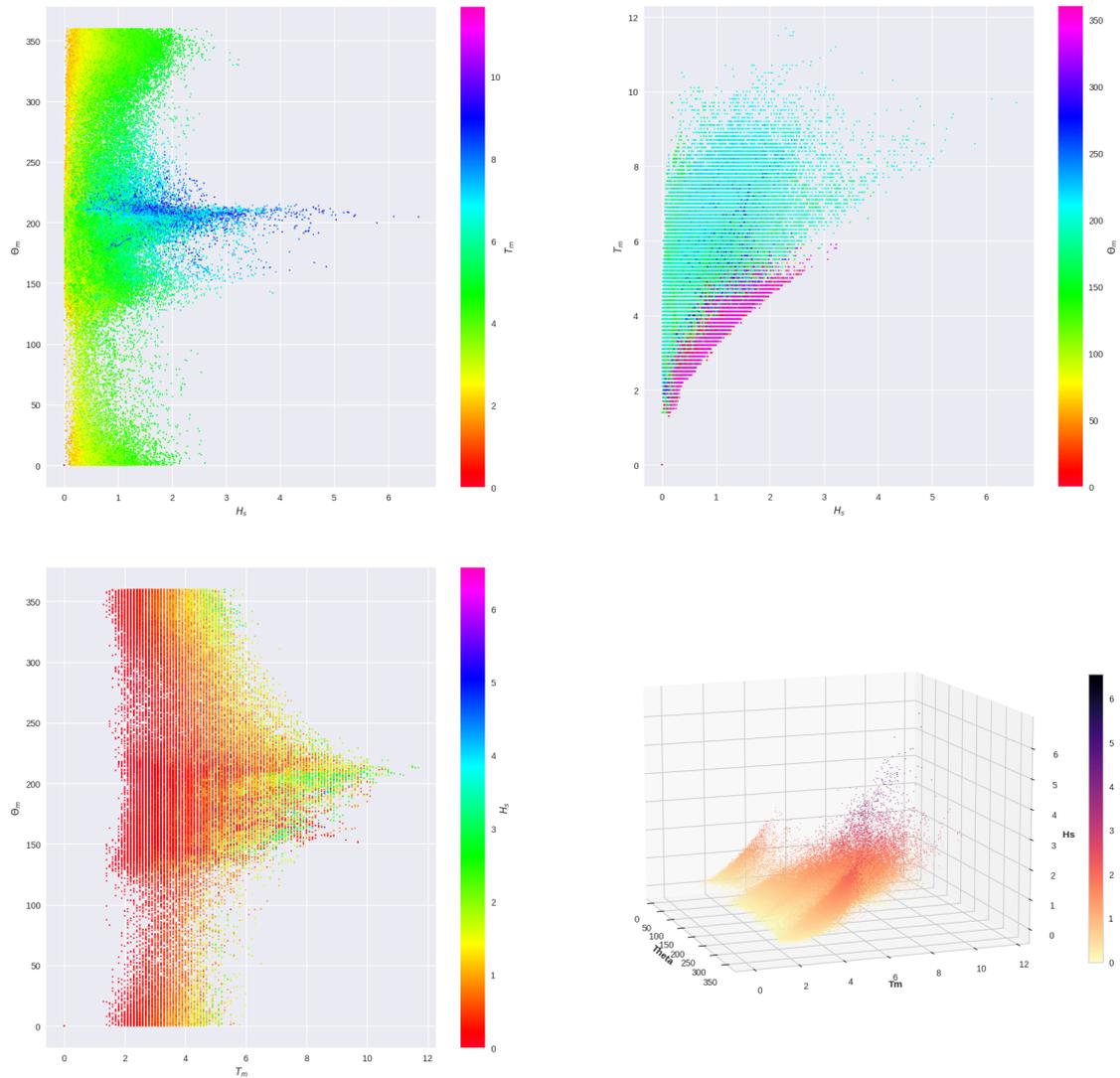


Figura 3.3: Distribuzione spaziale delle osservazioni contenute nell'*Hindcast*

L'enorme numero di stati del mare da propagare rende necessario l'impiego di tecniche di classificazione o *clustering*, in modo tale da ridurre lo sforzo computazionale. Il dataset di partenza viene partizionato in sottoinsiemi o *cluster*, sulla base di un'opportuna misura di distanza; ogni *cluster* rappresenta un gruppo di elementi simili tra loro e dissimili dagli elementi di un altro *cluster*.

Di seguito viene presentata la metodologia seguita nella fase di selezione, in

particolare sono stati analizzati i risultati prodotti implementando due diversi algoritmi di classificazione:

- **DBScan**
- **K-Means**

Le analisi sono state effettuate utilizzando le librerie disponibili in [8] in ambiente Python.

3.3.1 K-Means

KMA divide lo spazio dei dati in un certo numero di cluster m , ciascuno definito da un prototipo (i.e. centroide) e popolato dai dati per i quali il centroide è il più vicino.

Per spiegare il flusso di lavoro di K-means, si fa riferimento a una matrice di dati $X_{n,V}$. Dove V indica il numero di variabili, mentre n è il numero totale di osservazioni per ciascuna variabile. La matrice dei dati $X_{n,V}$ si costruisce come segue:

$$X_{n,V} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,V} \\ x_{n,1} & \cdots & x_{n,V} \end{bmatrix}$$

In primo luogo, $X_{n,V}$ deve essere normalizzato lungo colonne e mappato sull'intervallo $[0,1]$, in modo tale da poter raggruppare le variabili caratterizzate da diversi ordini di grandezza. Dopo aver scalato le variabili, viene selezionato un numero target di cluster m .

La procedura di classificazione parte con un'inizializzazione casuale dei centroidi $V_{m,V}^1$.

Ad ogni iterazione r , vengono identificati i dati più vicini a ciascun centroide e quest'ultimo viene ridefinito come la media dei dati corrispondenti.

Ad esempio, al passo $r + 1$, ogni vettore $x_{i,V}$ viene assegnato al gruppo j , come

$$j = \min(\|x_{i,V} - v_{j,V}^r\|, \quad j = 1, \dots, m) \quad (3.1)$$

dove $v_{j,V}^r$ sono i centroidi relativi al passo r e $\|\cdot\|$ definisce la metrica euclidea. Il centroide viene aggiornato come:

$$v_j^{r+1} = \sum_{x_i \in C_j} \frac{x_i}{n_j} \quad (3.2)$$

dove n_j è il numero di elementi che appartengono al j -esimo gruppo e C_j rappresenta il sottoinsieme dei dati appartenenti al gruppo j .

La "posizione" dei centroidi viene quindi iterativamente spostata minimizzando la distanza complessiva all'interno del *cluster* fino a quando non converge e i dati appartenenti a ogni gruppo sono stabilizzati.

3.3.2 DBScan

DBScan è una tecnica di classificazione che permette di identificare i cluster osservando la densità locale dei punti in un opportuno spazio. Seguendo questo approccio si presuppone quindi che i cluster corrispondono a regioni dense nello spazio separate da regioni con una densità inferiore di punti. I punti densamente raggruppati vengono combinati in un unico cluster. Il principale vantaggio di questo algoritmo è che non richieda che venga fissato un numero di cluster a priori come nel caso del K-Means.

I parametri richiesti sono due:

- **Epsilon** (ε): individua l'estensione spaziale del "vicinato"
- **Rho**(ρ): corrisponde alla popolazione minima richiesta del "vicinato"

Sulla base di ε e ρ un punto generico viene identificato come:

- **Centrale**: un punto nell'intorno, "vicinato" del quale ci sono almeno ρ vicini (compreso se stesso)
- **Dibordo**: un punto raggiungibile da un punto centrale ma con un numero di vicini inferiore a ρ
- **Outlier**: un punto non raggiungibile da nessun punto centrale

Il funzionamento dell'algoritmo di selezione viene descritto di seguito:

1. Selezione casuale di un punto non ancora visitato.
2. Determinazione del vicinato, utilizzando ε .
3. Se il criterio è soddisfatto, il punto viene contrassegnato come centrale. Il processo di *clustering* viene inizializzato e il punto viene contrassegnato come visitato, altrimenti viene etichettato come *outlier*.
4. Tutti i punti del vicinato del punto centrale vengono contrassegnati come appartenenti al medesimo *cluster* e la procedura descritta al punto 2 viene ripetuta per tutti i punti del vicinato.

5. Viene selezionato un nuovo punto non ancora visitato e, seguendo i passaggi precedenti, viene incluso per formare un’altro *cluster* oppure viene contrassegnato come *outlier*.
6. Il processo continua fino a quando tutti i punti sono stati visitati.

3.4 Risultati

3.4.1 K-Means

L’algoritmo di classificazione è stato implementato selezionando un numero di *cluster* pari a 550 e i risultati sono mostrati qualitativamente in figura 3.4: nel grafico a sinistra i diversi colori rappresenta i cluster mentre il grafico a destra riporta la posizione dei centroidi associati. Il numero di *cluster* è stato scelto in modo tale che sia sufficientemente grande affinché si possano osservare gli eventi meno probabili ma comunque caratterizzati da una minima ripetitività nel tempo.

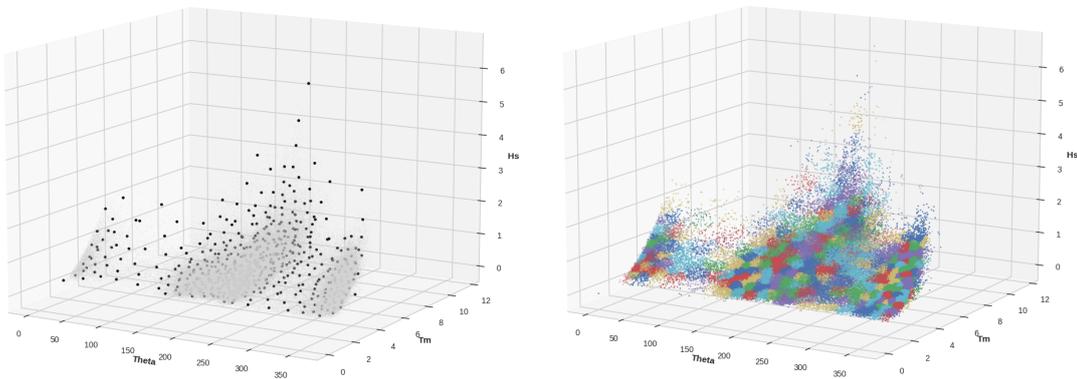


Figura 3.4: Risultati classificatore K-Means

Il grafico mostrato in figura 3.5, rappresenta i valori dei centroidi, in cui il colore è stato associato al periodo mentre lungo la direzione radiale sono riportati i valori dell’altezza d’onda. In questo grafico, per una più chiara visualizzazione, è stato imposto un valore soglia sull’altezza d’onda di 0.5 *m*. Si osserva come i centroidi associati a bassi valori di altezza dell’onda (0.5 : 1.5 *m*) siano distribuiti omogeneamente nell’intervallo 135°N e 45°N, è comunque presente una concentrazione locale dei centroidi nel quinto settore,

i.e. $180^\circ N : 225^\circ N$. Superata, invece l'altezza d'onda di $2m$ la distribuzione dei centroidi rispetto a θ risulta disomogenea, in particolare si osserva un marcato allineamento al crescere del valore di H nell'intorno di $207^\circ N$.

Sebbene per valori bassi di altezza d'onda sia meno marcata, nel grafico 3.5 vi è una netta distinzione di tonalità tra i settori NORD e i settori SUD.

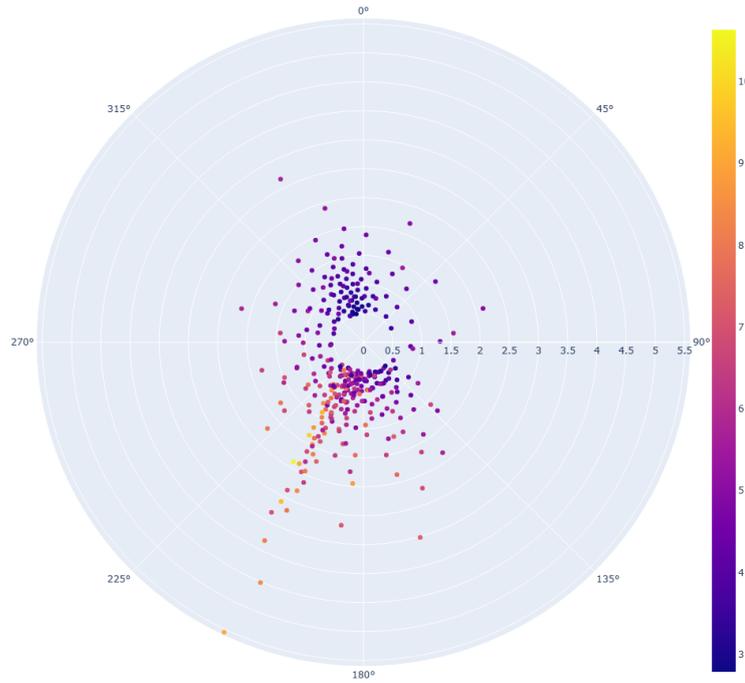


Figura 3.5: Distribuzione dei centroidi relativa a K-Means

3.4.2 DBScan

Come anticipato nel paragrafo 3.3.2, a differenza di K-Means, questa tecnica di clustering non prevede di fissare a priori il numero di *cluster*. Il criterio di selezione si basa sui parametri ε e ρ , una volta selezionato il numero di minimo di elementi che definisce il vicinato, viene calcolato la distanza ε . E' possibile trovare un valore adeguato per ε analizzando il grafico mostrato in figura 3.6. La curva descrive il numero di punti che possiedono almeno ρ primi vicini in funzione della distanza ε .

Ad esempio, se si considera una distanza prossima allo zero, ogni elemento

è idealmente un *cluster* mentre al crescere di ε si raggiungerà una soglia superata la quale tutti i punti apparterranno allo stesso *cluster*. Il punto di massima curvatura lungo la curva è stato utilizzato come candidato, nel caso presentato con $\rho = 7$ si è ottenuto $\varepsilon = 0.1126$.

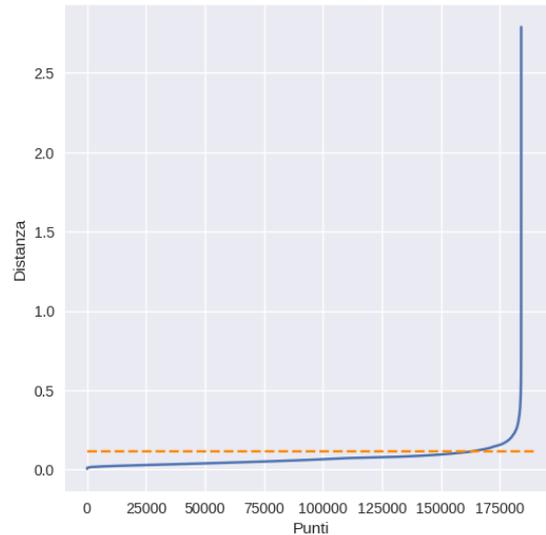


Figura 3.6

Nella figura 3.7 sono riportati risultati ottenuti, anche in questo caso i colori identificano i diversi cluster, mentre nel grafico a sinistra sono mostrati i centroidi.

Sono stati individuati 212 *cluster* e 13324 punti classificati come rumore, in figura 3.7 si vede come il numero di punti effettivamente classificati sia ridotto rispetto al dato di partenza.

In figura 3.5, si utilizza una visualizzazione grafica polare come nel caso del K-Means, anche qui sono stati filtrati i centroidi caratterizzati da altezza inferiori a i 0,5 *m*. In regime di onde basse, *i.e.* 0.5 : 1.5 *m* la distribuzione spaziale dei centroidi nei settori SUD, presenta delle analogie rispetto ai risultati di *K-Means*. Tuttavia nei settori NORD il numero dei cluster è ridotto sostanzialmente. Superati i 2 *m* di altezza dell'onda, i centroidi riprodotti da *DBScan* si concentrano lungo la direzione di 207°N : 209°N, come nel caso di K-Means. E' evidente però che la scala dei centroidi di questo ultimo sia sensibilmente maggiore: il valore massimo di *H* è pari a 5.5 *m* rispetto ai 3.5 *m* prodotti da *DBScan*.

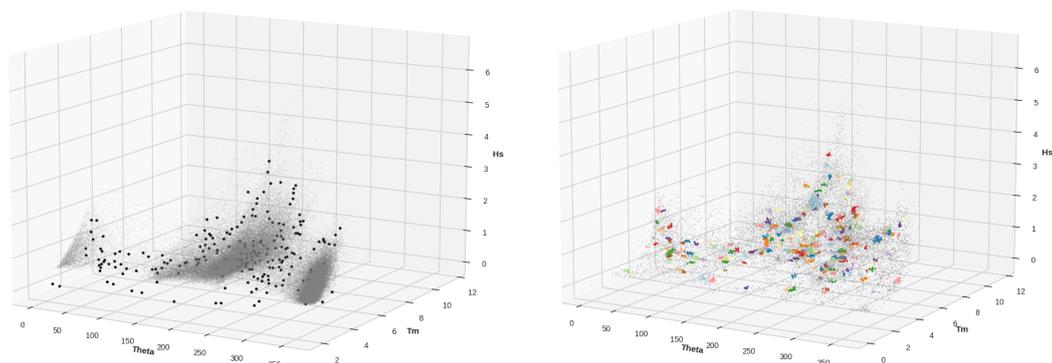


Figura 3.7: Distribuzione dei centroidi ottenuti con *DBScan*

3.5 Conclusioni

A partire dalle informazioni contenute nell'*Hindcast* è stato possibile indagare la climatologia del mare e attraverso l'utilizzo delle tecniche di classificazione si è cercato di esprimerne la variabilità.

Analizzando le distribuzioni degli stati prodotte da entrambi gli algoritmi è emersa la presenza di un trend per quanto concerne la direzione di propagazione. I centroidi tendono ad allinearsi lungo la direzione compresa tra i 207° N e i 210° N per valori di altezza d'onda crescenti a partire da 1.5 m. Lungo tale direzione si accumulano gli stati più energetici.

Il risultato non deve sorprendere, anzi trova conferma poichè è noto che le mareggiate generate dai venti di libeccio sono le più intense nel Mar Ligure. Le dimensioni che le onde possono raggiungere dipendono dalla forza del vento, dalla durata per il quale esso ha spirato e soprattutto dal *fetch*, termine usato in oceanografia per indicare la superficie di acque aperte sul quale il vento può esercitare la propria forza. Qualitativamente, tanto più quest'area è estesa tanto più energetiche saranno le onde associate. Considerata quindi la geografia del Mar Mediterraneo e la posizione del Mar Ligure risulta naturale associare ai venti che spirano da *SO* le mareggiate più energetiche.

Siccome gli stati selezionati in questa fase di analisi verranno utilizzati per forzare il modello numerico, risulta necessario sottoporre i risultati a una

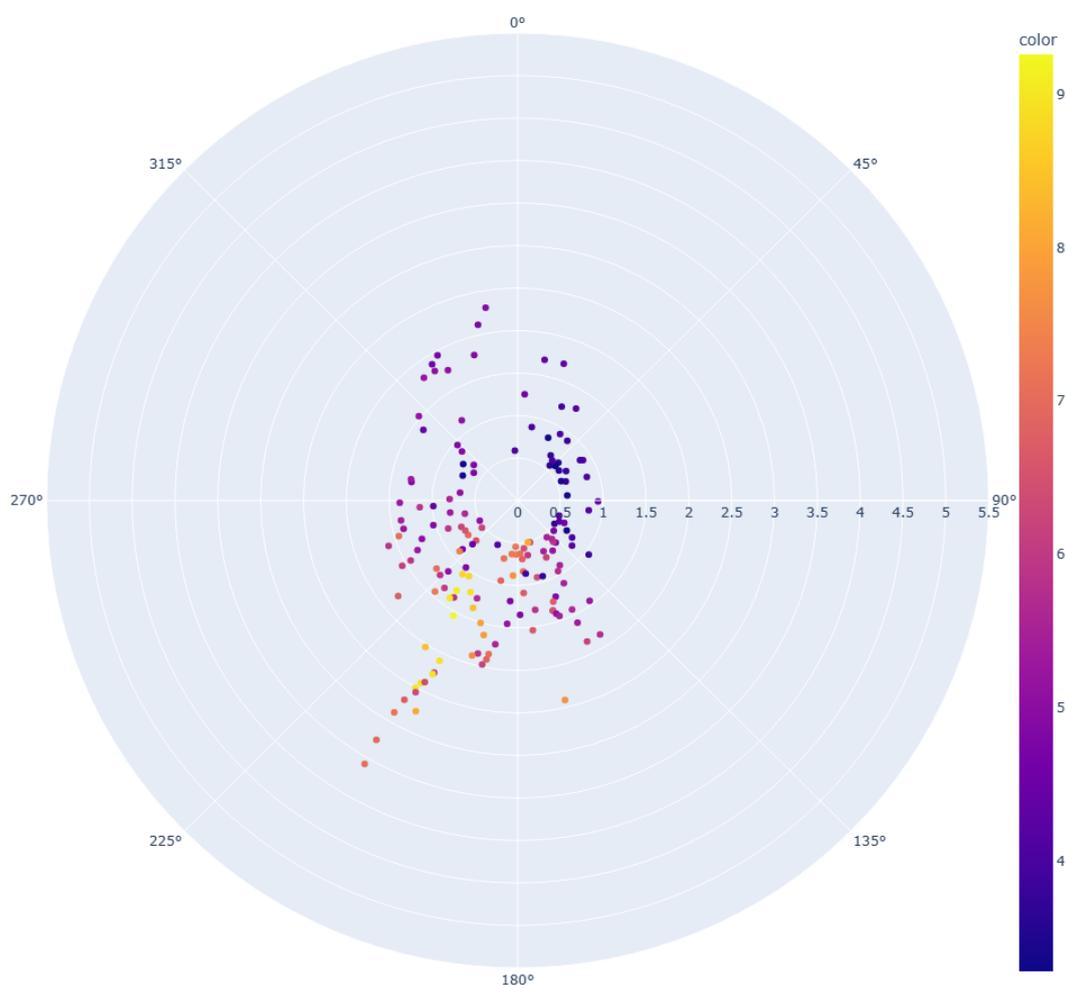


Figura 3.8: Distribuzione dei centroidi ottenuti con *DBScan*

seconda fase di selezione. Le linee guida operative seguite in questa fase sono motivate dalle seguenti argomentazioni:

- i) Gli stati associati alle direzioni dei quadranti NORD, vengono scartati poichè non sono ritenuti significativi essendo il golfo di Sturla caratterizzato da esposizione SUD dominante.
- ii) Le variazioni di orientazione tra stati diversi devono essere sufficientemente grandi, altrimenti il modello numerico non sarà in

grado di interpretare quantitativamente la differenza. Vengono quindi definite tre direzioni principali di propagazione per i quadranti a SUD, ottenute partizionando in tre settori il range di gradi compreso tra $135^\circ N$ e $225^\circ N$. E' stata scelta come soglia $225^\circ N$ poichè per angoli di incidenza maggiori l'effetto della riflessione del molo altera in maniera distruttiva la propagazione ondosa.

Si farà riferimento ai tre settori utilizzando la descrizione proposta dalla rosa dei venti, ovvero **Scirocco**, **Mezzogiorno** e **Libeccio** nonostante vi sia una differenza di gradi. Ad esempio, il vento di libeccio è associato alla direzione SO , *i.e* $225^\circ N$ invece in questa sede con libeccio si farà riferimento al range di gradi compresi tra $195^\circ N$ e $225^\circ N$.

- iii) Un discorso analogo al punto precedente è esteso ai valori di altezza d'onda, inoltre ad ogni settore verranno associati due diversi valori di altezza: una con riferimento al regime di **bassa intensità** e l'altra riferita al regime di **alta intensità**.

Gli stati che verranno utilizzati con il fine di caratterizzare la risposta idrodinamica della struttura soffolta sono riassunti nella tabella ??, in cui i pedici 1 e 2 fanno riferimento ai due regimi.

Tabella 3.1

Settore	Label	H [m]	θ [deg]	T [s]
Libeccio	L_1	2.61	203°	6.77
	L_2	4.39	200°	8.43
Mezzogiorno	M_1	1.65	186°	5.27
	M_2	3.19	186°	7.14
Scirocco	S_1	1.90	145°	5.45
	S_2	2.76	155°	6.97

Capitolo 4

Descrizione del modello

4.1 Introduzione

In ambito marittimo-costiero i modelli che trovano più larga diffusione sono i cosiddetti modelli spettrali, che essenzialmente valutano l'evoluzione dello spettro delle onde. Considerati i processi di trasformazione delle onde coinvolti in prossimità del reef e descritti nel capitolo 2 si è scelto di utilizzare un modello a risoluzione di fase.

Inoltre i risultati sperimentali ottenuti da Henriquez [9] mostrano come l'interazione tra l'onda e le correnti superficiali incida in maniera significativa sulla corsa dell'onda. I principali esempi di modelli a risoluzione di fase sono i cosiddetti modelli alla Boussinesq e i modelli non idrostatici. I primi sono i più popolari e nel corso degli ultimi tre decenni le equazioni originali di Joseph Boussinesq sono state modificate per estenderne l'applicabilità. Tradizionalmente i modelli alla Boussinesq, progettati specificatamente per la propagazione delle onde, sono i modelli più efficienti. I modelli non idrostatici necessitano di un'elevata risoluzione sulla verticale (10 ÷ 20 *layers*) per ottenere risultati simili ai modelli di Boussinesq in cui le grandezze sono mediate sulla verticale (i.e. 1 *layer*). La differenza in termini di tempo computazionale ha portato a concentrarsi sullo sviluppo di modelli di Boussinesq per la pratica dell'ingegneria costiera.

Tuttavia nel lavoro presentato da Stelling and Zijlema [10] è mostrato come sia possibile, utilizzando uno schema alle differenze finite di tipo "edge-based" sulla verticale (o meglio per costruire un'approssimazione del gradiente verticale della pressione non-idrostatico), costruire un modello non-idrostatico competitivo con i modelli di Boussinesq. Inoltre in Zijlema

and Stelling [11] viene mostrato come utilizzando uno schema numerico che conserva l'impulso,, l'effetto del frangimento dell'onda può essere catturato con precisione senza l'utilizzo di un modello separato. Questo rappresenta un vantaggio rispetto ai modelli di Boussinesq che in genere necessitano di modello separato per il processo di frangimento.

Il modello numerico che è stato scelto per gli scopi di ricerca di questa tesi è XBeach. In questo viene adottata la stessa tecnica di correzione della pressione non idrostatica per le equazioni non lineari in acque basse(NSWE) presentata da Stelling e Zijlema. Tuttavia lo schema di discretizzazione temporale implementato all'interno di XBeach è del secondo ordine contrariamente a quello del primo ordine, originariamente proposto da Stelling e Zijlema.

Nonostante seguire un approccio basato sulla media sulla verticale comporta una riduzione di accuratezza nel calcolo della dispersione delle onde, i risultati ottenuti da Smit [12] sul caso di prova di Berkoff hanno dimostrato come per onde relativamente corte la diffrazione, la rifrazione e il shoaling siano stati riprodotti in modo molto soddisfacente utilizzando un solo strato.

Inoltre il grande vantaggio di XBeach è la robustezza, e a differenza dei modelli alla Boussinesq non è necessaria quasi alcuna calibrazione. La trattazione ripercorre e riassume le informazioni contenute nel manuale in [13].

4.2 Equazioni di governo

4.2.1 Sistema di coordinate e dominio

XBeach utilizza un sistema globale di coordinate cartesiane per definire la posizione e l'orientazione del sistema di coordinate locale, mostrati in figura 4.1. Il dominio computazionale Ω è delimitato orizzontalmente da un confine rettangolare che consiste di quattro piani verticali (Fig.4.1 a sx). Verticalmente il dominio è delimitato dalla superficie libera $z = \eta(\mathbf{x}, t)$ descritta da come una funzione a valore singolo e sul fondo $z = -d(\mathbf{x}, t)$ (Fig. 4.1 a dx).

4.2.2 Equazioni di Navier-Stokes incomprimibili

I flussi a superficie libera nelle aree costiere sono governati dalle equazioni di Navier-Stokes. Per la modellazione delle onde gravitazionali in superficie

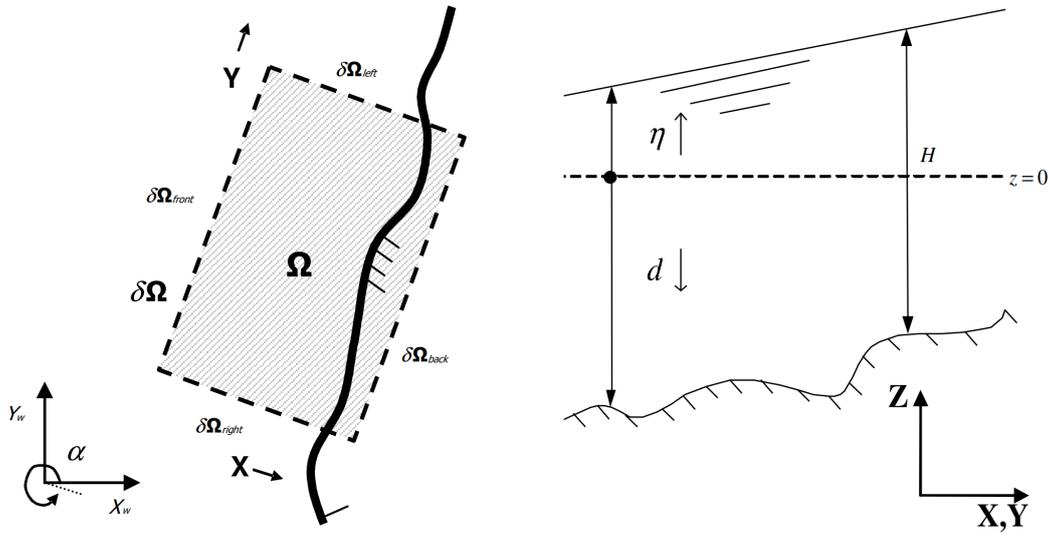


Figura 4.1

libera è sufficiente limitarsi a:

- flussi incomprimibili
- flussi omogenei (densità, temperatura, ecc)
- flussi newtoniani

Sotto queste ipotesi le equazioni di Navier-Stokes possono essere scritte in coordinate cartesiane come:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla(\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \mathbf{g} + \nabla \cdot \mathbb{T} \quad (4.1)$$

dove $\mathbf{u} = [u(\mathbf{x}, t), v(\mathbf{x}, t), w(\mathbf{x}, t)]$ è il vettore della velocità, $P(\mathbf{x}, t)$ è la pressione, $\mathbf{g} = [0, 0, -g]$ e \mathbb{T} è il tensore degli stress viscosi deviatorici. Tipicamente il contributo maggiore alla pressione in una colonna d'acqua è dovuto al peso dell'acqua sovrastante. Questa componente può essere resa esplicita nelle equazioni scomponendo la pressione in una parte idrostatica e in una idrodinamica, ovvero

$$P = \rho g(\eta - z) + \rho p + p_0 \quad (4.2)$$

dove p rappresenta il contributo dinamico della pressione normalizzato e p_0 è la pressione atmosferica considerata uniforme e stazionaria. Inoltre, le equazioni

in 4.1 vengono mediate (su una scala spaziale o temporale adeguate) e viene introdotto il tensore degli sforzi turbolento per modellare la parte irrisolta del flusso. Le sollecitazioni turbolente vengono quindi espresse attraverso le quantità mediate del flusso utilizzando l'ipotesi di Boussinesq, come

$$\tau_{ij} = \rho \nu_t \left(\frac{\partial \mathbf{u}_i}{\partial \mathbf{x}_j} + \frac{\partial \mathbf{u}_j}{\partial \mathbf{x}_i} \right) \quad (4.3)$$

dove è stata introdotta la viscosità turbolenta ν_t che è funzione delle variabili del flusso e viene valutata introducendo un opportuno modello di chiusura (e.g modello di Smagorinsky, ecc). Le equazioni in forma tensoriale assumono la forma,

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla(\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \mathbf{g} + \nabla \cdot \mathbf{T} \quad (4.4)$$

In cui \mathbf{T} rappresenta il tensore degli sforzi turbolento. L'equazione per il momento viene risolta insieme alla conservazione della massa che per un fluido incomprimibile si traduce in conservazione del volume

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (4.5)$$

Non essendoci un'equazione di evoluzione per la pressione, l'equazione di continuità costituisce un vincolo sul campo del flusso. Poichè si considerano i flussi a superficie libera è necessaria un'ulteriore equazione per la quota della superficie libera η , ottenuta integrando l'equazione di continuità sulla profondità:

$$\int_d^\zeta \nabla \cdot \mathbf{u} \, dz = \int_{-d}^\zeta \frac{\partial u}{\partial x} \, dz + \int_{-d}^\zeta \frac{\partial v}{\partial y} \, dz + w|_{z=\zeta} - w|_{z=-d} \quad (4.6)$$

Si assume che la superficie dell'acqua è composta dalle stesse particelle, in questo modo vengono esclusi fenomeni di overturning. La componente verticale della velocità di una particella situata sulla superficie coincide quindi con la derivata materiale della superficie libera, implicando una condizione cinematica per il pelo libero:

$$w(x, y, \zeta, t) = \frac{D\zeta}{Dt} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} \quad (4.7)$$

In analogia si impone una condizione sul fondo come

$$w(x, y, -d, t) = \frac{Dd}{Dt} = \frac{\partial d}{\partial t} - u \frac{\partial d}{\partial x} - v \frac{\partial d}{\partial y} \quad (4.8)$$

Siccome si assume che la scala temporale a cui varia il fondale è molto più grande di quella del moto del fluido, la derivata temporale in 4.8 viene trascurata. Sostituendo le equazioni 4.7 e 4.8 in 4.6 e utilizzando la regola di integrazione di Leibniz, l'equazione di continuità integrata assume la forma

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0 \quad (4.9)$$

In cui U e V sono le componenti di velocità mediate ottenute come

$$U = \frac{1}{H} \int_{-d}^{\zeta} u \, dz, V = \frac{1}{H} \int_{-d}^{\zeta} v \, dz \quad (4.10)$$

D'ora in avanti l'equazione 4.9 verrà chiamata equazione di continuità globale, lega tra di loro la velocità mediata e la quota del pelo libero.

4.2.3 Equazioni mediate sulla profondità

Poichè la procedura di media sulla verticale che verrà illustrata è simile per le tre componenti dell'equazione per il momento, verrà sviluppato in dettaglio unicamente il calcolo per una delle tre componenti. L'equazione di conservazione in componenti lungo l'asse x può essere scritto come,

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \underbrace{\frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z}}_{\text{termine convettivo}} = \underbrace{-\frac{\partial p}{\partial x} - g \frac{\partial \eta}{\partial x}}_{\text{termine di pressione}} + \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}}_{\text{termine turbolento}} \quad (4.11)$$

Questa equazione viene integrata sulla profondità, di seguito si considerano i contributi dei diversi termini singolarmente. Il contributo relativo alla derivata temporale risulta

$$\int_{-d}^{\eta} \frac{\partial U}{\partial t} \, dz = \frac{\partial}{\partial t} (UH) - u \frac{\partial \eta}{\partial t} \Big|_{z=\eta} + u \frac{\partial d}{\partial t} \Big|_{z=-d} \quad (4.12)$$

Il secondo e il terzo termine sono i contributi relativi al moto della superficie libera. Integrando il termine convettivo si ottiene:

$$\begin{aligned} \int_{-d}^{\eta} \left(\frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} \right) \, dz &= \frac{\partial}{\partial x} \left(HU^2 - \int_{-d}^{\eta} (u - U^2) \, dz \right) \\ - \frac{\partial}{\partial y} \left(HUV - \int_{-d}^{\eta} (v - V)(u - U) \, dz \right) &- u \left[u \frac{\partial z}{\partial x} + v \frac{\partial z}{\partial y} + w \right]_{z=-d}^{z=\eta} \end{aligned} \quad (4.13)$$

I due termini che coinvolgono gli integrali sono i contributi di dispersione dovuti alla non uniformità nella struttura verticale del fusso. L'ultimo contributo risulta dall'applicazione della regola di integrazione di Liebnez e quando si annulla quando viene combinato in 4.13. Integrando i termini di pressione, si ottiene:

$$\int_{-d}^{\eta} \left(\frac{\partial p}{\partial x} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) dz = \frac{\partial H \bar{p}}{\partial x} - \left[p \frac{\partial z}{\partial x} \right]_{z=-d}^{z=\eta} + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (4.14)$$

Dove \bar{p} è il termine di pressione dinamico, essendo la pressione atmosferica fissata a 0, il termine di bordo si elide. Infine integrando il contributo dato dagli sforzi turbolenti, si ottiene

$$\frac{1}{\rho} \int_{-d}^{\eta} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dz = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} (H \bar{\tau}_{xx}) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} (H \bar{\tau}_{yx}) + \frac{\tau_{sx}}{\rho} + \frac{\tau_{bx}}{\rho} \quad (4.15)$$

In cui $\bar{\tau}_{xx}$ e $\bar{\tau}_{xy}$ sono gli sforzi mediati sulla profondità e dove si sono inoltre introdotti gli sforzi totali in corrispondenza del fondale e della superficie libera come:

$$\begin{aligned} \tau_{sx} &= \tau_{xx} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \tau_{zx} & \text{in } z = \eta \\ \tau_{bx} &= -\tau_{zx} \frac{\partial d}{\partial x} + \tau_{zx} & \text{in } z = -d \end{aligned} \quad (4.16)$$

Infine, combinando 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15 si ottiene la forma conservativa dell'equazione per l'impulso lungo la direzione individuata dall'asse x:

$$\frac{\partial}{\partial t} (HU) + \frac{\partial}{\partial x} \left(HU^2 + \frac{1}{2} g H^2 + H \bar{p} - \frac{1}{\rho} H \bar{\tau}_{xx} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\frac{1}{\rho} H \bar{\tau}_{yx} \right) = gH \frac{\partial d}{\partial x} - p \frac{\partial d}{\partial x} + S_x \quad (4.17)$$

In cui i termini di sorgente/pozzo relativi agli sforzi in corrispondenza della superficie libera sono raggruppati in S_x . Utilizzando un'approccio analogo a quello presentato per la componente x, è possibile giungere alle espressione lungo le rimanenti componenti:

$$\frac{\partial}{\partial t} (VU) + \frac{\partial}{\partial x} \left(HUV - \frac{1}{\rho} H \bar{\tau}_{xy} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{2} g H^2 + H \bar{p} - \frac{1}{\rho} H \bar{\tau}_{yy} \right) = gH \frac{\partial d}{\partial y} - p \frac{\partial d}{\partial y} + S_y \quad (4.18)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(HW) + \frac{\partial}{\partial x}(HUW) + \frac{\partial}{\partial y}(HVV) = p_{surface} + p_{bottom} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x}(H\bar{\tau}_{xz}) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y}(H\bar{\tau}_{yz}) \quad (4.19)$$

4.2.4 Condizioni al contorno

Al fine di ottenere una soluzione unica è necessario imporre le condizioni al contorno, prescritte in termini di velocità tangenziale e normale. Sono quindi incluse oltre i quattro confini verticali, la superficie libera e il fondale.

Superficie libera e fondale

In corrispondenza del pelo libero le componenti tangenziali e normale degli sforzi sono assunte continue mentre la pressione totale è pari alla pressione atmosferica, vengono quindi trascurati gli effetti della tensione superficiale. Inoltre la pressione atmosferica è assunta uniforme e stazionaria e convenzionalmente fissata a 0. Tenuto conto di questo e ricordando la decomposizione della pressione in 4.2 si ottiene la condizione al contorno per la pressione come:

$$p(\mathbf{x}, \eta(\mathbf{x}, t)) = 0 \quad (4.20)$$

Gli sforzi tangenziali τ_{sx} e τ_{sy} sulla superficie generati dall'interazione con il vento possono essere esplicitati tramite opportune espressioni. Si fa presente che il meccanismo di generazione delle onde del vento non è incluso. Sul fondo la condizione cinematica espressa in 4.8 viene utilizzata. Le due componenti degli sforzi tangenziali sul fondale vengono specificate in funzione delle caratteristiche medie del flusso come:

$$\tau_{bx} = C_f \rho U |U|, \quad \tau_{by} = C_f \rho V |V| \quad (4.21)$$

in cui si è introdotto il coefficiente di attrito adimensionato C_f

Limiti aperti

Sui bordi posizionati in mare aperto e sulla costa si deve imporre la componente normale della velocità, mentre i gradienti delle componenti di velocità tangenziali sono considerati nulli.

La velocità normale viene prescritta utilizzando la sovrapposizione delle

onde corte e lunghe in ingresso (conviene magari guardare due robe in più sulla condizione al contorno che vado ad utilizzare così da descrivere quella nel dettaglio senza stare a descrivere tutte le altre)

4.3 Frangimento

Durante il fenomeno di frangimento delle onde, la superficie libera che descrive l'interfaccia tra l'acqua e l'aria, risulta difficile da definire poiché sono coinvolti fenomeni di miscelamento tra le due fasi. Questo è il motivo principale per cui descrivere con precisione il processo di frangimento è molto difficile. Inoltre, fenomeni quali il capovolgimento contribuiscono ad aumentare la complessità delle forme assunte dal pelo libero.

Nell'ambito dei modelli non idrostatici, tipicamente la posizione del pelo libero viene valutata come una funzione a valore singolo del piano orizzontale. Tale descrizione non significa strettamente che il processo di frangimento non possa essere descritto in dettaglio. Ci si riferisce al frangimento come un processo di sotto-griglia, nei termini in cui si permette alle onde di irripidirsi fino a quando il fronte è quasi verticale, ma non viene modellato il processo dettagliato di frangimento (capovolgimento, miscelamento, ribaltamento). Questo approccio è stato applicato con successo, oltre a XBeach, all'interno di altri modelli non idrostatici (e.g.[14]) basati sul sistema di equazioni NSW. In questi modelli, per riprodurre l'evoluzione dell'onda durante il frangimento si sfrutta le analogie con la formazione di una "bore". Apparentemente, il processo di frangimento stabilizza la forma dell'onda in un fronte turbolento pressoché verticale (Peregrine and Svendsen,1978). Ciò significa che durante il frangimento si sviluppa un'onda lunga grazie alla quale massa e momento si conservano. Il tasso a cui l'energia viene dissipata è comparabile al caso di una "bore" di altezza simile.

Nella regione prossima alla zona di frangimento (zona di "surf"), quando l'onda è ancora ripida, sono importanti sia la dispersione in frequenza che gli effetti di non linearità. Se da una parte gli effetti non lineari tendono a rendere più ripida l'onda, dall'altra i processi di dispersione tendono a contrastare. Poiché nelle equazioni NSW non è presente il processo di dispersione viene a mancare l'effetto di bilanciamento che comporta quindi un frangimento del fronte prematuro.

I modelli non idrostatici tuttavia non presentano questo problema, poiché includono i fenomeni di dispersione e sono quindi applicabili nella regione

che precede il frangimento. Inoltre, siccome si riducono alle equazioni alle NSW, possono essere utilizzati anche dopo il frangimento. Nel lavoro [15] *Zijlema e Stelling* viene mostrato come il loro modello non idrostatico con questo approccio è in grado di prevedere con precisione la posizione del frangimento. La caratteristica interessante è che non vi sono parametri esterni che indichino al modello quando il frangimento debba essere avviato.

4.4 Miscelamento Turbolento

Nella zona di *surf* il frangimento delle onde comporta la generazione di grandi quantità di turbolenza. Per tenere conto del trasferimento di momento dovuto alle scale non risolte, viene utilizzato un modello di sottogriglia di Smagorinsky. ([16]) In questo contesto gli sforzi di sotto griglia sono formulati come

$$\tau_{ij} = \nu_t \left(\frac{\partial \mathbf{u}_i}{\partial \mathbf{x}_j} + \frac{\partial \mathbf{u}_j}{\partial \mathbf{x}_i} \right) \quad (4.22)$$

dove τ_{ij} rappresenta gli sforzi e ν_t la viscosità degli *eddy* e viene calcolata sulla base delle caratteristiche risolte del flusso come

$$\nu_t = (C_s \Delta_s)^2 \sqrt{2 \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (S_{ij} S_{ij}), \quad \text{dove } S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \mathbf{u}_i}{\partial \mathbf{x}_j} + \frac{\partial \mathbf{u}_j}{\partial \mathbf{x}_i} \right)} \quad (4.23)$$

In cui C_s è la costante di Smagorinsky e Δ_s è la dimensione caratteristica del più piccolo vortice risolvibile che dipende dalla risoluzione di griglia. Formulato nel modello come

$$\Delta_s = \sqrt{\Delta x \Delta y} \quad (4.24)$$

Poiché il valore della viscosità dei vortici dipende dai gradienti del campo di velocità, il modello di sottogriglia di Smagorinsky, produce un aumento della dissipazione minimo nelle regioni in cui il flusso è regolare.

Capitolo 5

Sito di progetto

Com'è stato anticipato nel capitolo 3, il progetto prevede la posa della struttura all'interno del golfo di Sturla. La spiaggia che abbraccia il golfo, rappresenta il principale affaccio sul mare dell'omonimo quartiere. In figura 5.1 si ha una visione globale della spiaggia: la porzione del golfo interessata dalla struttura è evidenziata in arancione mentre in rosso sono indicate le posizioni delle attività commerciali. E' naturale osservare che le attività sono potenzialmente a rischio data la vicinanza alla linea di riva. Negli anni, a causa di eventi meteo-marini intensi, il Golfo ha subito forti fenomeni erosivi. Le potenti onde hanno eroso le infrastrutture costiere, causando continui danni e riducendo l'arenile. Questi eventi hanno provocato ingenti danni alle strutture presenti lungo la costa.

5.1 Batimetria ed emerso

Ho effettuato molteplici sopralluoghi nel sito di progetto, situato nel golfo di Sturla, in un primo momento per farmi un'idea concreta della topografia del golfo. In un secondo momento poichè il modello digitale di elevazione (DTM) fornito dalla regione Liguria [17], presentava delle incongruenze relative alle zone prossime alla spiaggia.

Aree la cui elevazione diventa determinante se si vogliono investigare i fenomeni di inondazioni causate dagli eventi di alta intensità del moto ondoso.

In seguito a ripetuti sopralluoghi sul sito di progetto, è stato possibile definire la batimetria e le quote dell'emerso. Il modello dell'emerso è stato lievemente modificato poichè si sono osservate delle incongruenze con la reale topografia, in particolare nelle zone prossime alla spiaggia. Aree la cui elevazione diventa determinante se si vogliono investigare i fenomeni di



Figura 5.1: Veduta aerea spiaggia della spiaggia di Sturla

inondazioni causate dagli eventi di alta intensità del moto ondoso.

I dati batimetrici sono stati ottenuti attraverso l'utilizzo di un sonar portatile di modeste dimensioni; il *database* fornito dalla Regione non presentava rilevamenti all'interno del golfo e in prossimità della spiaggia. I rilevamenti così ottenuti sono stati successivamente depurati dagli errori strumentali dovuti all'oscillazione e sono stati integrati ai dati forniti dalla Marina, riferiti alla porzione al largo.

La batimetria e il modello dell'emerso sono stati combinati, in figura 5.2 sono mostrate le isolinee fino alla quota di 2 m s.l.m.

In acque intermedie e in acque basse, il fenomeno della rifrazione, causato dalle variazioni di celerità lungo i fronti, agisce modificando la direzione di propagazione delle onde. Data la batimetria ci si aspetta quindi un allineamento dei fronti all'interno del golfo, in figura 5.3 è mostrato lo specchio d'acqua interno. La presenza del molo e la conseguente variazione delle isobate in fronte ad esso potrebbe influire negativamente sulla "qualità" delle onde in ingresso, causando una considerevole dissipazione di energia. D'altra parte però, se si considera come direzioni di propagazioni quelle associate al quadrante di Libeccio, la presenza del molo potrebbe agire come filtro passa basso, e quindi contribuire positivamente sulla "qualità" delle onde all'interno del golfo.

Le pendenze del fondale sono state valutate considerando le ortogonali alle isobate a partire da metà spiaggia fino al raggiungimento della isolinea 9.

Qualitativamente, dai 3 ai 5 metri di profondità vi è una pendenza media di circa 1:30, mentre dall'isobata 5 all'isobata 7 è di circa 1:40. Nell'ultimo tratto le isolinee sono meno uniformi, ma comunque si presenta una pendenza di circa 1:50.

Ai piedi della spiaggia è presente un forte gradiente, spostandoci di circa 12 metri dalla linea di riva ci si trova a una profondità di 3 metri.

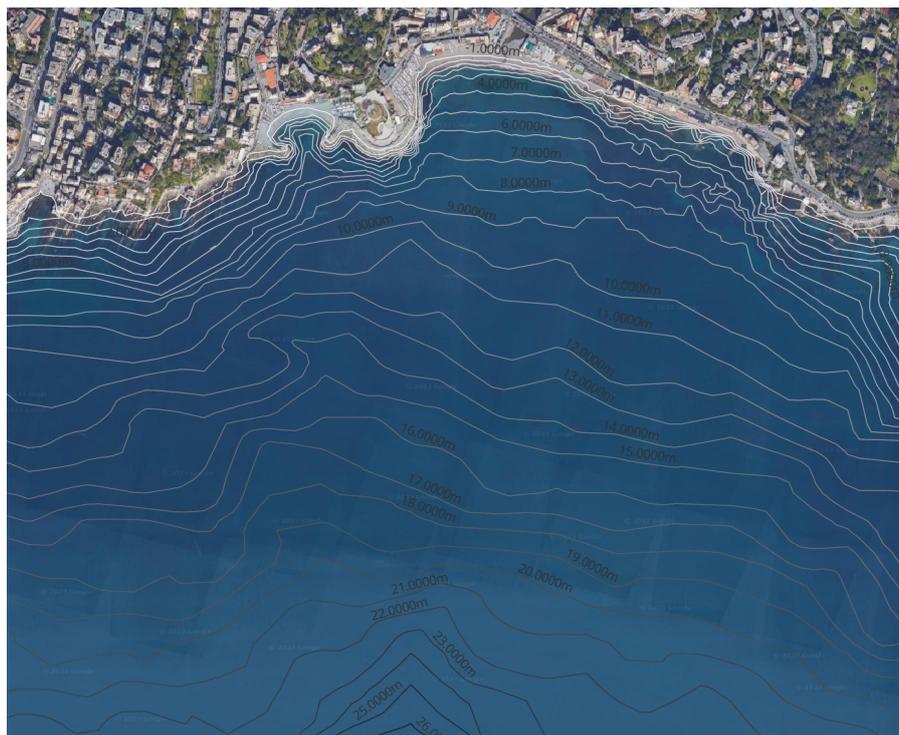


Figura 5.2: Isolinee

5.2 Obiettivi progettuali

Le analisi effettuate nel capitolo 3 hanno portato all'identificazione di sei stati principali che caratterizzano la climatologia locale del mare. Tuttavia nella fase di ottimizzazione idrodinamica, si svilupperà una geometria con l'intenzione di favorire le direzioni di propagazioni associate al settore di Libeccio (S:SSW). Inoltre, attraverso l'analisi della risposta idrodinamica in assenza della struttura si avrà la possibilità di investigare in dettaglio l'orientazione dei fronti in ingresso.



Figura 5.3: Isolinee

Geometricamente la struttura può essere ricondotta a una forma pseudo-triangolare caratterizzata quindi da un'asse di simmetria attorno al quale si sviluppato i cosiddetti "bracci". Il carattere simmetrico è motivato dalla possibilità di ottenere nel migliore dei casi due pareti praticabili per ogni onda. Questa tipologia di *spot* è conosciuto dai surfisti come *A-Frame*, in figura 5.4 si può vedere un esempio.

Secondo la classificazione delle componenti funzionali di un *surf reef* presentata nel capitolo 2, si è scelta una configurazione Rampa-Focus-Mensola. La batimetria naturale viene utilizzata come RAMPA, l'effetto di focalizzazione inizia in corrispondenza della zona più esterna della struttura mentre il frangimento avviene lungo la mensola che viene corrisposta ai bracci della geometria proposta. In figura 5.5 è mostrata la modifica delle isobate all'interno del golfo come conseguenza dell'installazione della struttura.

Siccome si vuole favorire la pratica ai principianti/intermedi piuttosto che agli utenti più esperti, sulla base delle considerazioni riportate nel capitolo 2, si pongono come parametri d'onda *target* i seguenti valori:

- $45^\circ < \alpha < 65^\circ$



Figura 5.4: Una cosiddetta onda *A-frame*, le pareti praticabili verso destra e verso sinistra

- $0.4 < \xi_b < 1.9$
- $0.5\text{m} < \mathbf{H} < 2.5\text{m}$

(Infine si vuole dare una valutazione di protezione sulla base dei livelli di *run-up* e sulla base delle correnti indotte, verranno quindi valutati in assenza e in presenza della struttura.)

5.3 Set-up modello

5.3.1 Dominio computazionale

In figura 5.6 viene visualizzata l'estensione spaziale del dominio computazionale considerato nell'analisi, si sono posti limiti laterali sufficientemente distanti dalla zona di interesse affinché non risenta delle condizioni a contorno imposte. La griglia di calcolo utilizzata è di tipo staggered a passo variabile, in figura 5.7 si può apprezzare l'infittimento locale all'interno del golfo, in cui risoluzione di griglia è di circa 3 metri confronto ai 10 metri nella zone estremali.

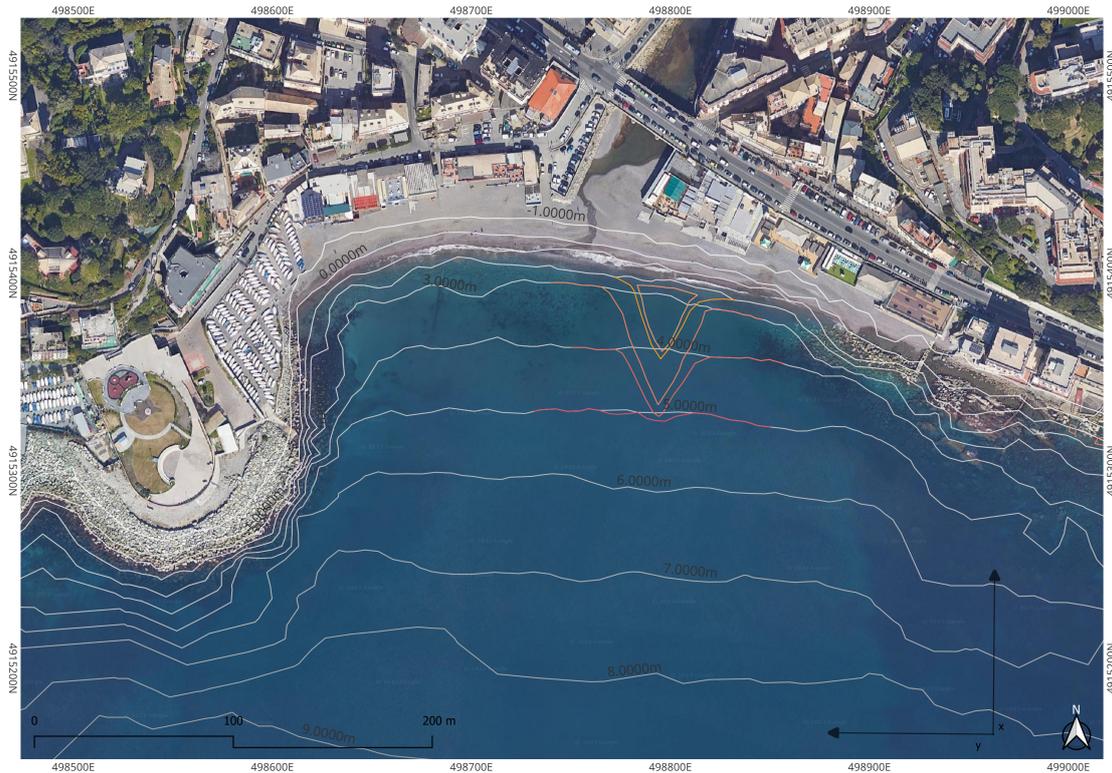


Figura 5.5: Isobate reef

Si fa notare che per motivi di compatibilità di orientazione con il modello numerico il sistema locale di riferimento viene mostrato in figura 5.6.

5.3.2 Condizioni al contorno

La condizione al contorno sul margine esterno viene prescritta tramite lo spettro JONSWAP [18], verrà generato parametricamente in termini di:

- H_m [m]: altezza d'onda significativa
- $\gamma_{j\text{sp}}$ [-]: fattore di potenziamento del picco (*peak enhancement factor*)
- s [-]: coefficiente di diffusione direzionale
- T_p [s]: periodo di picco
- f_{nyq} [s^{-1}]: frequenza massima utilizzata per creare lo spettro



Figura 5.6: Estensione del dominio computazionale

- θ_m [°]: direzione principale di propagazione

Per i valori di H_m , T_p e θ_m si utilizzano gli stati descritti nel capitolo 3, mentre i restanti parametri non verranno modificati da stato a stato e sono fissati a:

- $\gamma_{jsp} = 2.2$
- $s = 19$
- $f_{nyq} = 0.3$

Tradizionalmente il fattore γ_{jsp} è fissato a 3.3, tuttavia va ricordato che i parametri di riferimento dello spettro di JONSWAP si riferiscono alle condizioni tipiche del Mare del Nord, in cui le onde sono caratterizzate da periodi lunghi. Contrariamente, uno spettro tipico delle onde del Mar Mediterraneo si presenta meno "piccato", ovvero in cui la concentrazione di frequenze attorno alla frequenza di picco è meno marcata. Tenuto conto di questo il valore di γ_{jsp} è stato fissato a 2.2.

Sui margini laterali, perpendicolari alla costa, è imposta una condizione di Neumann secondo cui localmente non vi è alcuna variazione della quota del

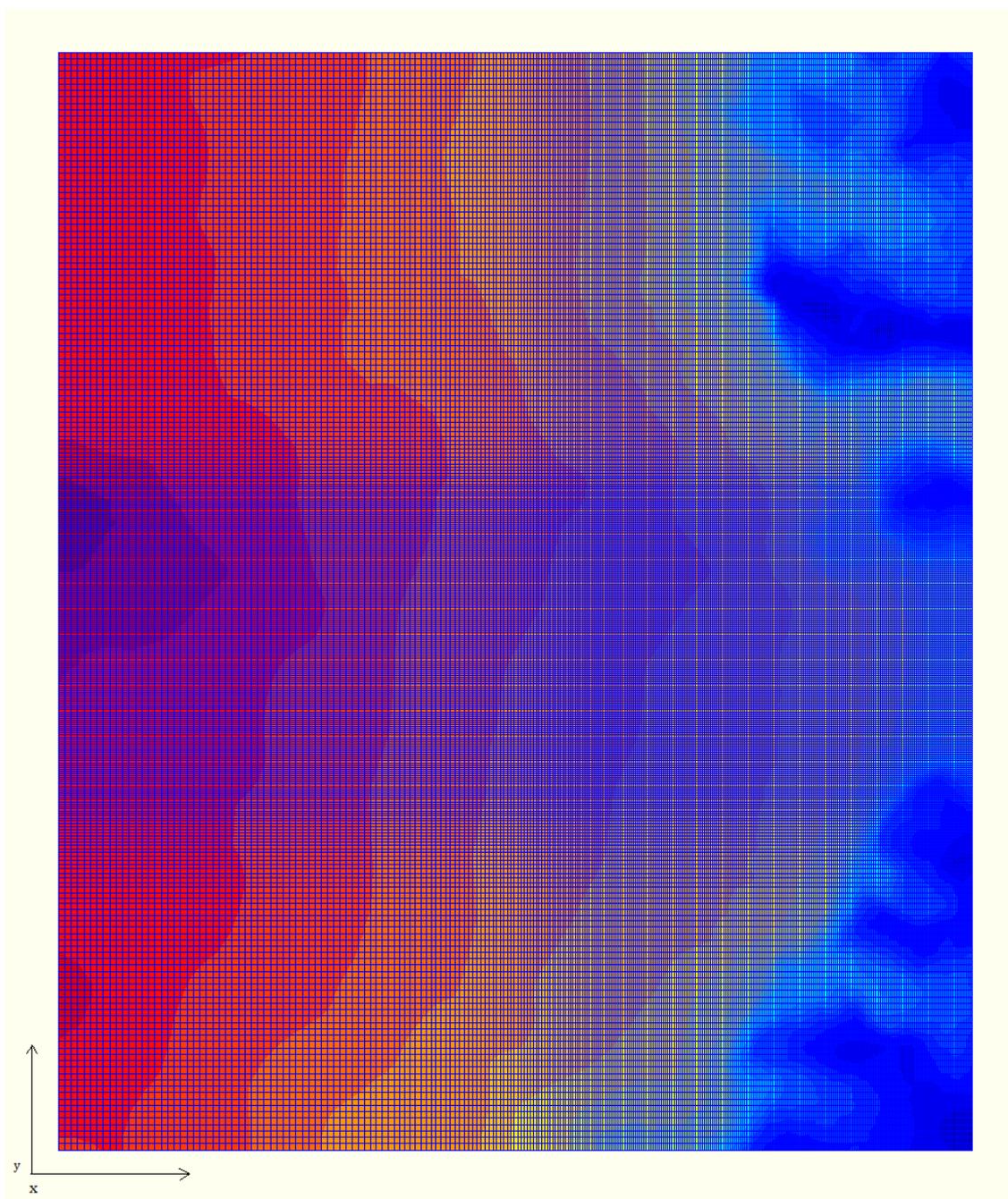


Figura 5.7: Griglia di calcolo

pelo libero e nelle velocità. (spiegare front and back condizioni al contorno sul flusso)

L'intervallo di tempo simulato è stato impostato a 700 s scelto inizialmente sulla base della celerità media delle onde in relazione all'estensione spaziale del dominio, e in secondo luogo esteso, affinché il sistema "mare" si possa considerare statisticamente stazionario.

In seguito quando si parlerà di grandezza mediata si farà quindi riferimento alla media temporale sul suddetto intervallo di osservazione.

Capitolo 6

Risultati numerici

6.1 Risposta idrodinamica senza opera

6.1.1 Correnti superficiali indotte

Le correnti superficiali indotte dal frangimento sono state mediate e sono state valutate per le tre diverse direzioni di propagazione e per ognuna di esse si è poi valutato l'effetto dato dall'aumento di intensità del moto ondoso. In figura 6.1 sono mostrate le grandezze valutate nei centri cella e mediate sul periodo di osservazione relative agli stati $L1$ e $L2$, l'aumento di intensità relativo allo stato di mare $L2$ comporta un aumento dell'intensità delle correnti mentre le direzioni delle correnti rimangono sostanzialmente inalterate. La zona di maggiore intensità è situata in prossimità del molo, dove la velocità è di circa 2 m/s diretta perpendicolarmente alla spiaggia. Ci si aspetta un comportamento di questo tipo poichè il molo funge da barriera fisica, ostacolando il naturale percorso dell'acqua. La direzione di propagazione dei fronti per gli stati $L1$ e $L2$ è di $207^\circ N$, è individuata dalla freccia in figura.

Certamente la direzione effettiva di propagazione risulterà deviata da quella imposta sul margine esterno, per gli effetti di rifrazione e diffrazione, ma è evidente come per questa direzione principale il molo rappresenti la prima struttura solida che i fronti incontrano. La forte pendenza in prossimità del molo innesca il frangimento e il conseguente trasporto di massa netto in direzione perpendicolare alla spiaggia.

Tale corrente viene successivamente ostacolata dalla presenza della riva che deflette la corrente in direzione parallela ad essa, per poi cambiare di orientazione al progressivo allontanamento dal molo. Raggiunto il marginale

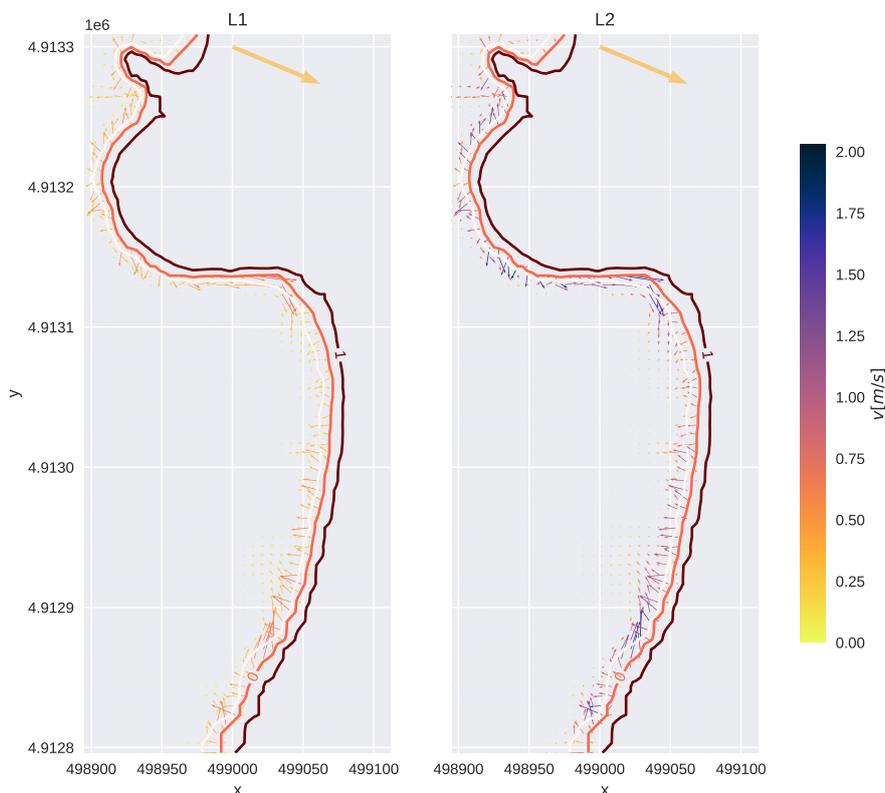


Figura 6.1: Correnti superficiali medie indotte per gli stati di mare L1 e L2

estremale della spiaggia dove la corrente è di verso opposto ed è caratterizzata da un massimo locale di intensità.

Il comportamento della corrente è in accordo a quanto ci si aspetta, considerata la conformazione del golfo mostrata nella figura 5.3.

Nelle figure 6.2 e 6.3 sono riportate le correnti superficiali per gli stati **Mezzogiorno** e **Scirocco**. Globalmente le considerazioni fatte per gli stati L1 e L2 possono essere estese agli stati M1 e M2. Tuttavia in questo ultimo non si presenta un netto allineamento lungo la spiaggia delle direzioni di trasporto come nel caso mostrato in precedenza.

In figura 6.3 è mostrato l'andamento delle correnti nel caso dello **Scirocco**, in cui si manifestano sostanziali differenze. Il frangimento delle onde nella zona inferiore della spiaggia, genererà un trasporto netto in direzione parallela alla spiaggia considerata la direzione di incidenza dei fronti. Ma d'altra parte i fronti non ancora franti avranno modo di attraversare il golfo

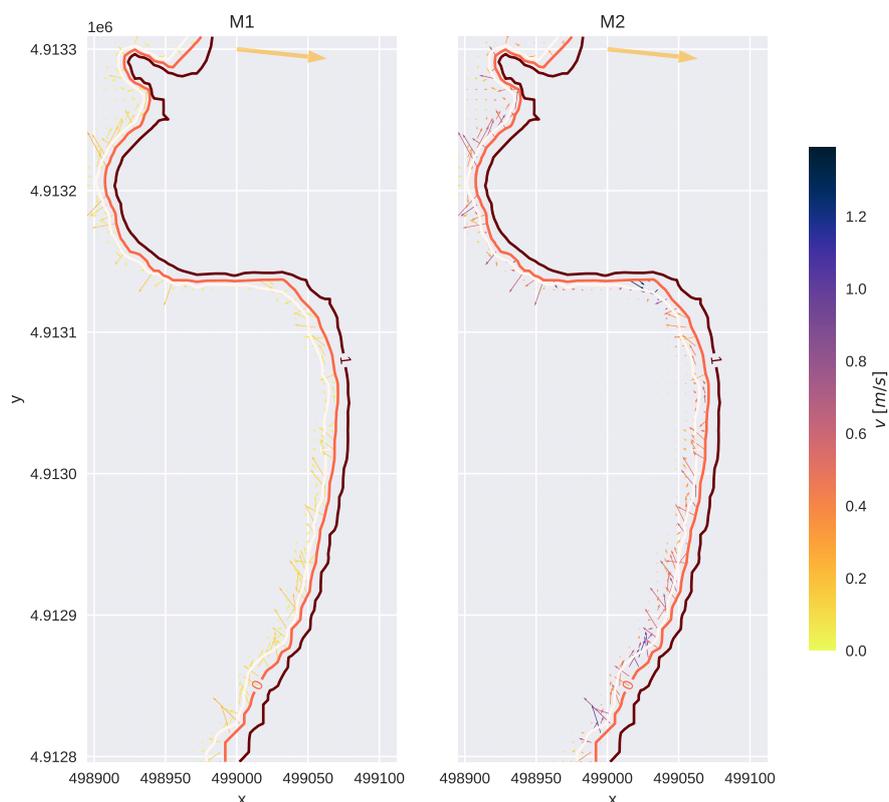


Figura 6.2: Correnti superficiali medie indotte per gli stati di mare M1 e M2

e propagarsi fino a raggiungimento del molo, che funge da "spartiacque". La corrente così formata procederà in direzione parallela prima al fianco del molo e poi alla linea di riva fino ad incontrarsi con la corrente proveniente dalla zona inferiore. I due flussi si incontrano dando origine a una cella di ricircolo approssimativamente localizzata nel primo terzo della spiaggia a partire dal molo.

Si osservano la presenza di celle di ricircolo anche per gli stati $L1$ e $L2$ tuttavia vi è una minore localizzazione in quanto la direzione della corrente è omogenea lungo la spiaggia.

6.1.2 Quota pelo libero

Nel seguito verrà discussa la propagazione del moto ondoso, grazie alla disponibilità dei dati relativi all'elevazione del pelo libero. I dati sono

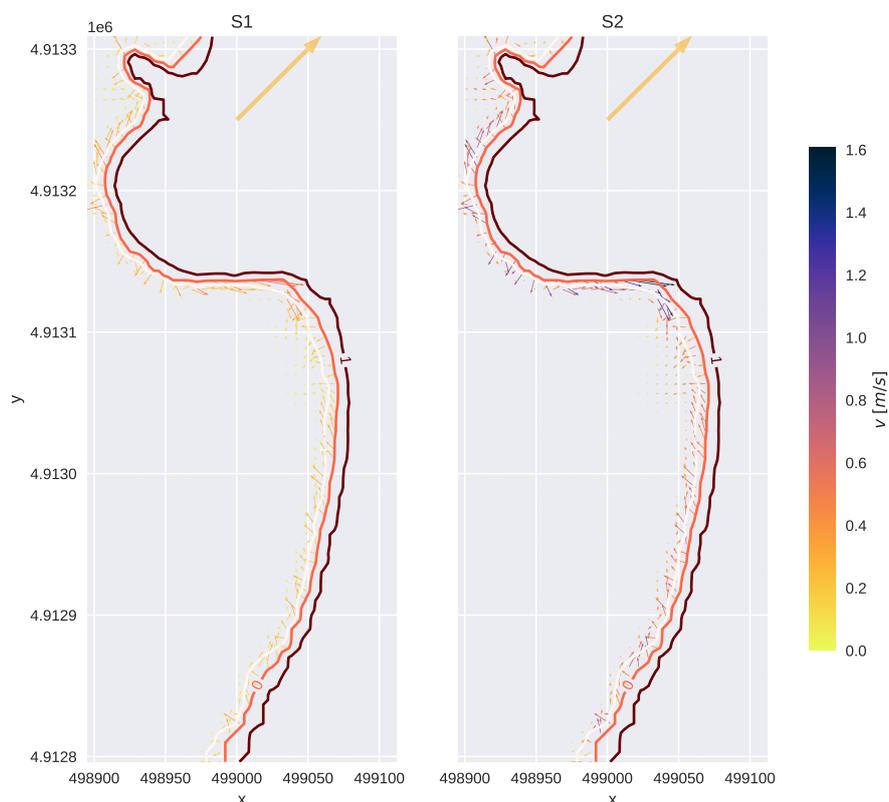


Figura 6.3: Correnti superficiali medie indotte per gli stati di mare S1 e S2

disponibili nei centri cella ed è stata scelta una visualizzazione bidimensionale per semplicità grafica. In particolare, l'obiettivo in questa fase di analisi è capire come la direzione dei fronti viene deviata in conseguenza dei fenomeni di trasformismo in prossimità della costa. Le informazioni sono mostrate per un dato istante di tempo e per necessità di compattezza, si è scelto di mostrare a titolo di esempio un solo istante significativo per ogni stato. La selezione degli istanti è frutto di un'analisi preliminare in cui è stata osservata la propagazione dei fronti all'interno della finestra temporale simulata. La scelta degli istanti temporali chiaramente non è univoca.

In figura 6.4 si fa riferimento allo stato $L1$, in cui si osserva come globalmente la direzione di propagazione dei fronti rimanga inalterata. Tuttavia si osserva come la maggior deflessione dei fronti si manifesti nella zona a monte del molo.

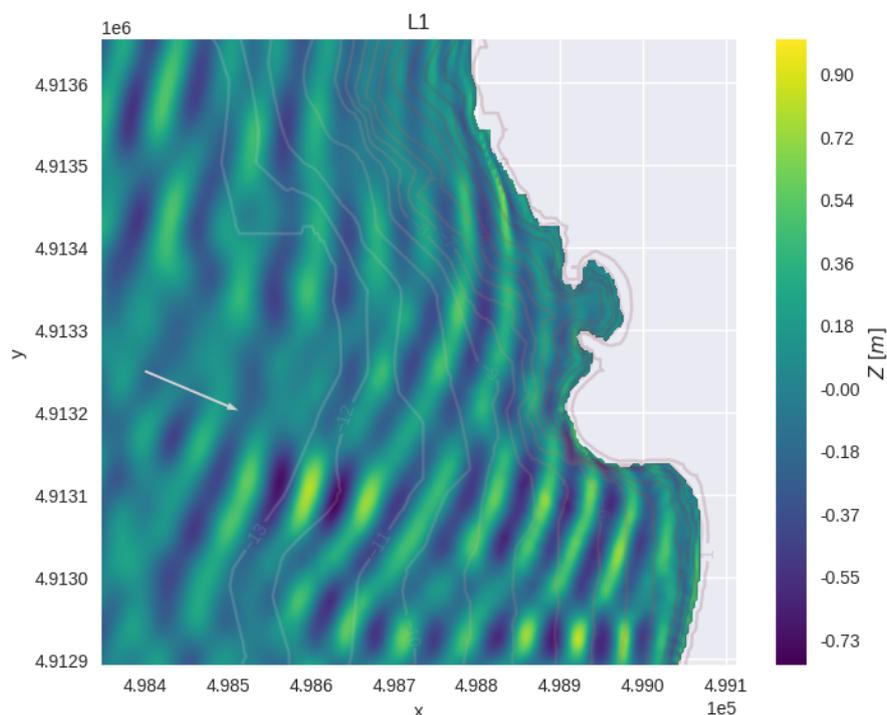


Figura 6.4: Elevazione della superficie libera stato L1, la freccia indica la direzione propagazione imposta sul margine a largo

Fisicamente, ci si aspetta un comportamento di questo tipo come conseguenza della rifrazione. Si ricorda la distribuzione delle isobate complete mostrata in figura 5.2 da questa si deduce come l'effetto sia più marcato rispetto alla zona a valle del molo. In primis considerato la direzione di propagazione primaria, l'effetto della variazione di pendenza delle isobate a monte si farà sentire prima. Inoltre bisogna considerare che le isobate a monte variano gradualmente e sono omogenee per un tratto di circa 500 m di lunghezza. All'interno del golfo invece, ci si aspettava un allineamento maggiore dei fronti rispetto alle isobate, tuttavia è necessario considerare che la pendenza e la variazione delle isobate si manifesta su intervallo spaziale ampio. La direzione di propagazione nello specchio interno risulta comunque deviata, in particolare vi è una maggiore deviazione all'avvicinarsi della costa. In quest'area risulta difficile dare una valutazione precisa sulla causa principale di tale deviazione, o meglio si deve considerare che seppur in maniera ridotta, la presenza del molo

innesca il processo di diffrazione che si va quindi a combinare con il fenomeno della rifrazione.

In figura 6.5 sono riportati i risultati ottenuti per gli stati $M1$ e $S1$, in cui è evidente la differenza di intensità data dalla diversa tonalità. Si ritiene in questo senso che i principali meccanismi di trasformismo non si manifestino in maniera marcata come conseguenza diretta della ridotta oscillazione della superficie libera e della direzione di propagazione imposta. Nella medesima figura è riportato lo stato $S1$, in cui si percepisce l'effettiva deviazione dei fronti relativi allo specchio interno. In questo caso, come conseguenza della rifrazione e della direzione di propagazione i fronti risultano sostanzialmente allineati alle isobate interne.

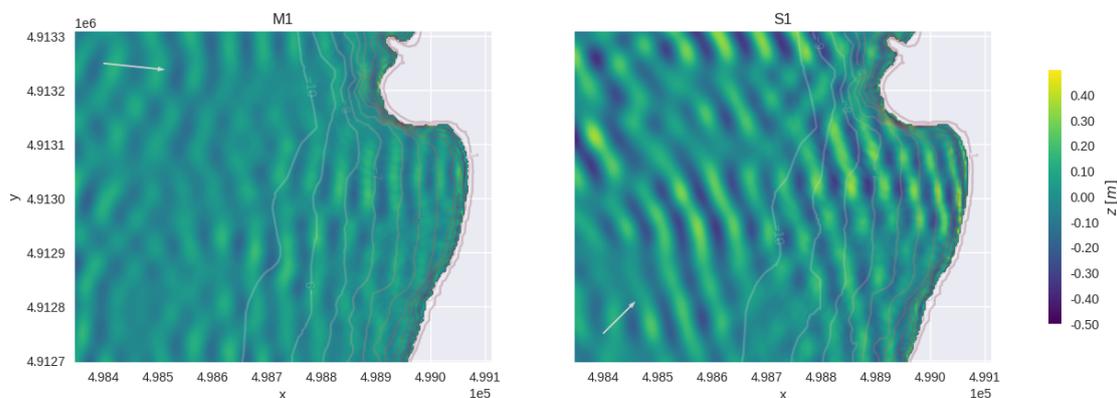


Figura 6.5: Elevazione della superficie libera stato $M1$ e $S1$, la freccia indica la direzione propagazione imposta sul margine a largo

Sono stati analizzati gli stati caratterizzati da un'intensità maggiore, il grafico relativo allo stato $L2$ è mostrato separatamente come sopra poiché la differente scala dei valori non permette una chiara visualizzazione. In figura 6.6 si vede chiaramente l'incremento considerevole di intensità confronto allo stato $L1$ tradotto in termini di ampiezza di oscillazione della superficie libera: si è passati da un'ampiezza di 1.6:1.8 metri a 2.9:3.4 metri. In questo caso si osserva come le creste si presentino in ingresso con una maggiore curvatura rispetto allo stato $L1$ risultando quindi maggiormente allineate alle isobate interne. Un comportamento analogo si presenta anche analizzando la propagazione dei fronti dello stato $S2$, in cui vi è un maggior allineamento rispetto alle isobate. Sostanzialmente l'incremento di intensità accentua gli effetti di rifrazione e diffrazione delle onde incidenti. In figura 6.7 vengono

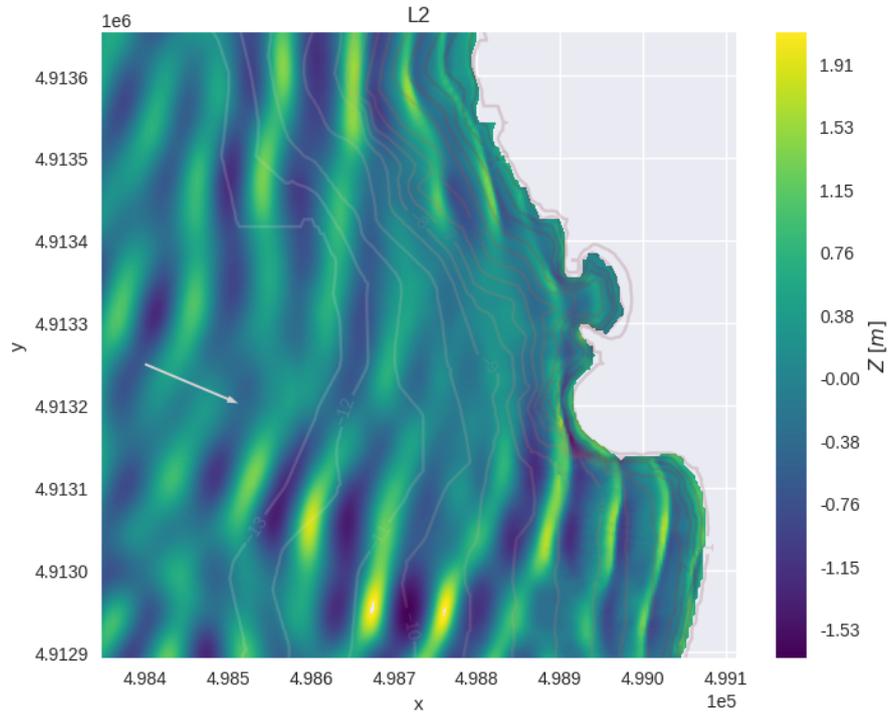


Figura 6.6: Elevazione della superficie libera stato L2, la freccia indica la direzione propagazione imposta sul margine a largo

inoltre riportati i fronti relativi allo stato $M2$.

6.1.3 Conclusioni

La risposta idrodinamica in assenza della struttura è stata caratterizzata in termini di elevazione della superficie libera e in termini delle correnti medie indotte dal frangimento.

Attraverso i grafici riguardanti l'elevazione è stato possibile valutare la variazione dell'angolo di incidenza dei fronti in ingresso al golfo rispetto alle direzioni principali di propagazione imposte sul margine esterno.

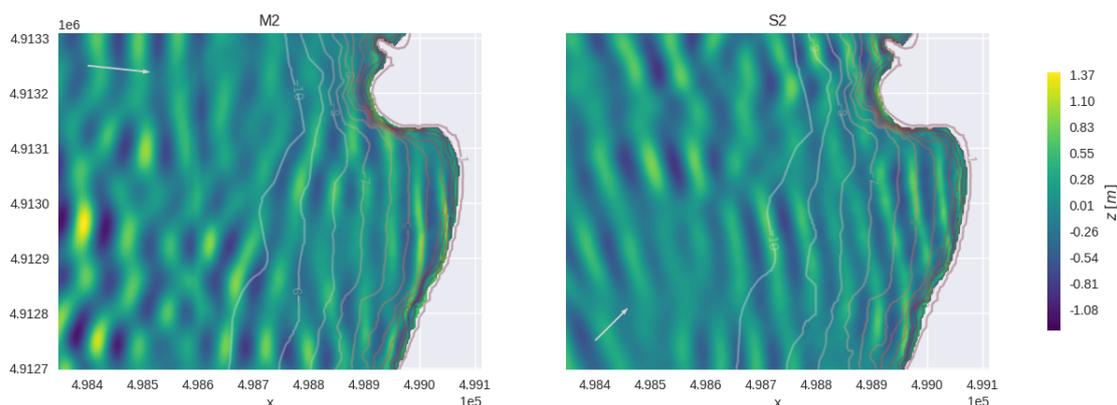


Figura 6.7: Elevazione della superficie libera stato M2 e S2, la freccia indica la direzione propagazione imposta sul margine a largo

6.2 Risposta idrodinamica reef

6.2.1 Correnti superficiali medie indotte

In figura 6.8 sono mostrati gli andamenti delle correnti medie indotte dal frangimento per gli stati $L1$ e $L2$ in cui si osservano sostanziali differenze se confrontati con 6.1. La presenza della struttura, comporta la formazione di due celle di ricircolo situate rispettivamente a valle e a monte dell'opera. A cavallo di queste due si distingue un trasporto di massa netto in direzione perpendicolare alla riva come conseguenza dell'arretramento della zona di frangimento.

Confrontando i risultati in assenza della struttura, si osserva come vi sia una riduzione di intensità delle correnti nel primo terzo di spiaggia. Anche in questo caso in prossimità del gomito del molo si manifesta un relativo aumento di intensità della corrente, come osservato in precedenza. La direzione del flusso è sostanzialmente invariata.

In figura 6.9 viene mostrato l'andamento delle correnti per gli stati di mare $M1$ e $M2$, globalmente non vi sono sostanziali modifiche. Tuttavia anche in questo caso si evince la formazione delle celle di ricircolo, sebbene siano meno marcate. La riduzione di intensità nel primo terzo di spiaggia è meno evidente.

Analizzando la figura 6.10 si giungono ad analoghe considerazioni, l'estensione e l'intensità delle correnti di ricircolo è inferiore. Tuttavia si

osserva un riduzione sostanziale dell'intensità nel primo terzo di spiaggia. Si fa notare come il valore massimo della corrente, localizzata in prossimità del molo, subisca una diminuzione di circa 15%.

6.2.2 Quota pelo libero

Stato L1

In figura 6.11 vengono riassunte le informazioni relative all'elevazione della superficie libera e viene mostrata l'evoluzione del frangente con un intervallo di campionamento pari a 1s. Nelle aree in cui è avvenuto il frangimento è stato riportato il corrispondente coefficiente di Iribarren.

Si osserva come in prossimità della apice inferiore della struttura individuato dalle isobate a 2m di profondità, si ha un aumento dell'elevazione localizzato. In conseguenza del quale si verifica il frangimento caratterizzato da un coefficiente di Iribarren corrispondente a un profilo *plunging* (i.e $0.4 < \xi_b < 2$). Al propagarsi del fronte, tale coefficiente rimane al di sotto del valore soglia, si osserva un marcato cambiamento negli istanti finali dove l'ampiezza d'onda risulta minore. L'ampiezza dell'onda in prossimità del frangimento è di circa 1.7m. L'allargamento repentino del fronte tra gli istanti 3 e 4 è pronunciato mentre lungo la corsa dell'onda la variazione rimane pressochè costante.

In figura 6.12 vengono mostrate le linee dei frangenti esterni per una serie di onde incidenti. Chiaramente sono presenti delle oscillazioni delle posizioni tuttavia si osserva un discreto allineamento delle curve. A monte della struttura l'orientazione delle linee di frangimento ricalca quella dell'isobata 2. Mentre a valle la curva presenta un offset iniziale rispetto a tale isobata. In questo settore i frangenti sono maggiormente allineati tra di loro.

L'angolo di *peel* viene valutato sulla base dell'iclinazione delle curve dei frangenti rispetto alla direzione di propagazione delle creste. L'ortogonale d'onda in ingresso presenta una leggera deviazione rispetto all'asse di simmetria della struttura comportando quindi un *peel* minore lungo il braccio superiore individuata dall'isobata a 2 metri e un angolo maggiore lungo il braccio inferiore. Si è valutato quindi un angolo di *peel* medio di $35^{\circ}:45^{\circ}$ lungo la corsa di sinistra mentre valori compresi tra $45^{\circ}:55^{\circ}$ lungo la corsa destra. Tale valutazione è di carattere qualitativo: si deve tenere presente che la risoluzione di griglia è dell'ordine di 3 metri che quindi non

comporta una valutazione localizzata degli angoli effettivi di *peel*. In figura 6.13 è possibile apprezzare la deflessione subita dal fronte.

L2

I risultati prodotti per lo stato di mare *L2* non vengono riportati poichè è emerso dalle analisi che l'elevata intensità del moto ondoso comporta un arretramento sostanziale dei fronti al punto tale che la struttura non è in grado di alterarne la propagazione in termini di *surfabilità*. Si tenga presente che le onde in ingresso al golfo raggiungono valori di 3.6 metri. La struttura così costruita non è in grado di gestire tale dimensione, in accordo con quanto stabilito in fase di progettazione. Inoltre, si fa presente che l'elevata intensità può mettere in pericolo l'incolumità dei praticanti. Tenuto conto che la struttura è stata pensata per incentivare la pratica ai principianti/intermedi, si capisce come le condizioni associate allo stato *L2* siano eccessivamente intense.

Stato M1

Come mostrato in figura 6.5, lo stato di mare *M1* è caratterizzato da una diminuzione dell'ampiezza di oscillazione all'interno del golfo. La dimensione ridotta delle onde, rende sostanzialmente impraticabile la totalità dei fronti in ingresso. Per questo motivo, si è scelto di non riportare i risultati ottenuti per lo stato di mare *M1*

Stato M2

Osservando la propagazione dei fronti nel caso *M2* sono stati individuati due diversi comportamenti valutati in termini di potenziali onde praticabili. Il primo si realizza nella formazione di tipo un'onda *A-Frame*, caratterizzato quindi da due corse percorribili come nel caso mostrato sopra (i.e *L1*). Il secondo invece si realizza nella formazione di onde, cosiddette "destre", ovvero in cui la parete praticabile si sviluppa in direzione destra rispetto un osservatore spalle al picco. Nella figura 6.14 si osserva come la parete sinistra sia impraticabile a causa della rapidità di espansione del frangente, tuttavia la parete a destra risulta propagarsi in modo uniforme. Si osserva inoltre che il fronte presenta una deflessione maggiore nell'intorno della struttura rispetto allo stato *L1*. La linea dei frangenti esterna è mostrata in figura 6.15, in cui si vede come i frangimenti a valle a monte siano sostanzialmente differenti. Si osserva un offset delle linee

principalmente dovuto alla differenza di ampiezza di oscillazione della superficie. L'angolo di *peel* che caratterizza la corsa destra è di circa 45, giustificato dalla pronunciata deflessione dei fronti.

L'altezza dell'onda è nei limiti di progetto, e varia tra 2.1 e 1.6 metri.

In figura 6.16 viene mostrato un frangente del tipo *A-frame*, l'evoluzione della parete si presenta simile a quella mostrata in figura 6.11 relativa allo stato *L1*. Tuttavia si osserva una maggiore deflessione del fronte, in particolare lungo il braccio inferiore. Questo comporta una locale diminuzione dell'angolo di *peel* lungo la corsa d'onda destra.

Stato S1

Come mostrato in figura 6.5, lo stato di mare *S1* è caratterizzato da una diminuzione dell'ampiezza di oscillazione all'interno del golfo. La dimensione ridotta delle onde, rende sostanzialmente impraticabile la totalità dei fronti in ingresso. Per questo motivo, si è scelto di non riportare i risultati ottenuti per lo stato di mare *S1*.

Stato S2

In figura ?? sono riportati gli andamenti dei fronti, a titolo di esempio, come negli altri casi, vengono mostrati le istantee. Nonostante via sia una sostanziale differenza in termini di direzione di propagazione imposta si osserva una risposta analoga allo stato di mare *L2*. Tuttavia, osservando la propagazione di molteplici fronti d'onda, si osserva una diminuzione di consistenza se confrontato con lo stato *L1*. Nel suddetto caso la formazione di onde potenzialmente praticabili avviene con maggior "frequenza". Mentre in *S2* solo una frazione dei fronti in ingresso è caratterizzata dalla direzione di propagazione favorevole alla formazione di onde "surfabili".

Come sopra, vengono mostrati in figura 6.18 le linee esterne dei frangenti, in questo caso si osserva una maggiore asimmetria nella curvatura dei fronti. A valle della struttura si osserva una maggiore curvatura dei fronti, che comporta una diminuzione locale di *peel angle*. A monte invece la curvatura è meno marcata seppur sempre presente, e dalla figura 6.18 si osserva come tale curvatura aumenti avanzando verso riva.

Le linee dei frangenti lungo la corsa sinistra sono sostanzialmente allineate all'isobata a 3 metri di profondità contrariamente a quanto osservato in *L1* in cui tale allineamento si presentava per l'isobata a 2m. L'altezza d'onda al frangimento in questo caso è maggiore rispetto a quella osservata per lo stato *L1*, con valori nell'intervallo 1.5:1.8 metri.

6.2.3 Conclusioni

I risultati hanno mostrato che per gli stati a bassa intensità relativi ai settori di Mezzogiorno e Scirocco non sia possibile ottenere, qualitativamente la formazione di onde praticabili. D'altra parte, se si considerano gli stati maggiormente energetici dei medesimi settori si osserva la formazione di onde praticabili valutate in termini di angoli di ??, coefficiente di Iribarren e altezza del frangente. La struttura è stata sviluppata con l'intenzione di ottimizzare i fronti provenienti dai settori di Libeccio tuttavia l'analisi presentata ha mostrato come anche per i settori Scirocco e Mezzogiorno si manifesti la formazione di onde praticabili.

La presenza della struttura, innesca un pattern di correnti superficiali comune a tutti gli stati analizzati, caratterizzato da due celle di ricircolo simmetriche rispetto all'asse di simmetria strutturale. A cavallo di queste si osserva la formazione di una corrente rivolta in direzione della riva, come conseguenza diretta del frangimento delle onde sulla zona terminale della struttura.

Sebbene per valutare la realizzabilità di un'opera di questo tipo siano necessarie ulteriori analisi, il lavoro presentato pone le basi per un percorso di ricerca più approfondito.

6.2 – Risposta idrodinamica reef

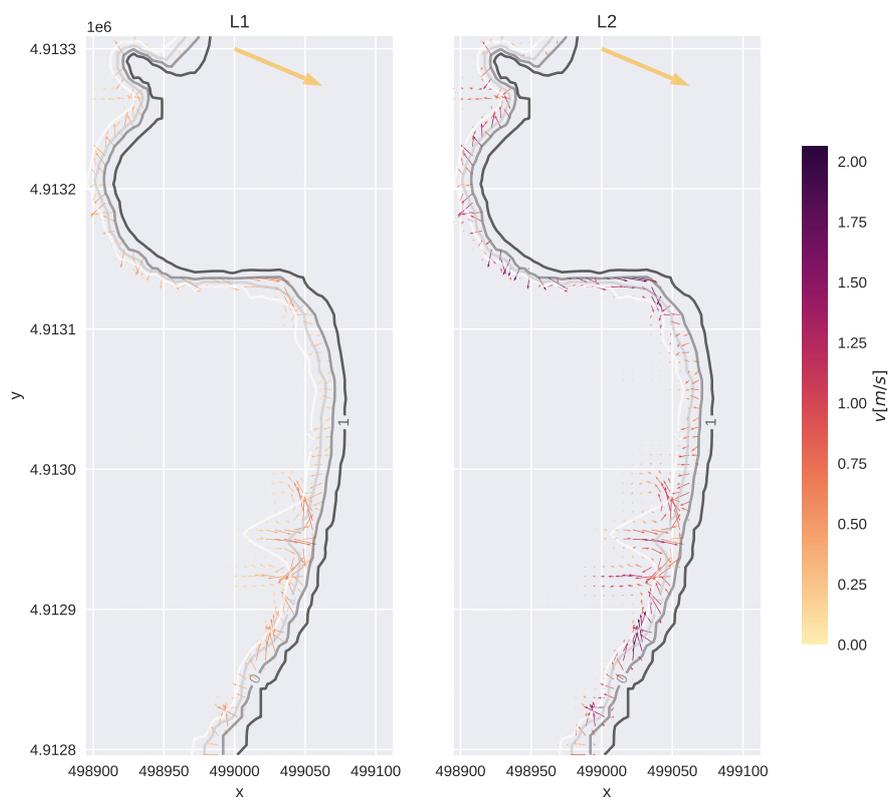
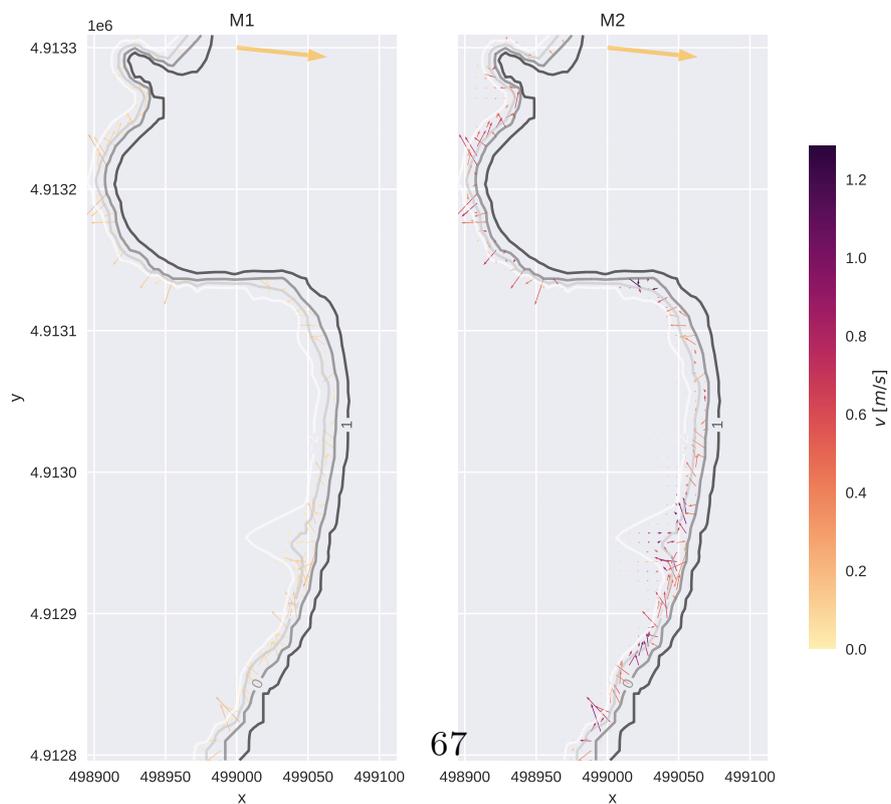


Figura 6.8: Correnti superficiali indotte per gli stati L1 e L2 in presenza della struttura



67

Figura 6.9: Correnti superficiali indotte per gli stati M1 e M2 in presenza della struttura

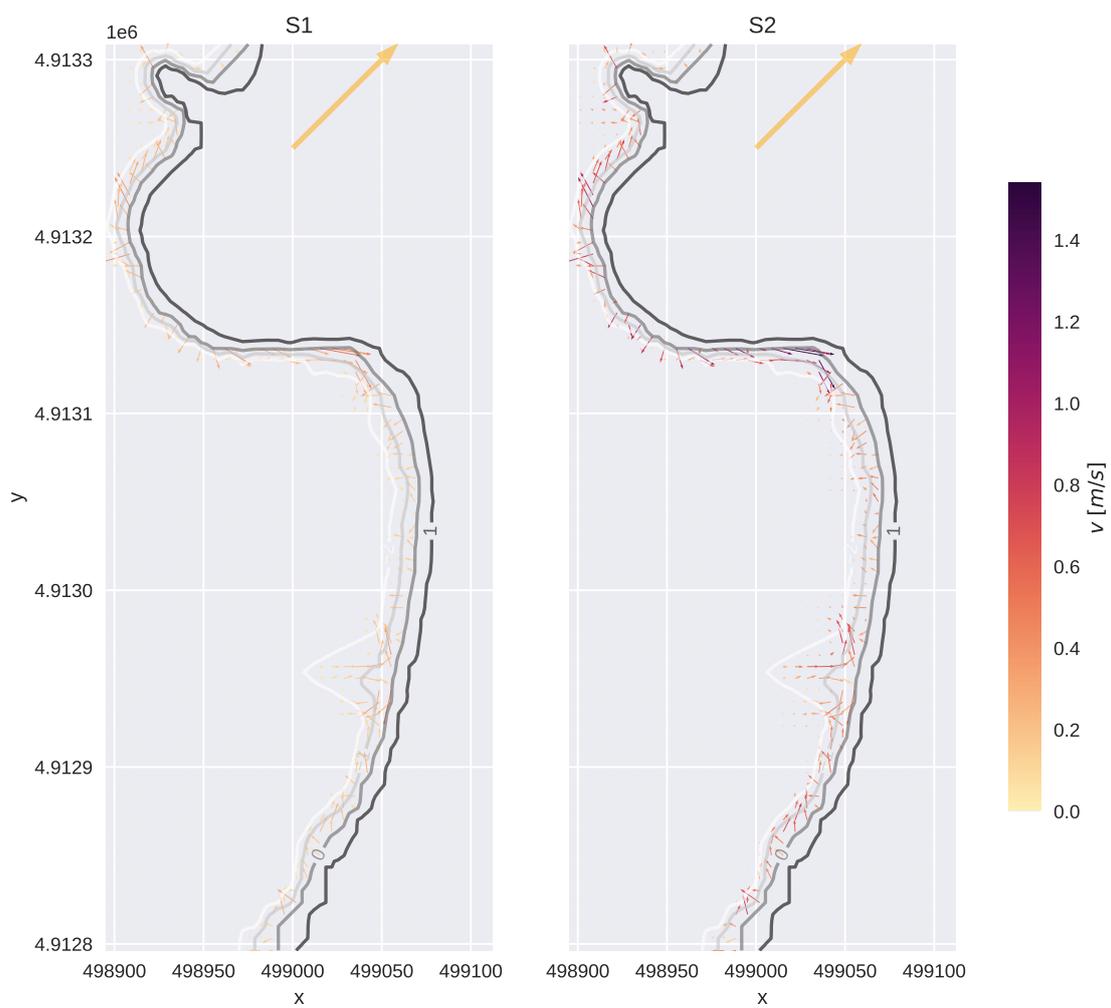


Figura 6.10: Correnti superficiali indotte per gli stati S1 e S2 in presenza della struttura

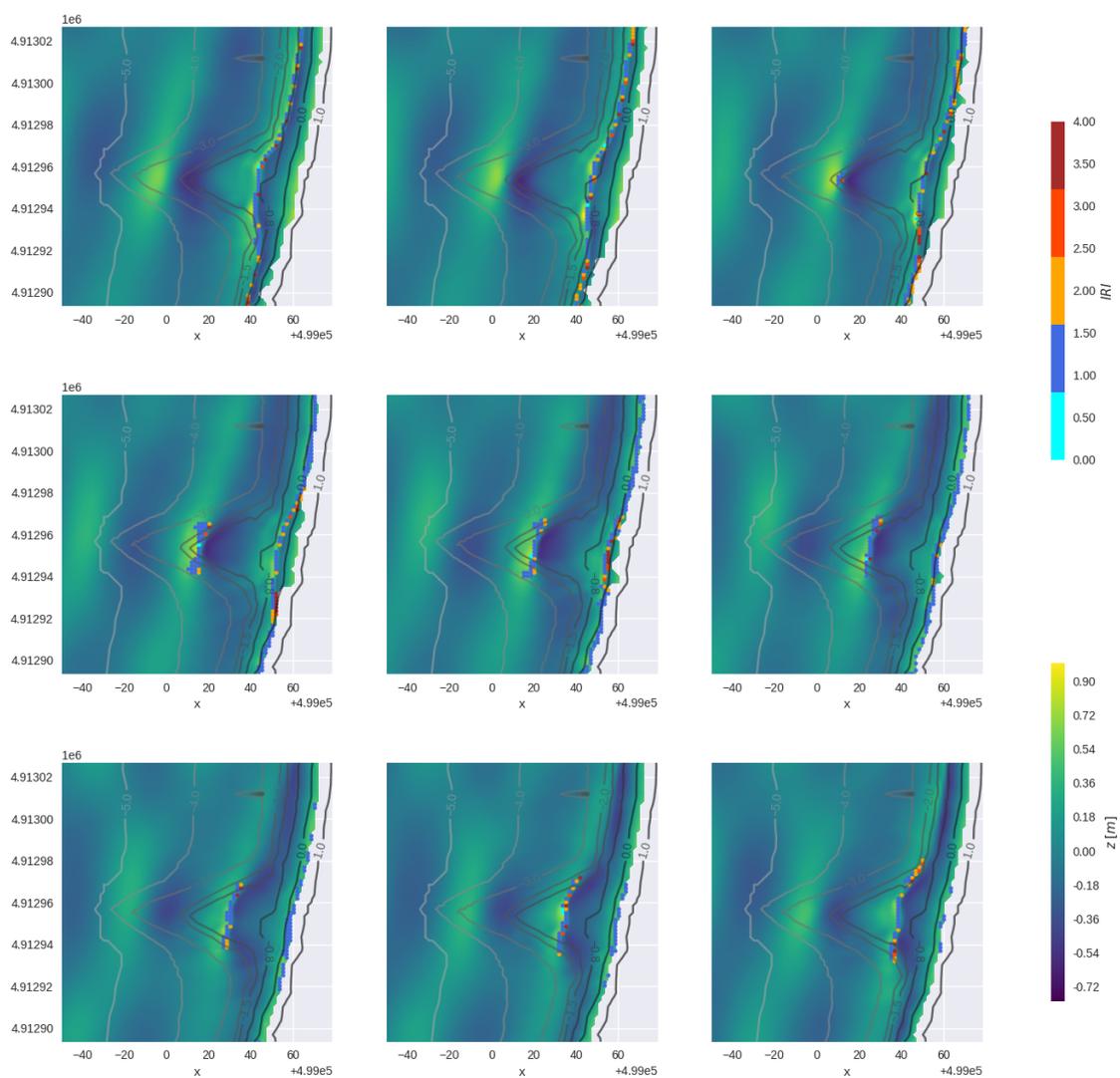


Figura 6.11: Elevazione della superficie libera stato L1 e coefficiente di Iribarren

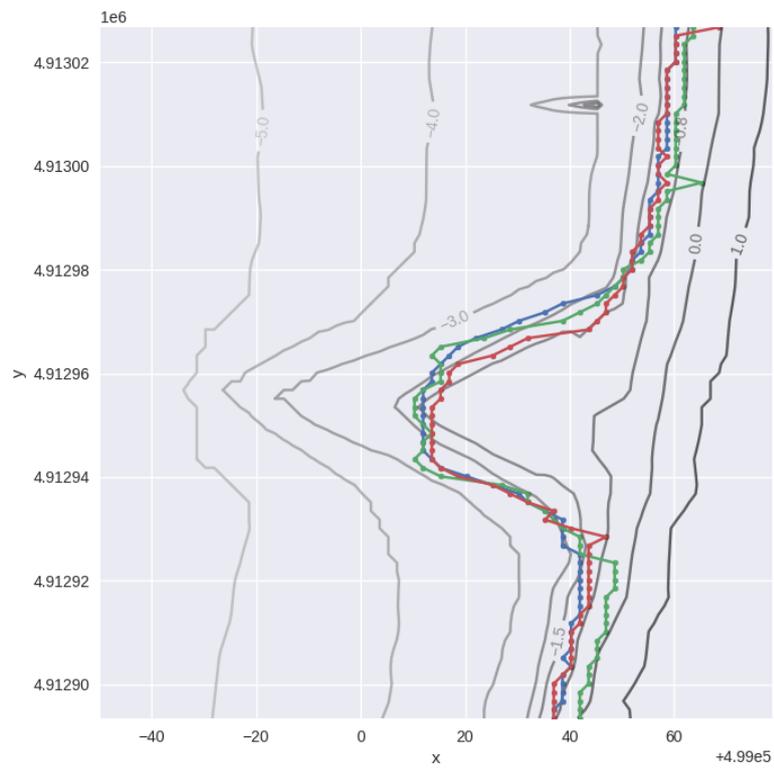


Figura 6.12: Linea esterna di frangimento L1, i colori si riferiscono alle diverse onde

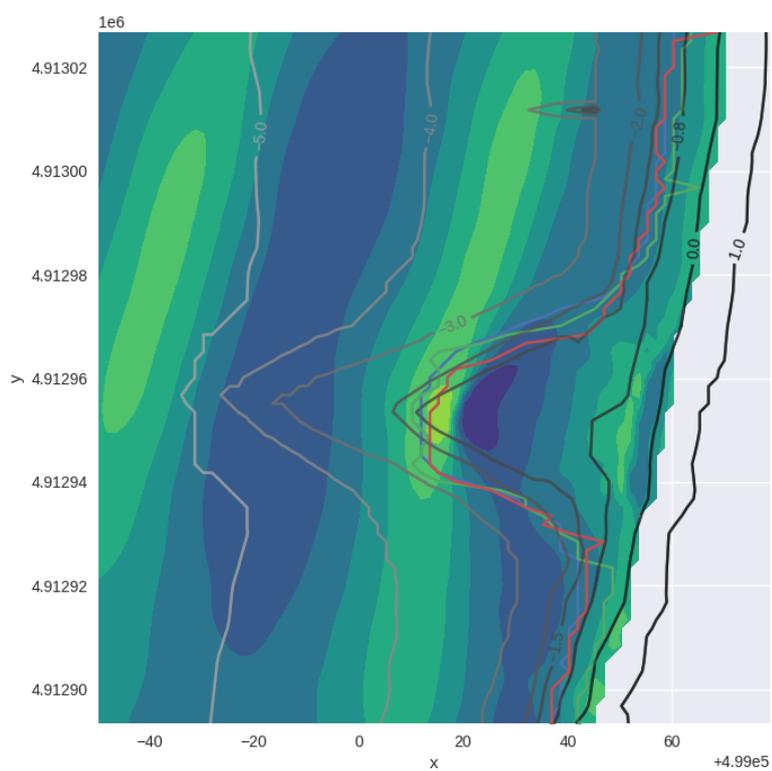


Figura 6.13: Linea esterna di frangimento e deflessione del fronte L1

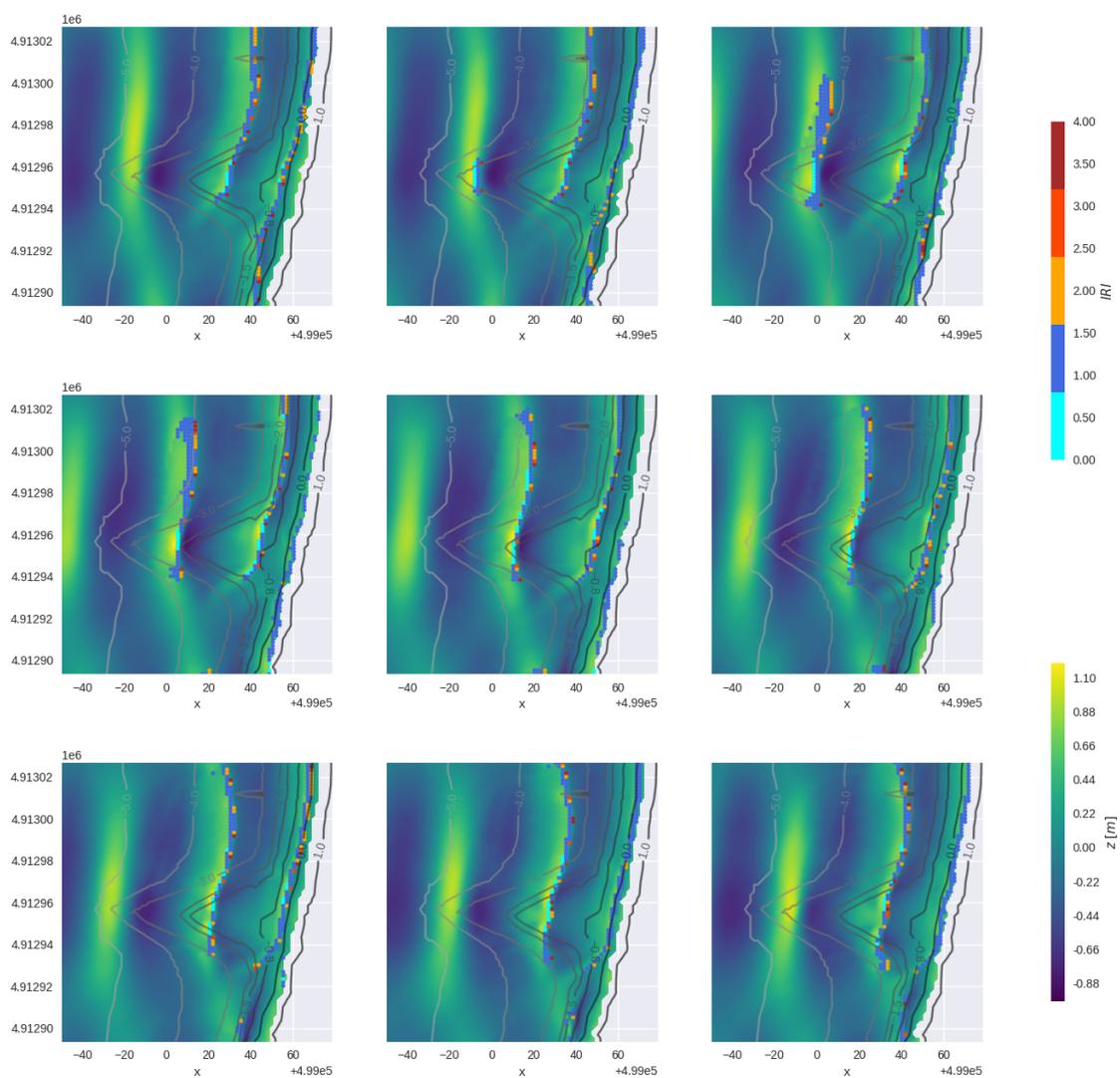


Figura 6.14: Elevazione della superficie libera stato M2 e coefficiente di Iribarren

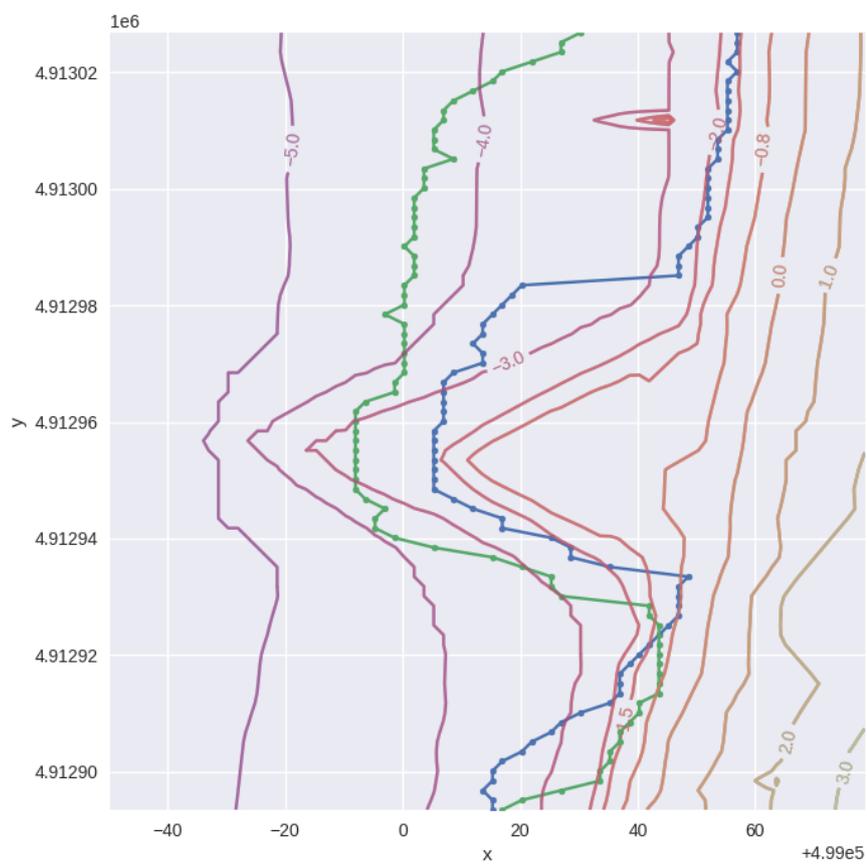


Figura 6.15: Linea dei frangenti M2

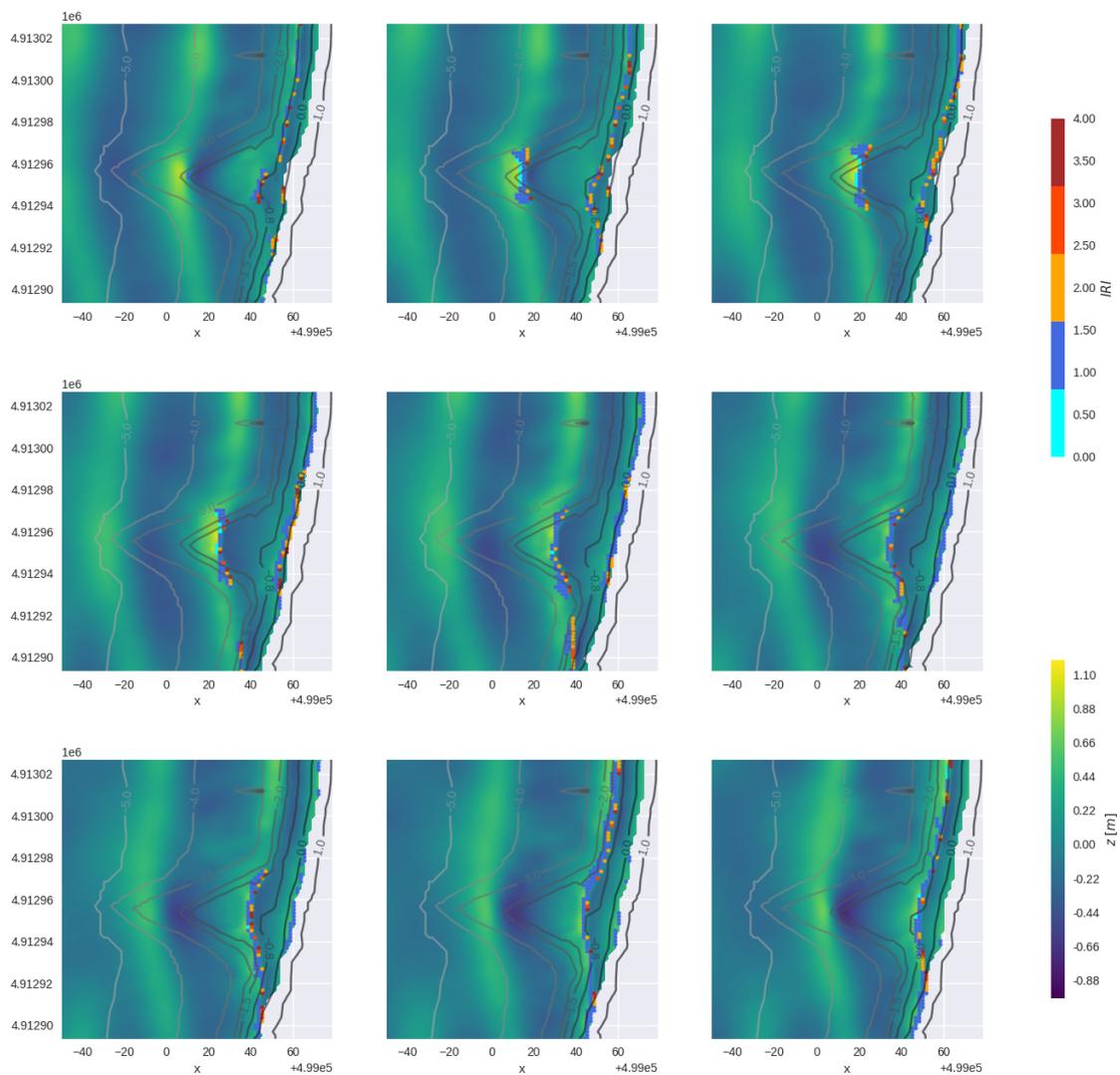


Figura 6.16: Evoluzione dei fronti M2, comportamento *A-Frame*

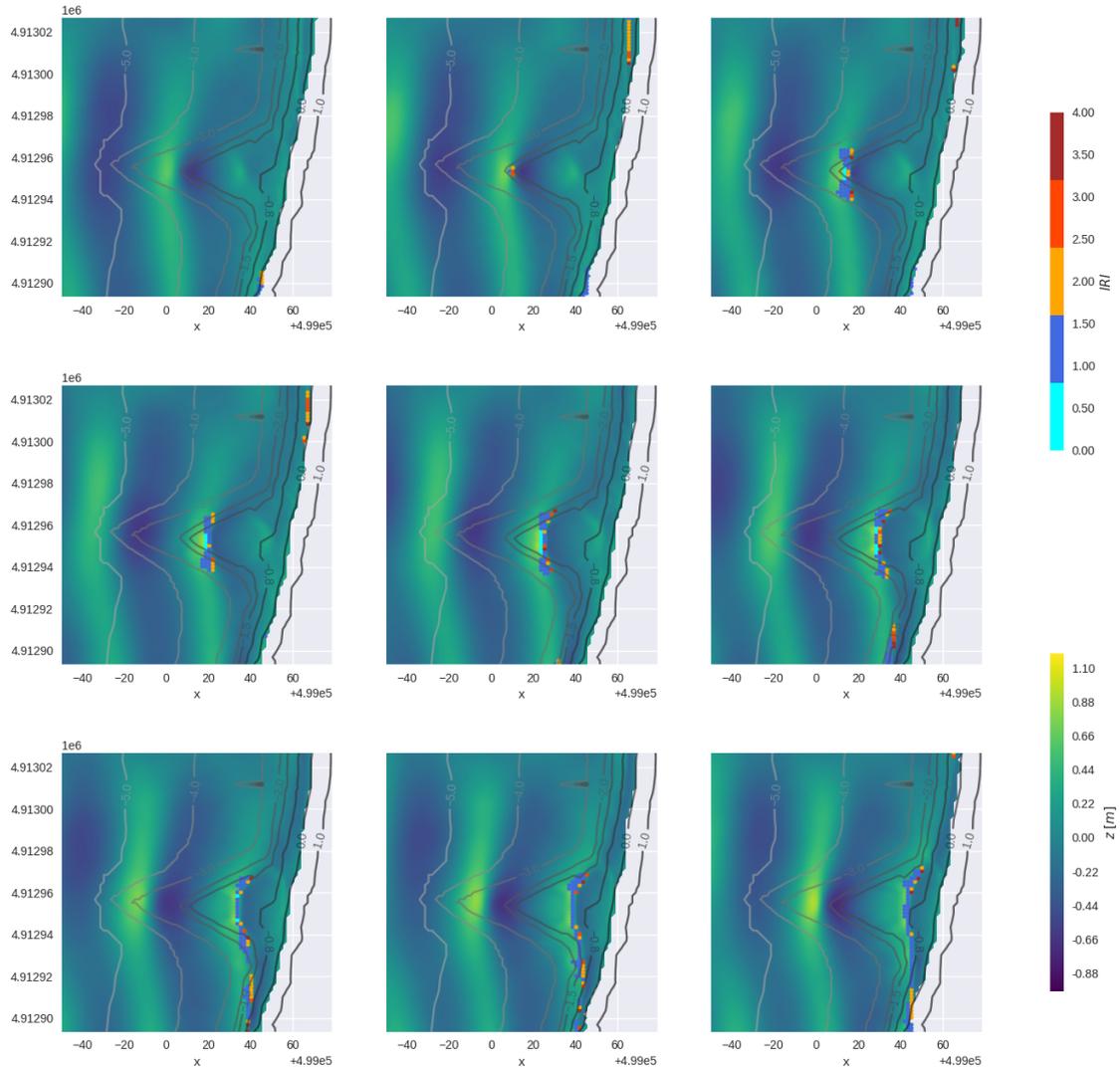


Figura 6.17: Evoluzione dei fronti S2, comportamento

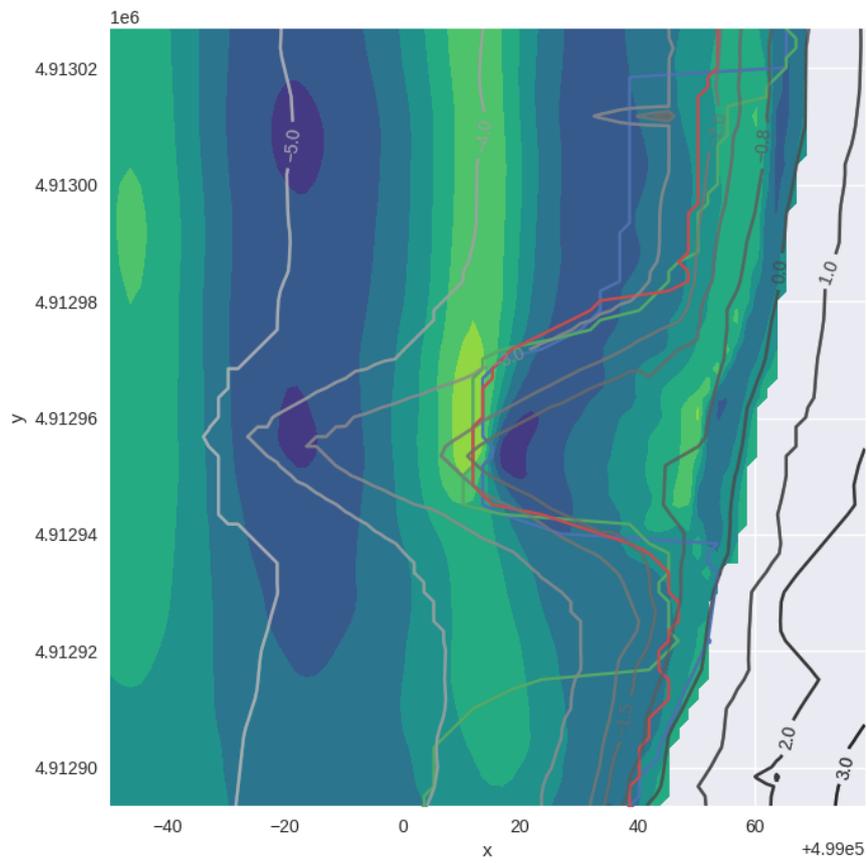


Figura 6.18: Evoluzione dei fronti stato S2

Bibliografia

- [1] Kerry P. Blackt e Shaw Meadf. «Design of the Gold Coast reef for surfing, public amenity and coastal protection: surfing aspects». en. In: *Journal of Coastal Research* (2001). URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Design-of-the-Gold-Coast-reef-for-surfing-%20-public-Blackt-Meadf/6b4556be06ca3e8b4ed800db01e109fb71ec6617> (visitato il 06/07/2023).
- [2] James A. Hutt, Kerry P. Black e Shaw T. Mead. «Classification of Surf Breaks in Relation to Surfing Skill». In: *Journal of Coastal Research* (2001). Publisher: Coastal Education & Research Foundation, Inc., pp. 66–81. ISSN: 0749-0208. URL: <https://www.jstor.org/stable/25736206> (visitato il 05/07/2023).
- [3] Cyril J. Galvin Jr. «Breaker type classification on three laboratory beaches». en. In: *Journal of Geophysical Research (1896-1977)* 73.12 (1968). [_eprint: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/JB073i012p03651](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/JB073i012p03651), pp. 3651–3659. ISSN: 2156-2202. DOI: [10.1029/JB073i012p03651](https://doi.org/10.1029/JB073i012p03651). URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/JB073i012p03651> (visitato il 05/07/2023).
- [4] Shaw Mead e Kerry Black. «Field Studies Leading to the Bathymetric Classification of World-Class Surfing Breaks». In: *Journal of Coastal Research* (2001). Publisher: Coastal Education & Research Foundation, Inc., pp. 5–20. ISSN: 0749-0208. URL: <https://www.jstor.org/stable/25736201> (visitato il 05/07/2023).
- [5] Shaw Mead e Kerry Black. «Functional Component Combinations Controlling Surfing Wave Quality at World-Class Surfing Breaks». In: *Journal of Coastal Research* (2001). Publisher: Coastal Education &

- Research Foundation, Inc., pp. 21–32. ISSN: 0749-0208. URL: <https://www.jstor.org/stable/25736202> (visitato il 05/07/2023).
- [6] Paula Camus et al. «Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate». en. In: *Coastal Engineering* 58.6 (giu. 2011), pp. 453–462. ISSN: 0378-3839. DOI: [10 . 1016 / j . coastaleng.2011.02.003](https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.02.003). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383911000354> (visitato il 05/07/2023).
- [7] DICCA. <http://www3.dicca.unige.it/meteocean/>.
- [8] Fabian Pedregosa et al. «Scikit-learn: Machine learning in Python». In: *Journal of machine learning research* 12.Oct (2011), pp. 2825–2830.
- [9] Martijn Henriquez. «Artificial Surf Reefs». In: (gen. 2005).
- [10] GS Stelling e M Zijlema. «An accurate and efficient finite-difference algorithm for non-hydrostatic free-surface flow with application of wave propagation». In: *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 43 (2003), pp. 43–1–43–23. ISSN: 0271-2091.
- [11] M. Zijlema e G. S. Stelling. «Efficient computation of surf zone waves using the nonlinear shallow water equations with non-hydrostatic pressure». en. In: *Coastal Engineering* 55.10 (ott. 2008), pp. 780–790. ISSN: 0378-3839. DOI: [10 . 1016 / j . coastaleng.2008.02.020](https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2008.02.020). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383908000380> (visitato il 06/07/2023).
- [12] P. B. Smit. «Non-hydrostatic modelling of large scale tsunamis». en. In: (2008). Publisher: TU Delft, Civil Engineering and Geosciences, Hydraulic Engineering. URL: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A416ae56c-8fa6-42b1-b532-acc457b28604> (visitato il 06/07/2023).
- [13] Pieter Smit et al. «XBeach: Non-hydrostatic model: Validation, verification and model description». In: (gen. 2010).
- [14] S. Hibberd e D. H. Peregrine. «Surf and run-up on a beach: a uniform bore». en. In: *Journal of Fluid Mechanics* 95.2 (nov. 1979). Publisher: Cambridge University Press, pp. 323–345. ISSN: 1469-7645, 0022-1120. DOI: [10 . 1017 / S002211207900149X](https://doi.org/10.1017/S002211207900149X). URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-fluid-mechanics/article/abs/surf-and-runup-on-a-beach-a-uniform-bore/8F7B1E13E6CA05F0B07FB82AACB066C8> (visitato il 06/07/2023).

- [15] Marcel Zijlema, Guus Stelling e Pieter Smit. «SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters». en. In: *Coastal Engineering* 58.10 (ott. 2011), pp. 992–1012. ISSN: 0378-3839. DOI: [10 . 1016 / j . coastaleng . 2011 . 05 . 015](https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.015). URL: [https : / / www . sciencedirect . com / science / article / pii / S0378383911000974](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383911000974) (visitato il 05/07/2023).
- [16] J. Smagorinsky. «GENERAL CIRCULATION EXPERIMENTS WITH THE PRIMITIVE EQUATIONS: I. THE BASIC EXPERIMENT*». en. In: *Monthly Weather Review* 91.3 (mar. 1963), pp. 99–164. ISSN: 0027-0644, 1520-0493. DOI: [10 . 1175 / 1520 - 0493 \(1963\) 091 < 0099 : GCEWTP > 2 . 3 . CO ; 2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2). URL: [http : // journals . ametsoc . org / doi / 10 . 1175 / 1520 - 0493 \(1963\) 091 % 3 C 0099 : GCEWTP % 3 E 2 . 3 . CO ; 2](http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0493(1963)091%3C0099:GCEWTP%3E2.3.CO;2) (visitato il 06/07/2023).
- [17] Regione Liguria. <https://geoportal.regione.liguria.it/>.
- [18] K. Hasselmann et al. «Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)». In: 1973. URL: [https : / / www . semanticscholar . org / paper / Measurements - of - wind - wave - growth - and - swell - decay - Hasselmann - Barnett / b1835f72cf63c8d497c026ca3837acc52fdfcaa](https://www.semanticscholar.org/paper/Measurements-of-wind-wave-growth-and-swell-decay-Hasselmann-Barnett/b1835f72cf63c8d497c026ca3837acc52fdfcaa) (visitato il 06/07/2023).