POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

Analisi parametriche e sperimentali di frangiflutti portuali permeabili

Relatore:
prof. Davide Poggi

Correlatore:
Andrea Cagninei

Candidato:
Simone Vece

Dicembre 2020

Sommario

Introduzione **1**
1 Inquadramento generale del problema **3**
1.1 L'area portuale di Stresa 3
1.2 Generalità sulle Opere Portuali 5
1.3 Opere di difesa dei Porti 10
1.4 Caratteristiche del "Nuovo Porto Turistico" di Stresa 13
1.5 Possibili soluzioni 15
2 Caratterizzazione idraulica **17**
2.1 Il lago Maggiore 17
2.2 Limnologia 20
2.2.1 Origine dei Laghi 20
2.2.2 Dinamica delle acque nei laghi 22
2.2.3 Bilancio idrologico di un lago 24
2.3 Movimento delle acque 26
2.3.1 Il moto ondoso 26
2.3.2 Le sesse 28
2.3.3 Le correnti (o spirali) di Lagmuir 30
2.3.4 Le correnti superficiali di deriva 30
2.4 Teoria del moto ondoso 31
2.4.1 La teoria lineare delle onde superficiali 31
2.4.2 Altre teorie 35
2.4.3 Trasformazione dell'onda 36
2.5 Metodologia per l'individuazione dell'onda incidente e riflessa 40
2.5.1 Applicazione delle formule empiriche al caso del nuovo porto turistico di Stresa 42
2.5.2 Applicazione delle formule empiriche alle serie storiche al fine di valutare il tempo di ritorno delle onde trasmesse in porto attraverso la barriera frangiflutti 44
2.6 Teoria dei modelli 50
3 Realizzazione dell'apparato sperimentale **53**
3.1 Introduzione 53
3.2 Progettazione componenti del modello 53
3.3 Costruzione dell'apparato sperimentale 58
3.4 Strumentazione 64
4 Prove su modello ed elaborazioni **74**
4.1 Introduzione 74
4.2 Caratteristiche delle prove 74
4.3 Pre-Elaborazione del segnale acquisito 76
4.4 Calcolo delle proprietà dell'onda e delle statistiche 81
4.5 Risultati 84
4.5.1 Osservazioni generali 90
4.5.2 Osservazioni riguardo al caso del 25 marzo 2019 97
Conclusioni **100**
Bibliografia **102**

Introduzione

L'obiettivo del presente elaborato di tesi è quello di analizzare sperimentalmente, attraverso la realizzazione di un modello fisico, l'efficacia dei frangiflutti portuali permeabili e i fenomeni che si generano all'interno del bacino portuale del nuovo porto turistico di Stresa, situato lungo le coste del lago Maggiore.

Questo studio, infatti, propone una risposta alla richiesta di una consulenza tecnico-scientifica da parte del comune di Stresa riguardo alla verifica della funzionalità idraulica dell'opera. La consulenza è stata richiesta a seguito degli eventi del 25 marzo 2019, quando a pochi giorni dalla data prevista per l'inaugurazione, c'è stata una burrasca di vento durante la quale uno dei pontili galleggianti, quello verso la strada, è stato strappato dall'ancoraggio costringendo il comune a rinviare l'apertura. Il distacco è stato provocato dal moto ondoso generatosi all'interno del bacino portuale.

Solo attraverso la costruzione di un modello fisico, capace di riprodurre precisamente le condizioni reali del nuovo porto turistico, si rende possibile un'analisi quantitativa rigorosa per lo studio dei fenomeni interni al porto.

La realizzazione del modello e le sperimentazioni che verranno illustrate sono avvenute presso il Laboratorio di Idraulica "Giorgio Bidone" del DIATI (Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture).

Nel primo capitolo si presenta l'inquadramento geografico del porto e le problematiche scaturite dall'evento del 25 marzo 2019. Vengono illustrate le varie tipologie delle opere di difesa portuale e si mostra, attraverso mappe e disegni progettuali, in quale di queste s'identifica il nuovo porto di Stresa con le sue caratteristiche. Inoltre, si riportano alcune soluzioni progettuali adottate già in altri porti.

Nel secondo capitolo si trattano le caratteristiche idrauliche del lago Maggiore e le generalità sulla scienza che studia i laghi: la limnologia. Si illustrano le principali teorie del moto ondoso e i risultati qualitativi ottenuti da un'analisi, condotta dal professore D. Poggi, sulla correlazione tra il livello del lago, le caratteristiche del moto ondoso e la tipologia di barriera permeabile, ciò attraverso l'applicazione di formule empiriche; tale analisi sarà indicativa dei parametri fisici dell'onda da indagare con il modello. Viene mostrata, infine, la teoria dei modelli e i criteri adottati per realizzare il modello fisico, centrale di questo studio.

Nel terzo capitolo si descrivono le varie fasi della realizzazione del modello fisico. Innanzitutto, si mostra il canale ad onde proposto per queste analisi; quindi, la scelta di una sezione, dai disegni progettuali del porto, che farà da prototipo del modello. Viene mostrata la rappresentazione tridimensionale del modello, eseguita con il software AutoCAD, che ha preceduto la scelta del materiale, la costruzione e, infine, l'assemblaggio dei singoli elementi. Viene descritta poi la preparazione e la disposizione degli strumenti di misura utilizzati: sensori ad ultrasuoni e videocamere.

Nel quarto capitolo verranno illustrate le sperimentazioni effettuate sul modello e l'elaborazione delle misure. Acquisiti i dati, è stata effettuata una pre-elaborazione di "data cleaning": il segnale così ottenuto è stato utilizzato per il calcolo delle proprietà dell'onda e delle varie statistiche; sono stati ottenuti i grafici degli andamenti dell'altezza d'onda nel tempo H(t) e delle PSD (Power Spectral Density). L'analisi dei dati si conclude con la realizzazione di mappe che mostrano come varia il coefficiente di trasmissione Kt (parametro indicativo dell'efficacia del frangiflutto) e l'altezza d'onda massima interna al porto, al variare dei parametri dell'onda incidente. Tutte queste operazioni sono state fatte attraverso il software MATLAB.

1 Inquadramento generale del problema

1.1 L'area portuale di Stresa

Stresa è un comune italiano della provincia di Verbania (provincia del Verbano-Cusio-Ossola), in Piemonte. La città è situata in posizione panoramica lungo la costa del lago maggiore di fronte alle famose isole Borromee: questo la rende una meta turistica d'importanza internazionale. Il territorio è in parte costiero, in parte insulare, in parte collinare ed in parte montano. La parte costiera, affacciata sul Lago Maggiore, comprende il nucleo storico di Stresa e la frazione di Carciano; la parte insulare comprende tre delle quattro isole Borromee (Bella, Madre e Superiore). Stresa è collegata alla stazione sciistica e ad un giardino botanico tramite una funivia divisa in due tronconi: il primo tratto conduce da Stresa al Giardino Alpinia mentre il secondo troncone sale dal Giardino Alpinia al Mottarone su cui sorgono alcuni impianti sciistici. Sul lungolago si affacciano hotel, ristoranti e residenze private e si trovano diverse spiagge pubbliche. (Net2Web.srl, 2015)

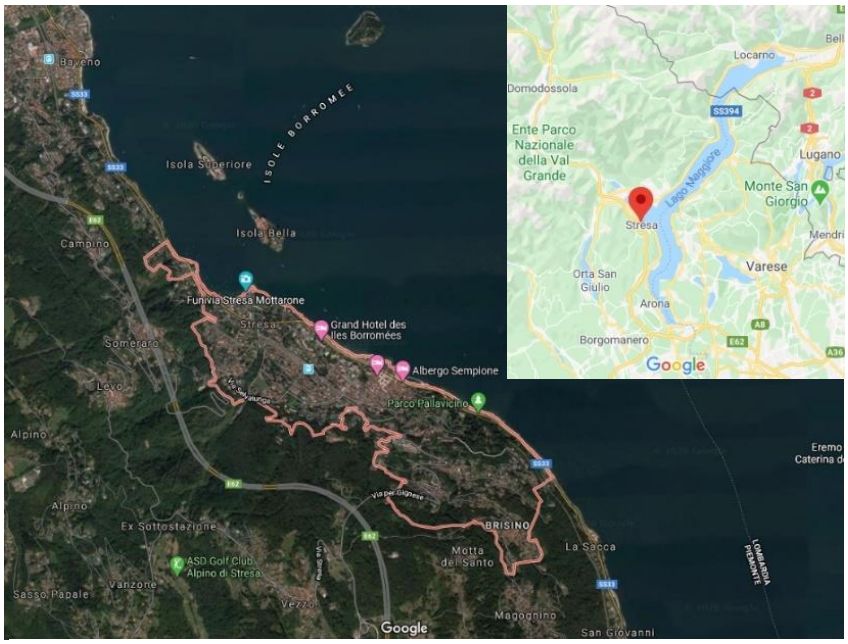

Figura 1.1 Immagini satellitare della città di Stresa
(Foto estratta da Google Maps)

Stresa rappresenta, quindi, uno dei principali punti di attracco per i battelli turistici della navigazione del Lago Maggiore. Ospita, infatti, la sede della Capitaneria di Porto del Lago Maggiore. (Wikipedia, 2020)

All'interno dell'area del Golfo Borromeo, con fondali profondi e un ampio ingresso che rende facile l'accesso alle imbarcazioni, si trova il Porto Vecchio. Un servizio di battelli-taxi fa la spola con le isole Borromee e offre un collegamento con tutti gli altri paesi del lago Maggiore. (Net2Web.srl, 2015)

L'area portuale all'ingresso di Stresa, tuttavia, non è attrezzata con alcuna struttura di sicurezza per la nautica da diporto; l'ingresso è segnalato da torrette rosso e verde al cui fianco si trovano alcuni scivoli di approdo con anelli di ormeggio per piccole imbarcazioni. La zona è molto trafficata da battelli di linea e privati che creano un moto ondoso fastidioso.

Attualmente è in fase di collaudo il *nuovo porto turistico* comunale, oggetto di studio di questa tesi, che ha lo scopo di offrire numerosi ormeggi e che permetterà ai diportisti nautici di visitare l'animata e caratteristica cittadina piemontese. (www.portolago.com, 2020)

Figura 1.2 aerofoto porto Stresa
(Foto estratta da Google Maps)

Figura 1.3 porto interno di Stresa
(Foto estratta da Google Maps)

La struttura portuale è in costruzione dal 2001 e i lavori sono stati interrotti più volte. Il 25 marzo 2019, a pochi giorni dalla data prevista per l'inaugurazione, c'è stata una burrasca di vento durante la quale uno dei pontili galleggianti, quello verso la strada, è stato strappato dall'ancoraggio costringendo il comune a rinviare l'apertura. Il distacco è stato provocato dal moto ondoso generatosi all'interno del bacino portuale. (L.Gemelli, 2019)

Data la configurazione del porto rispetto al lago, le onde hanno due vie di accesso: una è dalla bocca di porto, rivolta ad Ovest e quindi esposta al Lago Maggiore; l'altra è dal Nord, dove le onde che si infrangono sulla diga foranea hanno la possibilità di passare sotto il muraglione del porto, che è stato costruito su pali in calcestruzzo e che quindi non raggiunge, con la struttura in muratura, il fondale.

Stando alle osservazioni, quindi, il problema del moto ondoso all'interno del bacino portuale si verificherebbe in condizioni di *magra*. Attualmente con il livello di magra del lago, la diga foranea affonda per soli 50 centimetri nell'acqua: al di sotto di tale livello i pali di fondazione

presentano spazi tra di loro; per questo motivo sono state installate paratie di metallo a ulteriore protezione. (L.Gemelli, 2019)

Figura 1.4 Lavori di costruzione del Porto (Foto estratta dal sito di JANSONBRIDGING)

Figura 1.5 Lavori di costruzione del Porto (Foto estratta da articolo LA STMPA)

Figura 1.6 Burrasca nella notte del 25-3-2019 (Foto estratta da articolo LA STMPA)

Figura 1.7 Distacco del pontile (Foto estratta da articolo LA STMPA)

1.2 Generalità sulle Opere Portuali

Le opere portuali nascono come strutture adibite a fornire un ormeggio sicuro e un riparo protetto alle imbarcazioni nei confronti dei fattori meteomarini (moto ondoso, correnti, venti, effetti di marea).

Nell'età moderna, per le accresciute esigenze di utilizzo turistico, commerciale e militare, le modifiche apportate dall'uomo all'ambiente naturale si sono fatte sempre più marcate e, ci si è spinti sino a progettare e realizzare porti interamente artificiali in aree costiere altrimenti non idonee allo scopo.

I porti, in base all'ubicazione, possono essere classificati in:

- **Porti marittimi**, i quali si aprono sul mare;
- **Porti fluviali**, situati sulle rive di un fiume ma lontani dalla foce (si tratta generalmente di importanti corsi d'acqua che, anche nel loro tronco superiore, hanno fondali sufficienti alla navigazione);
- **Porti di estuario**, situati sull'estuario di un fiume (questi non vanno confusi con i porti fluviali anche se l'estuario si prolunga per molte miglia all'interno);
- **Porti lacustri o lacuali**, situati su un lago interno e cioè non in comunicazione con il mare (altrimenti si tratterebbe di porti di laguna o lagunari);

- **Porti canale**, formati da banchine costruite lungo l'ultimo tratto dei corsi d'acqua fino alla foce; la foce è spesso prolungata artificialmente verso il mare con uno o due moli per facilitare l'ingresso delle navi e preservarla dagli insabbiamenti. I porti canale sono generalmente di modeste dimensioni e sono utilizzati da naviglio di piccolo tonnellaggio, specie sulle coste unite, che non offrono altro genere di porti.

Rispetto alle caratteristiche strutturali, invece, i porti si distinguono in:

- **Porti Naturali**, specchi d'acqua che per l'andamento dei fondali e la conformazione della costa hanno di per sé i requisiti di accessibilità e di sicurezza necessari a un porto, senza bisogno dell'intervento dell'uomo;
- **Porti Artificiali**, creati dall'opera dell'uomo con dragaggi, costruzione di frangiflutti, dighe, moli ecc.

Nei Porti naturali viene sfruttata e valorizzata la naturale predisposizione morfologica del sito a offrire un approdo riparato. Nel caso più usuale, i porti naturali si trovano in presenza di discontinuità morfologiche nella linea di costa come insenature, calette, piccoli golfi, baie costiere o addirittura estuari fluviali, che possono essere sfruttati per fini commerciali e turistici senza la necessità di apportare rilevanti modifiche alle caratteristiche originarie. L'intervento antropico, in questi casi, si limita alla realizzazione di banchine o darsene nel settore più interno e, di opere di protezione come dighe foranee e moli in quello più esterno.

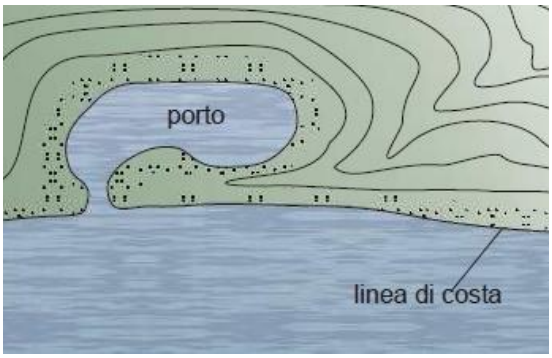

Figura 1.8 Esempio di Porto Naturale (APAT, 2007)

Figura 1.9 Taranto, Porto del mar Piccolo (Foto estratta da Google maps)

I porti artificiali si differenziano da quelli naturali per le modifiche apportate dalle attività antropiche ai siti originali, oppure per la totale artificialità di tutte le strutture di servizio che sono necessarie a permettere la fruibilità dei siti e la funzionalità del porto stesso. Spesso si rende necessaria l'esecuzione di interventi di difesa esterna per le zone di imboccatura e per l'eventuale canale di accesso che sono generalmente costituiti da dighe o moli.

I porti artificiali possono essere classificati sulla base della principale opera o unità morfologica che caratterizza lo scalo, fornendo un primo inquadramento nel contesto locale in:

- **Porto a bacino**, è usualmente costituito da un bacino difeso da uno o due moli guardiani collegati alla costa: il molo sopraflutto si oppone alle onde dominanti, mentre quello sottoflutto serve a contrastare quelle secondarie. I moli vengono progettati in modo da avere una forma ed una dimensione che garantiscono la sicurezza della navigazione e delle operazioni di carico e scarico delle navi.

Figura 1.10 Costa Ligure. Porto di Arenzano (APAT, 2007)

- **Porto – isola**, si tratta di un'opera costruita al largo della costa, collegata ad essa mediante un pontile di connessione e protetta da una diga frangiflutti. Il porto isola è una soluzione ingegneristica che consente di favorire l'agibilità del porto anche in caso di fondali poco profondi sotto costa e, di mantenere lontano dalla riva installazioni che possono risultare inquinanti o pericolose. La posizione della diga foranea va attentamente studiata per garantire l'operatività degli accosti ed evitare che fenomeni di interazione con il pontile e correnti litoranee favoriscano un'eccessiva deposizione di sedimenti nelle zone di calma.

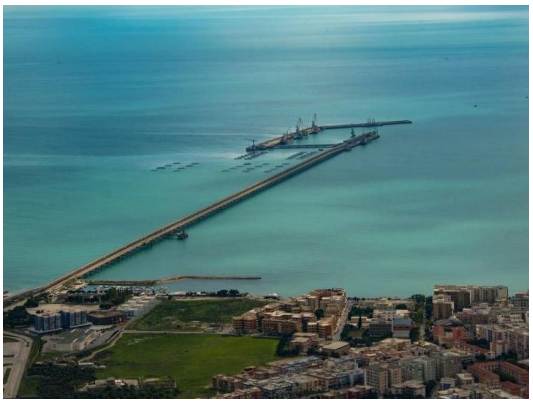

Figura 1.11 Porto isola di Manfredonia
(Foto di Matteo Nuzziello)

- **Porto a marea con chiuse**, le chiuse rappresentano la soluzione per ovviare al problema dell'agibilità degli scali portuali situati in zone con forti escursioni di marea. Esse prevedono la realizzazione di un sistema di sbarramenti mobili tra mare aperto e porto, che consentono il passaggio delle navi anche in presenza di variazioni significative del livello del mare.

Figura 1.12 La Thames Barrier a Woolwich Reach
(Foto estratta da www.teknoring.com)

- **Porto a moli convergenti**, in questo caso l'agibilità del porto viene garantita da due moli convergenti, che hanno l'effetto di attenuare il moto ondoso e di delimitare l'imboccatura. Tale soluzione si usa quando la distribuzione del moto ondoso individua due direzioni prevalenti e, consente, da una parte una maggior facilità di manovra durante la rotta d'ingresso e, dall'altra, un rallentamento nei processi di interrimento del bacino interno. È opportuno che i moli siano tanto lunghi da raggiungere fondali aventi profondità sufficiente e, impedire alle correnti costiere di deporre sedimenti presso l'imboccatura o all'interno del porto stesso.

Figura 1.13 Porto Turistico di Manfredonia
(Foto estratta da Google Maps)

- **Porto con diga foranea di protezione**, rappresenta una variante delle tipologie precedenti, con l'aggiunta di un'ulteriore protezione all'imboccatura del porto costituita da una diga approssimativamente parallela alla costa. L'aggettivo foranea sta ad indicare che la struttura si trova all'esterno del porto o che sporge molto. Vista la loro funzione,

le dighe foranee sono di solito costruite sul mare, ma ne esistono anche di lacustri. (APAT, 2007)

Figura 1.14 Porto di Pescara
(Foto estratta da articolo di Rete 8 di Gigliola Edmondo)

Per il progetto di un porto elementi essenziali sono da un lato le caratteristiche quantitative e qualitative del traffico a cui il porto deve servire, dall'altro le caratteristiche topografiche, idrografiche e meteorologiche della località. Le prime, determinabili in via di previsione con uno studio accurato tecnico-economico, danno i criteri per fissare l'ampiezza, la profondità dei fondali, lo sviluppo delle calate e delle banchine. Dalle caratteristiche fisiche dell'ambiente dipendono invece la disposizione, la forma, le dimensioni e la struttura delle opere di difesa e, parzialmente, di quelle interne. Gli elementi fisici che hanno preponderante importanza in questa determinazione sono: la natura e l'andamento del fondo marino, il regime dei venti e delle correnti, il moto ondoso, le oscillazioni di lungo periodo e il trasporto litoraneo di sedimenti. (Treccani)

Le attuali strutture portuali sono di norma caratterizzate da un settore esterno di imbocco (o da un canale di accesso) dotato di eventuali opere di protezione, da un avamporto e da un porto interno.

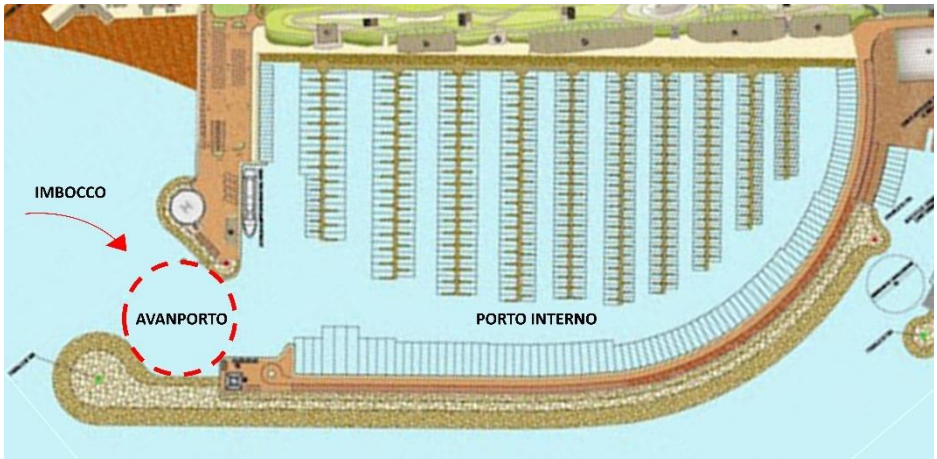

Figura 1.15 Settori di un Porto
(Figura estratta dal sito www.interprogetti.net)

1.3 Opere di difesa dei Porti

Le opere di difesa dei porti, definite frangiflutti, sono realizzate come ostacolo fisico alla propagazione delle onde, in modo da limitarne l'ingresso nei bacini interni. Esse smorzano il moto ondoso limitando il trasporto solido litoraneo e in questo modo si riducono indesiderati effetti di erosione o accumulo di sedimenti. Le tipologie strutturali principalmente utilizzate sono due: dighe e moli. Se la struttura è distaccata da terra e non crea una barriera fino al fondale si parla di diga, mentre se la struttura è radicata a terra si parla di molo.

In questo modo si protegge l'ingresso al porto e le aree di manovra delle navi dal moto ondoso; si offre così un riparo nelle situazioni di maggiore criticità operativa, come tempeste e forti mareggiate. In generale, le opere di difesa spondale hanno una forma allungata in direzione sub-parallela alla costa e, una sezione trapezoidale o rettangolare con altezza e dimensioni progettate in base alle caratteristiche del moto ondoso. In base agli aspetti strutturali ed alle modalità realizzative e di funzionamento, i frangiflutti si possono suddividere nelle seguenti tipologie:

- **a scogliera o a gettata,** dissipano l'energia del moto incidente provocando il frangimento. Le dighe a scogliera, o frangiflutti a scogliera, vengono realizzate prevalentemente quando i fondali non sono molto profondi. Esse hanno lo scopo di resistere alle intense sollecitazioni ondose. Infatti, la ridotta profondità fa sì che le onde si ritrovino in zona frangente, quindi con un'elevata energia, capaci di esercitare notevoli pressioni che risulterebbero eccessivamente gravose per le opere a parete verticale. La dissipazione dell'energia dell'onda incidente è ottenuta principalmente per effetto delle asperità e dei vuoti esistenti fra masso e masso; in fase di progettazione, quindi, vanno assicurate le corrette condizioni di permeabilità e di stabilità della struttura, nonché il corretto concatenamento degli elementi che la compongono.

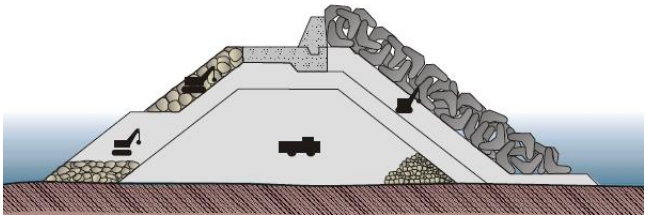

Figura 1.16 Sezione di una diga a Scogliera
(APAT, 2007)

- **a parete verticale o riflettenti**, provocano la riflessione del moto ondoso e quindi sono sottoposte a modeste sollecitazioni dinamiche. Si opta per questa soluzione quando si hanno fondali di profondità elevata, così poi il lato interno viene attrezzato in modo da permettere l'ormeggio delle imbarcazioni. Nel caso sia possibile escludere il frangimento dell'onda a ridosso o a breve distanza dalla parete, si può considerare un comportamento del muro perfettamente riflettente. Si tratta di strutture a pareti verticali o sagomate lato

mare, poggiate su una piattaforma composta di materiale lapideo realizzata sul fondale. (APAT, 2007)

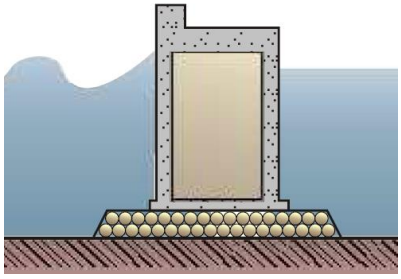

Figura 1.17 Sezione di una diga a parete verticale (APAT, 2007)

L'eccessiva pendenza del fondo dei laghi montani può rendere irrealizzabile un accumulo stabile di materiale gettato alla rinfusa. Dunque, è necessario considerare strutture economiche realizzabili anche per profondità elevate, al fine di attenuare le altezze delle onde incidenti e dissiparne l'energia in eccesso. Tra queste si annoverano le seguenti possibili soluzioni

Oltre alla stabilità strutturale e geotecnica dell'opera deve essere verificata anche la sua funzionalità idraulica (prestazioni in termini di riflessione, diffrazione, trasmissione e tracimazione del moto ondoso), la quale deve essere valutata congiuntamente all'uso che si intende attribuire all'eventuale banchinamento interno del porto e al rispetto delle norme sulla sicurezza di persone e cose durante eventi meteomarini estremi. Un riferimento di base per le suddette norme sono le "Istruzioni tecniche per la progettazione delle dighe frangiflutti" emanate nel 1994 dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. Valori raccomandati della altezza d'onda significativa ammissibile all'interno del porto (con periodi di picco spettrali compresi tra 2 e 8 s):

- condizione di "comfort" (particolarmente importante nel caso di porti in cui si prevede la presenza prolungata di persone a bordo delle imbarcazioni). Per tali condizioni si suggerisce Hs = 0.15 m per eventi con frequenza massima complessiva indicativamente non superiore a 5 giorni/anno;
- condizione di "sicurezza", Hs = 0.30 m per eventi con periodo di ritorno indicativamente non inferiore a 5 anni;
- condizione "limite", Hs = 0.50 m per eventi con periodo di ritorno indicativamente non inferiore a 50 anni.

La sicurezza dell'ormeggio è anche funzione della direzione di propagazione del moto ondoso all'interno del porto e del sistema di ormeggio. Essa risulta più favorevole per direzione di propagazione parallela all'asse longitudinale dell'imbarcazione e/o per ormeggio con finger laterale. In questi casi, i valori suddetti possono essere aumentati a discrezione del progettista (comunque mai oltre il 50%). Una particolare attenzione deve essere rivolta alla previsione di fenomeni di risonanza del moto ondoso, possibile anche tramite l'ausilio di appositi modelli matematici. (AIPCN_PIANC Associazione internazionale di navigazione Sezione Italiana, 2002)

In questo studio si pone particolare attenzione ai cassoni parzialmente immersi supportati su un sistema di pile, come mostrato in Figura 1.18 Rappresentazione schematica di un cassone parzialmente sommerso sostenuto da file di pile, che possono essere utilizzati come frangiflutti. Esso viene considerato un sostituto valido ed economico ai frangiflutti convenzionali, in particolare per i porti dedicati alla pesca, i porti turistici e le coste ricreative, ecc., dove i requisiti di tranquillità dello specchio liquido sono bassi (Koraim, 2005)

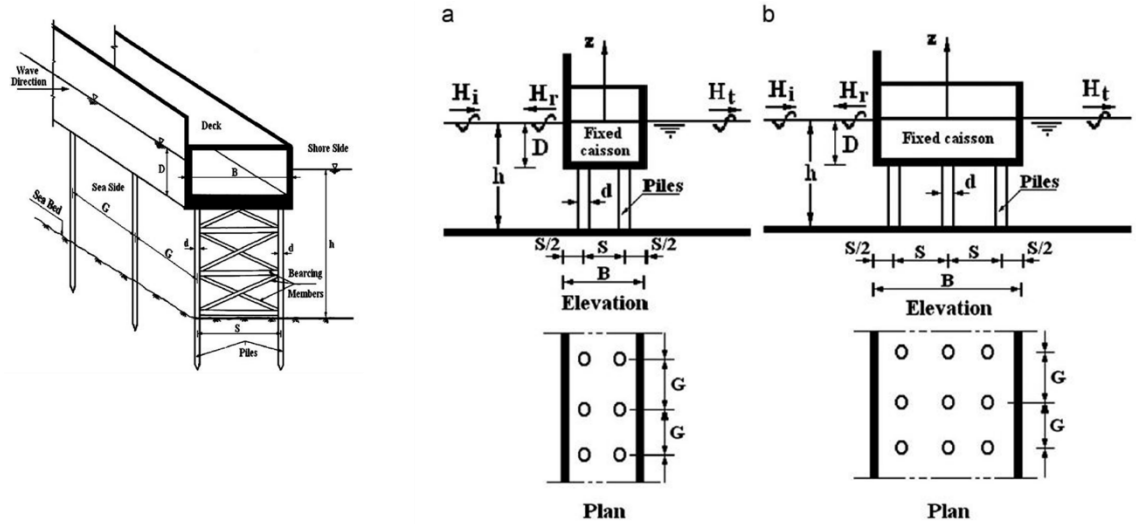

Figura 1.18 Rappresentazione schematica di un cassone parzialmente sommerso sostenuto da file di pile (Figura estratta dal sito: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2009.06.009)

Tale tipo di frangiflutti è fabbricabile e installabile rapidamente utilizzando chiatte galleggianti. I vantaggi importanti di questa tipologia è che sono economici rispetto agli altri tipi comunemente usati, hanno meno costi di manutenzione, sono di facile costruzione e possono essere utilizzati in aree in cui prevalgono cattive condizioni del suolo. Inoltre, questo tipo di soluzione può essere considerata adatta in acque profonde. Altri vantaggi includono la continua sostituzione delle masse d'acqua dell'area costiera che, a sua volta, riduce gli impatti dell'inquinamento costiero. Infine, questa tipologia di frangiflutti può essere utilizzata direttamente per l'attracco. (Suh K.-D., Park J., Park W.-S., 2006)

1.4 Caratteristiche del "Nuovo Porto Turistico" di Stresa

Il Nuovo Porto Turistico è un porto a bacino protetto dalla diga foranea rivolta verso Nord, con l'imbocco per le imbarcazioni a Ovest. Nella parte interna, lo specchio d'acqua protetto è stato attrezzato con dei pontili galleggianti necessari per l'attracco delle imbarcazioni. Proprio uno di questi, quello verso la strada, per effetto del forte moto ondoso generatosi durante la burrasca, ha subito il danneggiamento dei supporti che lo tenevano fissato agli ancoraggi, vincolando così l'utilizzo del porto fino ad oggi.

Figura 1.19 Nuovo porto turistico di Stresa
(Figura estratta da Google maps)

Il Porto è completamente artificiale ed è situato a pochi metri dal centro cittadino. Si estende per circa 200 metri lungo Corso Italia (SS33), all'altezza di Via San Michele. La forma planimetrica del molo di protezione è schematizzabile in tre parti principali con raccordi circolari. C'è il tratto legato alla costa di forma triangolare, che si estende in direzione ortogonale al lungolago per circa 3 m. Segue il raccordo circolare, il quale creando un angolo di circa 100°, porta al tratto collocato più al largo, che è anche quello più lungo di circa 105 m e largo di 5 m. Quest'ultimo è disposto in modo sub-parallelo al lungolago tale da opporsi alla direzione di propagazione delle onde, pertanto è il tratto che offre maggiore protezione al molo. Segue, creando un angolo di 120°, il tratto più a Ovest che va a formare l'imbocco. La massima distanza tra il molo e la costa è di circa 50 m.

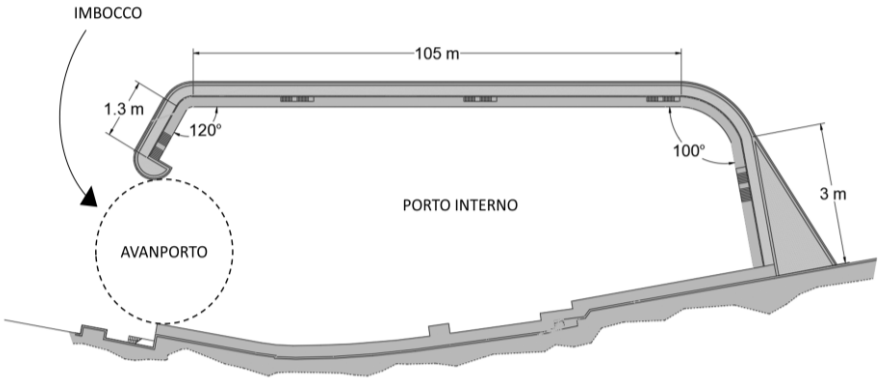

Figura 1.20 Planimetria Nuovo porto turistico di Stresa
(tavole di progetto)

Dal punto di vista strutturale, come si può osservare dai disegni progettuali (si veda come esempio la Figura 1.21), il molo è una costruzione in muratura, sorretta su pali in calcestruzzo dal diametro di 120 cm. In corrispondenza del molo il fondale ha una quota media di 184 m s.l.m. e il manufatto pone il camminamento a quota 190.5 m s.l.m. La muratura non arriva fino al fondale ma copre solo la parte superiore dei pali di fondazione con 30 cm di spessore. Nella parte sottostante sono state aggiunte delle lamiere metalliche forate (si veda come esempio la Figura 1.22), di altezza pari a 250 cm, spessore di 1.1 cm e con fori dal diametro pari a 1.7 cm.

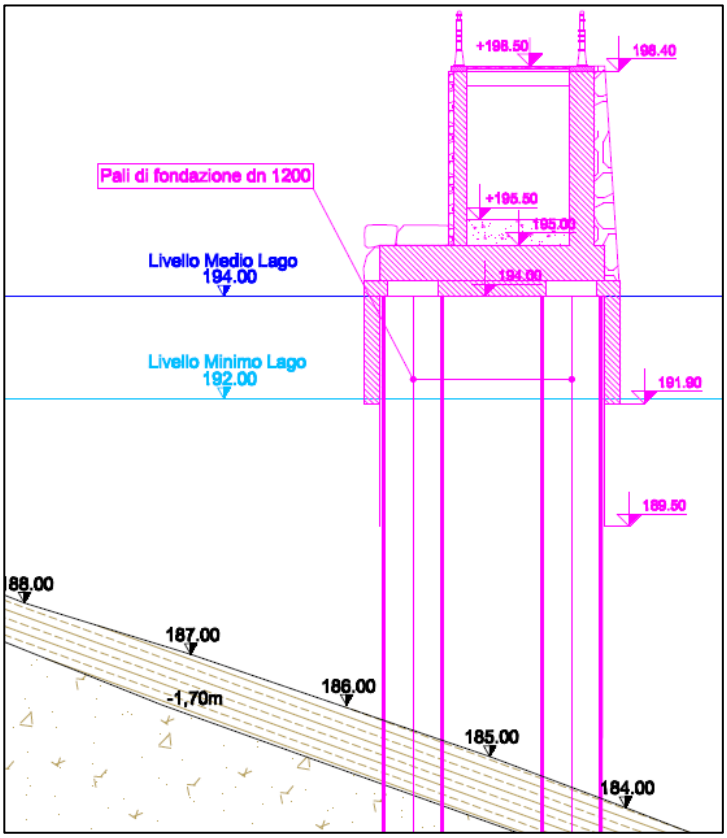

Figura 1.21 Sezione tipo Nuovo porto turistico di Stresa (tavole di progetto)

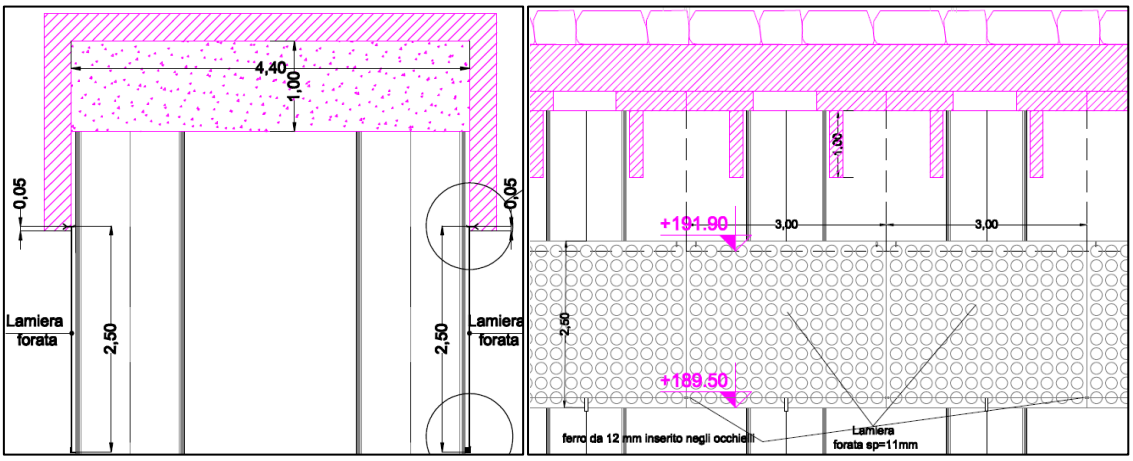

Figura 1.22 Lamiera metallica (tavole di progetto)

1.5 Possibili soluzioni

Nel seguente paragrafo verranno elencati vari interventi per la difesa portuale al fine di individuare una possibile soluzione al problema progettuale studiato ed illustrato in questo elaborato.

- *Banchine antiriflesso:* consiste in una quantità significativa di massi accumulati all'interno del porto per dissipare l'energia dell'onda che entra. Questa soluzione è utilizzata dalla maggior parte dei porti in giro per il mondo, anche se occupano una parte significativa dello spazio interno del porto.

Figura 1.23 Una classica barriera per l'assorbimento delle onde costituita da massi ciclopici

- *Cassoni combinati:* consiste in un cassone di cemento con ampi spazi vuoti e una pendenza porosa all'interno, dato dalla combinazione tra cassone perforato e massi disposti alla rinfusa. Un tale cassone ha il vantaggio di non richiedere troppo spazio orizzontale e, attraverso il tumulo di macerie interno, dà la possibilità di controllare la riflessione delle onde. Questo tipo di cassone è stato applicato per l'allargamento di vari porti.

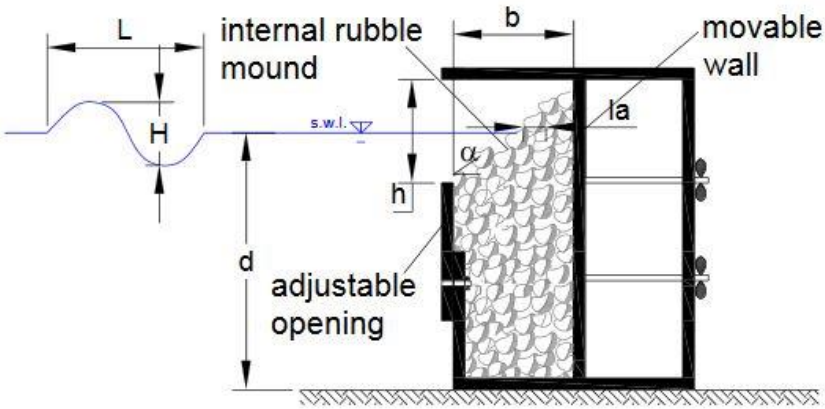

Figura 1.24 Un cassone combinato per l'assorbimento delle onde all'interno di un porto

- *Strutture in blocchi di calcestruzzo:* consistono in strutture fatte da blocchi sovrapposti che assorbono una frazione dell'energia delle onde per turbolenza, attrito viscoso o risonanza. È importante valutare le prestazioni idrauliche di queste strutture in termini di riflessione dell'onda in funzione dei parametri dell'onda incidente (altezza dell'onda, periodo e profondità dell'acqua) e dei parametri geometrici della struttura quali la porosità, il numero, la larghezza o lunghezza delle camere create dai blocchi. Tuttavia, alcuni dei processi coinvolti nella dissipazione dell'energia delle onde sono ancora poco descritti, principalmente per la mancanza di dati sperimentali (Rousset 2002), nonostante sia ben noto che le soluzioni che si sono dimostrate efficaci funzionano in teoria ma devono essere testate da un modello prima dell'applicazione (Liu et al. 2007).

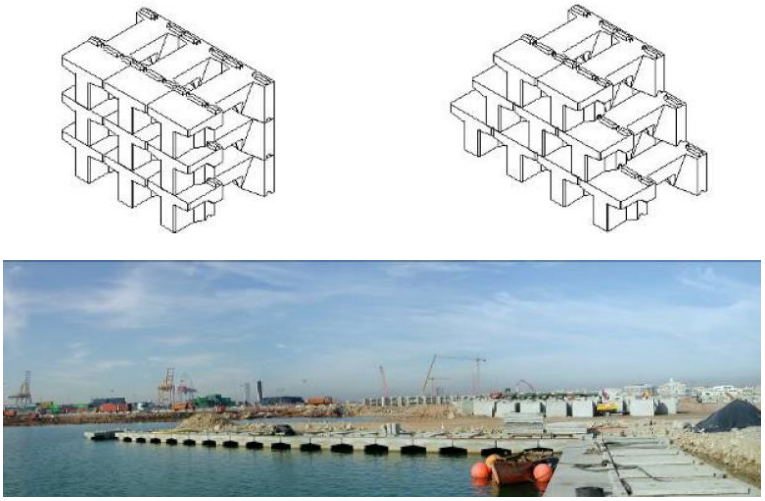

Figura 1.25 I blocchi tipo BARA Berenguer, J.M., Arana, M. (2002)

- *Strutture in calcestruzzo sagomato*: consistono in pareti permeabili che incorporano una o più camere separate da pareti semipermeabili, in cui l'energia delle onde può essere dissipata. Considerando lo schema a una camera di Jarlan, le onde che si infrangono sul frangiflutti verticale sono in parte riflesse dalla faccia anteriore esterna e in parte trasmesse alla camera interna. L'onda trasmessa viene quindi riflessa dalla faccia posteriore, subendo nuovamente perdita di energia e riflessione nel suo passaggio attraverso il muro permeabile.

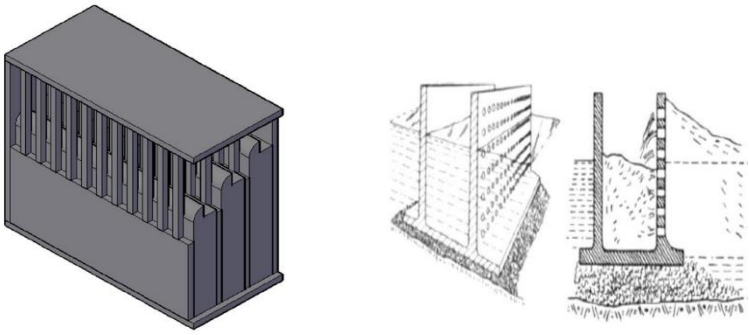

Figura 1.26 Parete verticale 3D del tipo LOWREB, parete perforata di tipo Jarlan

2 Caratterizzazione idraulica

2.1 Il lago Maggiore

I laghi italiani rappresentano un'importante meta turistica per la loro bellezza paesaggistica. Nel tempo, la forte urbanizzazione nelle aree circoscritte ai laghi ha generato un aumento della domanda del trasporto pubblico locale. Da qui l'importanza, sempre più crescente, del servizio offerto dalla navigazione, i cui battelli collegano le sponde dei laghi. (Gestione navigazione laghi Italia, 2015)

Uno dei più noti è il lago Maggiore (o chiamato anche Verbano), le cui sponde a Est sono in Lombardia, quelle a Ovest in Piemonte, mentre la parte a Nord è in Svizzera. Nel bacino imbrifero del lago Maggiore risiedono oltre 600.000 abitanti, a cui si aggiungono 12 milioni di turisti al giorno. Tale risorsa idrica, inoltre, deve soddisfare una molteplicità di utenze tra cui la pesca professionale e sportiva, la balneazione, la navigazione, l'approvvigionamento idro-potabile, l'irrigazione e la produzione di energia elettrica. (Problemi di qualità nelle acque lacustri italiane, 2005) L'agglomerato urbano a ridosso della fascia costiera, data la presenza di 44 comuni che promuovono il turismo, comporta un'elevata pressione antropica come la presenza di passeggiate pedonali, aree portuali, alberghi, attività commerciali e anche di ville private, le quali sono quasi sempre accompagnate da giardini che si sviluppano fino all'acqua e che impediscono così l'utilizzo pubblico della riva. (V.Roella, F.Elvio, 2008)

Di origine glaciale, il suo bacino si è formato in una valle fluviale preesistente. È situato ad un'altitudine di 193,8 metri s.l.m., ha una superficie di 212 km² di cui circa l'80% è situata in territorio italiano e il rimanente 20% in territorio svizzero, con uno sviluppo totale del suo bacino imbrifero di quasi 6600 km^2. Il lago Maggiore è costituito da tre bracci disuguali che si irradiano da un unico centro: il braccio nord-est fa capo a Locarno, dove riceve le acque del Ticino (principale immissario), del Maggia e del Tresa; il braccio delle Isole Borromee, dove riceve le acque del Toce; il braccio meridionale, alla cui estremità riprende il suo corso il Ticino (maggiore emissario). (Sport Club Renese, 2013) È il secondo lago in Italia per estensione con una lunghezza di 66 km e sviluppa 174 km di costa; ha una lunghezza massima di 12 km tra Cerro e Fondotoce ed una larghezza minima di 2 km tra Angera ad Arona. (Guido Cattaneo, 2005)

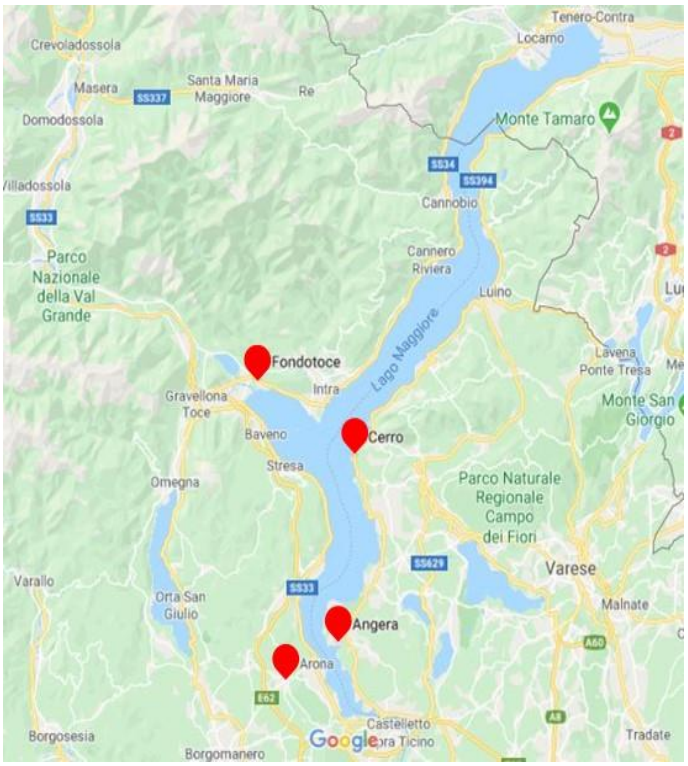

Figura 2.1Mappa Lago Maggiore
(Foto estratta da Google Maps)

Il volume d'acqua contenuto è pari a 37,5 miliardi di mc di acqua con un tempo teorico di ricambio pari a circa 4 anni. I fondali del lago Maggiore sono mediamente bassi al sud, nella zona di Sesto Calende, al nord nella Svizzera e al centro, nel golfo tra Pallanza e Bevano. Nelle rimanenti zone, invece, i fondali sono elevati con un massimo di 372 metri di profondità in latitudine di Porto Valtravaglia, circa in corrispondenza del centro del lago (al largo di Ghiffa). La profondità media è di circa 177 m. (Guido Cattaneo, 2005)

Superficie	208 km² a 193,00 metri
	212 km² a 193,20 metri
	231 km² a 197,00 metri
	254 km² a 200,00 metri
Volume	37,5 km³ a 193,20 metri
Perimetro	174 km
Profondità massima	372 metri
Profondità media	177 metri
Bacino imbrifero	6598 km²
Apporto d'acqua	0,65 km³ di acqua ogni 100 mm di precipitazioni
Livello medio massimo	194 metri s.l.m.
Livello medio minimo	193,20 metri s.l.m.
Livello di guardia	195,00 metri s.l.m.
Livello di inizio danni	195,50 metri s.l.m.
Livello minimo	192,00 m s.l.m. (soglia della diga)
Indice di sinuosità	3.07
Tempo teorico di rinnovo delle acque	circa 4 anni

Tabella 2.1: Caratteristiche morfologiche del lago Maggiore (Wikipedia, 2020)

Con riferimento alla Figura 2.2 s'intende illustrare quali sono le brezze e i venti che interessano il lago maggiore. Responsabili di piccole increspature della superfice libera, le brezze sono:

1. Tramontana
2. Inverna
3. Cannobbio
4. Intragnola
5. Cavandonera
6. Bozzasca
7. Ernina
8. Mercuraghina

Tra i venti occasionali e più impetuosi, che invece generano notevoli moti ondosi, ci sono:

9. Valmaggino
10. Montecenerino
11. Maggiore
12. Marenca
13. Mergozzo
14. Cuss
15. Comasca

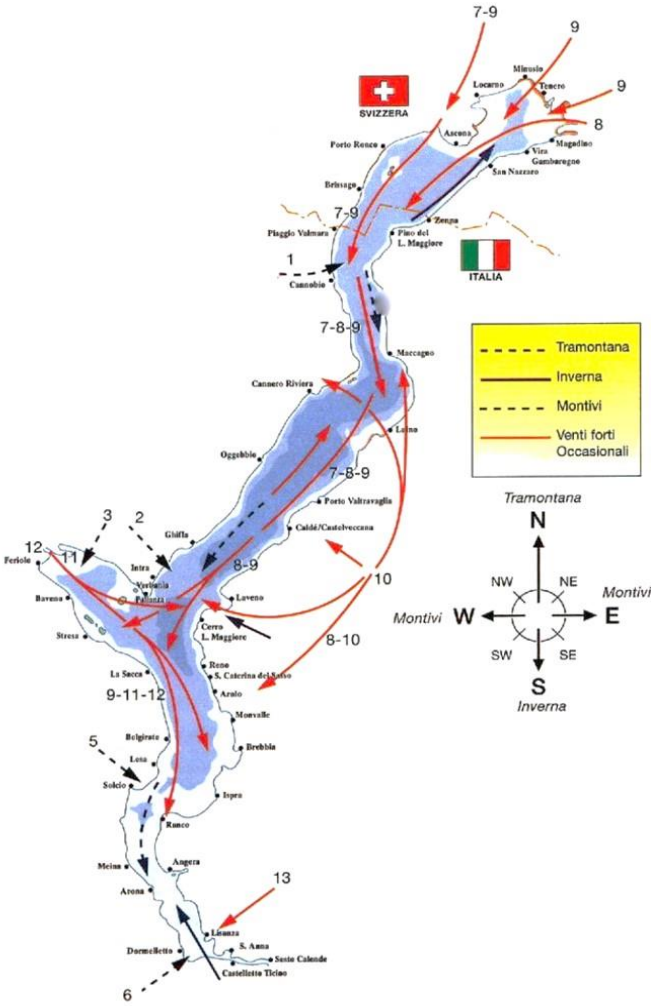

Figura 2.2 Venti del lago Maggiore (Guido Cattaneo, 2005)

"Tutti i paesi della costa hanno un porto comunale che quasi sempre è piccolo, riservato alle imbarcazioni locali. In alcuni casi, nei porti comunali, se indicati, sono disponibili posti di transito. Esistono però alcuni porti turistici a: Laveno, Verbania, Brissago, Porto Ronco, Ascona, Locarno, Minusio, Angera. Inoltre, sulla costa piemontese si trovano molti pontili pubblici dislocati sulle coste o pontili di cantieri a cui si può ormeggiare." (Guido Cattaneo, 2005)

2.2 Limnologia

I laghi sono distese di acqua, per lo più dolce, raccolte nelle cavità terrestri. Il lago è un ecosistema particolare e complesso: ha dei confini definiti e, allo stesso tempo, è fortemente influenzato dal territorio dov'è situato e che ad esso convoglia l'acqua; il suo contenuto in soluti dipende dalle caratteristiche chimiche delle rocce e dei suoli che formano il suo bacino; il clima della regione che lo ospita determina i suoi scambi di materia e di energia con l'atmosfera. Questa complessità fa sì che quando lo studio di un lago è realizzato utilizzando le competenze derivanti da una singola disciplina porta spesso a conclusioni fuorvianti o, addirittura, errate sullo stato e sul funzionamento di un particolare lago.

La Limnologia, scienza che studia i laghi, si occupa del lago come di un organismo unitario e lo deve quindi studiare utilizzando le competenze e i metodi di molte scienze diverse quali la geografia, la geologia, l'idrologia, la meteorologia, la fisica, la chimica, la zoo-logia, la botanica, la microbiologia, la matematica e l'informatica. La Limnologia è, in altre parole, una scienza interdisciplinare perché ricorrendo alle diverse discipline scientifiche studia come funziona l'intero "organismo lago": la parte di crosta terrestre che lo ospita, le piogge che lo alimentano, le sostanze chimiche introdotte dai fiumi, gli animali e i vegetali che ci vivono, ecc. (R.Bertoni, 2018)

2.2.1 Origine dei Laghi

A seconda della loro origine, i laghi assumono morfologia e caratteristiche differenti. Ne deriva la seguente classificazione.

- Laghi tettonici: si formano quando l'acqua va a riempire le fratture della crosta terrestre createsi in seguito al movimento delle placche tettoniche.

- Laghi vulcanici: dovuti al parziale o completo riempimento dalle acque meteoriche o sorgive di cavità come crateri di vulcani spenti (laghi craterici) o depressioni formatesi per lo sprofondamento delle camere magmatiche di vulcani divenuti inattivi (laghi di caldera). Di origine vulcanica sono anche i laghi di sbarramento di vallate formatisi per il consolidamento di colate laviche trasversali alla valle.

Figura 2.3 foto satellitare Lago di Averna (fonte acquedottihirpinia.wordpress.com)

- Laghi di frana: si formano in seguito allo sbarramento di un corso d'acqua per la deposizione dei detriti franati.

- Laghi glaciali: sono laghi che occupano la cavità risultante dell'erosione operata da un ghiacciaio. Sono detti proglaciali, quelli che si originano per la fusione di un ghiacciaio, oppure laghi morenici, ovvero corpi idrici che restano intrappolati dietro alle morene frontali lasciate dal ritiro dei ghiacciai. I laghi glaciali sono molto profondi, spesso hanno grandi dimensioni e sono circondati da colline formate da detriti trascinati a valle dagli stessi ghiacciai.

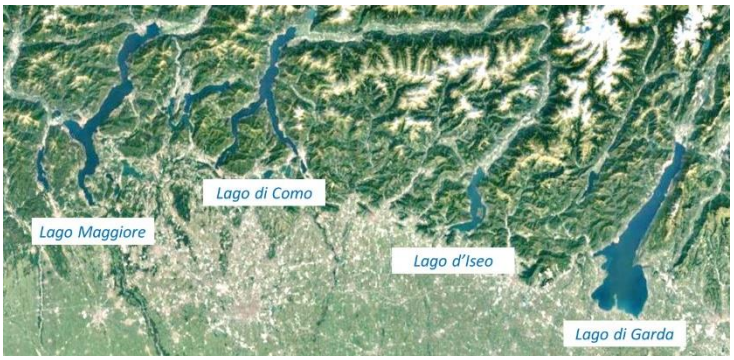

Figura 2.4 Laghi subalpini italiani
(Foto estratta da Google Maps)

- Laghi carsici: si formano a causa dell'opera di dissoluzione dell'acqua piovana dove sono presenti rocce solubili. L'acqua percola su rocce calcaree, il cui fondo si impermeabilizza per l'accumulo di depositi di tipo argilloso, e da vita a laghi di piccola dimensione che spesso durano poco nel tempo.

- Laghi di origine fluviale: se un meandro del fiume viene isolato dal corso principale, spesso capita per la deposizione di materiali alluvionali, vi si può trattenere una raccolta d'acqua denominata lanca.

Figura 2.5: Lanca in Scandinavia
(Foto estratta da Wikipedia)

- Laghi litoranei o costieri: si formano per deposizione, del materiale sospeso nelle acque marine. Quando l'accumulo supera il livello medio del mare forma una lingua sabbiosa allungata, detta cordone litoraneo, questa isola uno specchio d'acqua dal mare aperto che diventa un lago costiero.

- Laghi artificiali: sono laghi creati dall'uomo, solitamente sbarrando fiumi con dighe. Essi vengono creati per la produzione di energia idroelettrica, oppure per usi agricoli e civili.

2.2.2 Dinamica delle acque nei laghi

Per effetto della forza di gravità i fiumi scorrono lungo le linee di massima pendenza del suolo, con una velocità di corrente che tende a diminuire da monte verso valle, subendo anche l'influenza di altri fattori ambientali (per es., aumento di portata per il contributo di affluenti). Quando le acque raggiungono il lago, l'alveo del fiume si amplia notevolmente e la velocità di corrente si abbassa cosicché la gravità non rappresenta il fattore determinante dei movimenti delle acque lacustri, ma assumono un ruolo predominante altre sorgenti di energia: l'energia termica fornita dalla radiazione solare e l'energia meccanica fornita dal vento. Entrambe determinano i movimenti delle masse d'acqua e, quindi, gli scambi tra di esse e l'atmosfera. Pertanto, è di fondamentale importanza considerare le variazioni stagionali di tali sorgenti di energia e la loro influenza sul clima della regione, la chimica delle acque lacustri (in particolare in relazione alla disponibilità di ossigeno) e l'attività degli organismi viventi.

La dinamica delle acque di un lago è resa complessa dalle interazioni tra l'acqua e le forze che ne determinano i movimenti. "Per comprenderla è necessario conoscere le peculiari proprietà fisiche e chimiche dell'acqua, le modalità di penetrazione nelle acque della radiazione solare e in particolare della componente termica, i movimenti delle masse d'acqua lacustri in relazione alle variazioni dell'energia termica disponibile che è funzione delle stagioni e del clima e, infine, i movimenti delle acque per effetto dei venti, che concorrono a determinare le caratteristiche termiche delle acque lacustri." (R.Bertoni, 2018)

Durante l'anno si hanno dei profili termici molto differenti, con periodi nei quali la colonna d'acqua ha una temperatura omogenea dalla superficie al fondo e altri in cui vi è un elevato gradiente termico. La radiazione solare riscalda i primissimi strati d'acqua ma il trasporto del calore in profondità dipende dal lavoro del vento che determina la convezione, cioè quando il trasferimento di calore si realizza attraverso il movimento di una massa di materia riscaldata da un punto a un altro.

Le acque di un lago alla fine della stagione invernale presentano, a tutte le profondità, una uguale temperatura. A partire da queste condizioni, nella stagione primaverile, il mescolamento delle acque generato dall' azione del vento fa si ché l'ossigeno disciolto in superficie arrivi agli strati sottostanti. (R.Bertoni, 2018)

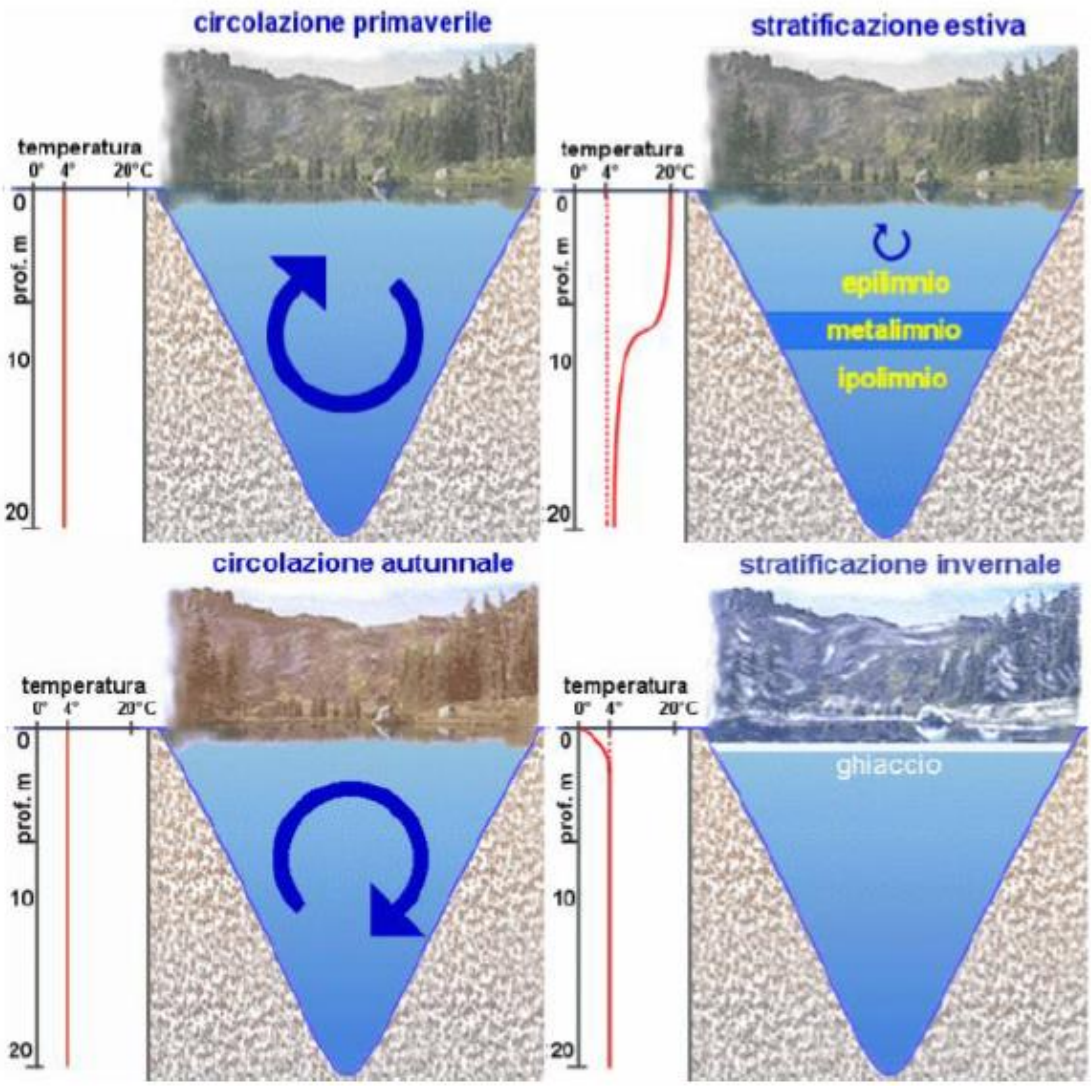

Figura 2.6 Profilo della temperatura e sezione di un lago durante la circolazione primaverile, la stratificazione estiva, la circolazione autunnale e la stratifica-zione invernale. (R.Bertoni, 2018)

Al termine della primavera, l'effetto dell'irraggiamento solare produce un innalzamento della temperatura delle acque superficiali; l'azione del vento potrà esercitare un mescolamento delle acque superiori (più calde e quindi meno dense) con quelle sottostanti (più fredde e quindi più dense). Con l'avanzare della stagione estiva, si accentua il gradiente termico della colonna d'acqua, e quindi si genera una variazione di densità tale da impedire il mescolamento totale dell'acqua ad opera del vento. Si ha nel lago uno strato superficiale caldo (detto epilimnio), uno strato intermedio (detto metalimnio), caratterizzato da un rapido abbassamento della temperatura con il crescere della profondità e, una zona profonda uniformemente fredde (detta ipolimnio). In questa situazione di stratificazione estiva lo scambio di ossigeno tra le acque superficiali e quelle profonde è pressappoco nullo.

In autunno l'acqua superficiale si raffredda, diventa più densa e scende verso il fondo. Lo strato epilimnio si raffredda e si abbassa a discapito del metalimnio che diventa sempre più sottile. Si riduce così progressivamente la differenza di temperatura tra epilimnio e ipolimnio.

Analogamente al periodo primaverile, il vento determina un mescolamento completo della colonna d'acqua (circolazione autunnale). In questa situazione il lago ha una distribuzione uniforme di temperatura ed ossigeno.

In inverno la densità dell'acqua si riduce a causa di un ulteriore raffreddamento: a 0°C si genera uno strato di ghiaccio con densità pari solo a 9/10 di quella dell'acqua che quindi resta in superficie. (R.Bertoni, 2018)

Un lago che, come quello appena descritto, circola due volte l'anno si dice dimittico, tipico di un clima temprato. "A seconda del loro ciclo termico i laghi si possono classificare come:

- Amittici, di tipo polare, nei quali la superficie è costantemente gelata.
- Monomittici, di tipo sub–polare, che presentano la superficie libera dai ghiacci solo per un breve periodo estivo, essi hanno un solo periodo di isotermia e quindi un'unica piena circolazione.
- Dimettici, di tipo temperato, con temperatura superficiale inferiore a 4°C in inverno, e superiore a 4°C in estate. Sono laghi che hanno un ciclo termico come quello illustrato sopra; poiché hanno due periodi di isotermia, e quindi due piene circolazioni l'anno.
- Oligomittici, di tipo sub–tropicale, sono i grandi laghi profondi nei quali la temperatura è sempre superiore, anche negli strati profondi, a 4°C. In essi la piena circolazione non si verifica tutti gli anni. Tuttavia i laghi meno profondi sub-tropicali, in cui si verifica annualmente un solo periodo di isotermia (fine inverno) e quindi una piena circolazione ogni anno, appartengono alla categoria di laghi monomittici.
- Anisomittici, di tipo tropicale con temperatura sempre superiore a 4°C in tutta la massa d'acqua. In questi laghi le differenze di temperatura tra strati superficiali e profondi sono minime durante tutto l'anno." (R.Bertoni, 2018)

2.2.3 Bilancio idrologico di un lago

La valutazione del bilancio idrologico di un lago naturale è assai complessa perché richiede misure e stime di numerosi parametri idroclimatici. Per la maggior parte dei laghi italiani, mancano osservazioni di questo tipo, per cui risulta difficile il calcolo di bilanci idrologici completi. Quando invece si conoscono tutti i parametri idroclimatici, l'equazione completa del bilancio idrologico può essere così espressa:

$$I + R + P \pm S = E + U \pm H$$

dove

I è il volume d'acqua che, in un dato intervallo di tempo, è convogliato nella cuvetta lacustre dagli immissari;

R è il volume d'acqua che giunge direttamente al lago attraverso il ruscellamento sui versanti del bacino;

P è la precipitazione diretta sulla superficie del lago;

S è la quantità d'acqua veicolata attraverso le falde sotterranee o le sorgenti subacquee;

E è l'acqua che evapora dalla superficie del lago;

U è la quantità d'acqua che fuoriesce dal lago attraverso l'emissario;

H il volume d'acqua corrispondente al dislivello fra le superfici lacustri all'inizio ed al termine delle osservazioni, vale a dire l'acqua immagazzinata (segno positivo) o persa (segno negativo).

La determinazione del volume [m3/anno] medio annuo delle uscite (U) è importante perché permette di calcolare il tempo teorico di ricambio (Tr) delle acque del lago:

$$Tr = \frac{V}{U}$$

Dove V è il volume del lago [m^3]. Tr rappresenta il numero teorico di anni affinché tutta l'acqua del lago sia totalmente ricambiata; esso è utile per l'interpretazione dei processi di inquinamento e di eutrofizzazione. Come indicato nella Tabella 2.1: Caratteristiche morfologiche del lago Maggiore , il tempo di ricambio per il lago maggiore è di circa quattro anni.

2.3 Movimento delle acque

Dal paragrafo precedente è evidente che i movimenti dell'acqua in un lago influenzano notevolmente le variazioni termiche della stessa.

Nell'ambiente naturale il flusso dell'acqua può essere:

– laminare (velocità bassa e uniforme, moto unidirezionale)

– turbolento (velocità elevata, moto multidirezionale e caotico).

I diversi fattori che influiscono sulla tipologia di flusso sono: la viscosità e la densità del fluido, la sua velocità e la sezione del condotto attraverso il quale il liquido fluisce; ciò è espresso dal numero di Reynold (Re):

$$Re = (\text{densità} \times \text{velocità} \times \text{sezione}) / \text{viscosità}$$

se $Re < 1000$ si ha un flusso laminare, se $Re > 1000$ si ha un flusso turbolento. Data la conformazione dei laghi, con sezioni profonde, già ad una velocità dell'acqua di pochi mm al secondo si instaura un regime di flusso turbolento.

Il maggiore responsabile del regime turbolento è il vento, che scorrendo sulla superficie libera, dà velocità alla massa d'acqua producendo diversi tipi di movimento: il moto ondoso, le sesse superficiali, le sesse interne e le correnti superficiali di deriva. (R.Bertoni, 2018)

2.3.1 Il moto ondoso

Il moto ondoso è caratterizzato da una sequenza di oscillazioni più o meno ampie e regolari dirette nello stesso verso del vento, senza trasporto di massa fluida. La distanza percorsa dal vento sopra il corpo d'acqua prima di giungere alla terraferma è detta fetch. Più grande è il fetch maggiore è la possibilità di sviluppo di grandi onde. (R.Bertoni, 2018)

Le onde superficiali, inizialmente, appaiono come piccole increspature della superficie libera per effetto del vento e, vengono dette capillari. Esse hanno lunghezza d'onda di qualche centimetro e ampiezza dell'ordine del millimetro. In questa prima fase vi è un'interazione tra l'azione del vento e le forze intrinseche dell'acqua di mare (viscosità e tensione superficiale). Se l'energia del vento è insufficiente a rompere l'equilibrio con queste forze la superficie torna calma, altrimenti, non appena il vento supera determinati valori di intensità e di durata, iniziano a formarsi onde di maggior ampiezza e periodo che possono mantenersi e propagarsi anche se il vento cessa. Se si ignorano gli attriti la gravità è l'unica forza che agisce su questo tipo di onde e quindi queste onde vengono anche dette gravitazionali. L'effetto del moto ondoso è massimo in superficie e agisce sempre meno in profondità: in condizioni di acque profonde, infatti, questo non agisce sul fondale. (G.Trossarelli, 2014)

L'onda si forma perché l'attrito del vento sull'acqua costringe il pelo libero ad incresparsi e, a sua volta, la dimensione dell'increspatura dipende dalla forza del vento, dalla

porzione di superficie lacustre interessata da esso (fetch) e dalla durata della folata. Le parti dell'onda sono: cresta (il punto più alto di un'onda), ventre (avvallamento tra due onde), lunghezza d'onda (distanza orizzontale tra due creste o ventri successivi), altezza d'onda (distanza verticale tra cresta e ventre), frequenza dell'onda (numero di onde che passano per un punto in un certo intervallo di tempo). (R.Bertoni, 2018)

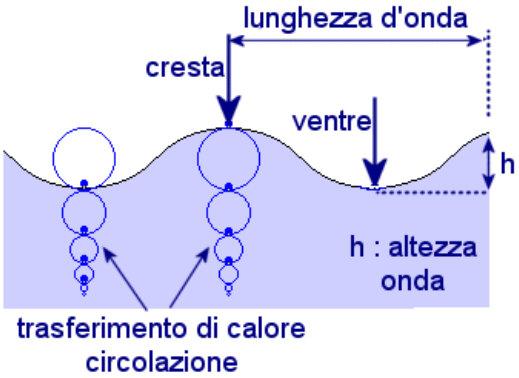

Figura 2.7: Caratteristiche di un'onda
(R.Bertoni, 2018)

L'onda è uno spostamento di energia ma non di acqua. Una goccia d'acqua durante il passaggio di un'onda segue una traiettoria circolare che la riporta al punto di partenza quando questa è passata. Le traiettorie delle particelle d'acqua sono più evidenti in prossimità della superficie, mentre decrescono con la profondità.

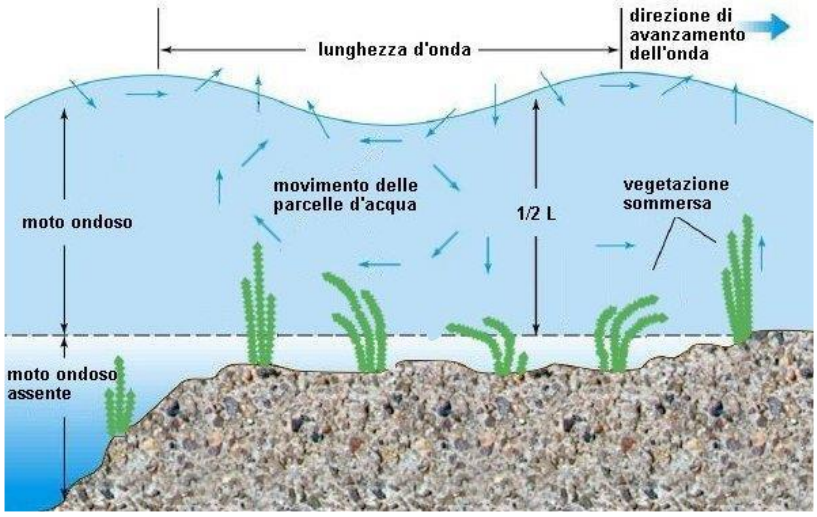

Figura 2.8 Il moto ondoso in acque poco profonde
(R.Bertoni, 2018)

2.3.2 Le sesse

Le sesse superficiali si generano quando il vento soffia costantemente in una direzione, spingendo l'acqua sottstante. Quando il vento si ferma, la massa d'acqua accumulata rifluisce indietro, innescando una oscillazione che progressivamente decresce per effetto dell'attrito e della gravità. Le sesse superficiali nei laghi si manifestano come piccole variazioni del livello, i cui due punti estremi di massima oscillazione sono detti ventri (o antinodi) e il punto centrale, nodo. "Il periodo di una sessa superficiale è l'intervallo di tempo tra due alti o bassi livelli successivi e, per ampiezza si intende il dislivello tra la massima e la minima altezza successiva raggiunta dalle acque. L'entità delle sesse dipende dalla morfologia e dalle dimensioni del lago; nei laghi Maggiore, di Como e di Garda le sesse uninodali, cioè con un singolo nodo, hanno un periodo di poco superiore ai 40 minuti e una ampiezza dell'ordine dei cm. Oltre al fenomeno comune delle sesse superficiali uninodali, si possono avere anche sesse multinodali, generate da periodici aumenti e diminuzioni della pressione atmosferica al centro di un bacino". (R.Bertoni, 2018)

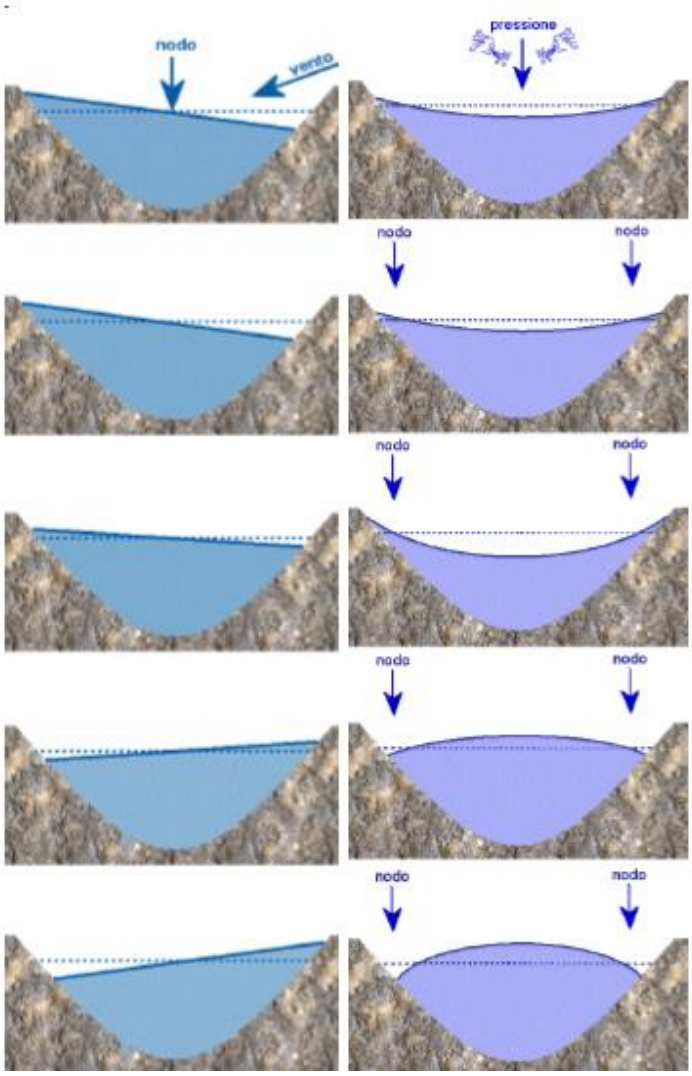

Figura 2.9 Le sesse uninodali e binodali
(R.Bertoni, 2018)

Mentre le sesse superficiali si manifestano quando il lago non è stratificato, le sesse interne si manifestano quando il lago presenta strati d'acqua di diversa densità. Esse non sono visibili in superficie ma coinvolgono strati d'acqua di diversa densità. Quando l'azione del vento s'interrompe, le acque epilimniche tendono a riprendere la loro precedente stratificazione di equilibrio. La superficie che entra in oscillazione è, in questo caso, quella di separazione tra due strati d'acqua sovrapposti di diversa densità e generalmente il fenomeno si manifesta come variazioni di profondità del termoclino stesso, evidenziabile misurando in continuo con una catena di sensori il profilo verticale della temperatura del lago. Sono di solito più ampie e con periodo maggiore delle sesse superficiali e possono essere alte alcuni metri. In laghi di grandi dimensioni (10^2 km^2) il movimento delle sesse interne non è semplicemente una oscillazione pendolare perché le masse d'acqua coinvolte sono soggette alla forza di Coriolis. Il risultato è un percorso circolare (il circolo inerziale) con il flusso indirizzato, nell'emisfero Nord, verso la costa. (R.Bertoni, 2018)

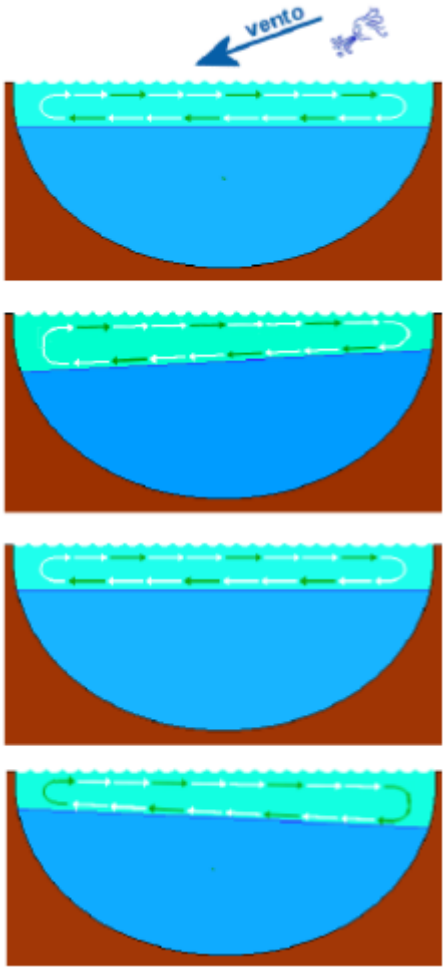

Figura 2.10 Le sesse interne
(R.Bertoni, 2018)

2.3.3 Le correnti (o spirali) di Lagmuir

È una circolazione interna al corpo d'acqua caratterizzata dal fatto che l'acqua tende a muoversi in vortici a spirale. Essi producono zone di upwelling (sollevamento) e downwelling (abbassamento) alternate, con accumulo di schiume che formano striature superficiali approssimativamente parallele alla direzione del vento. (R.Bertoni, 2018)

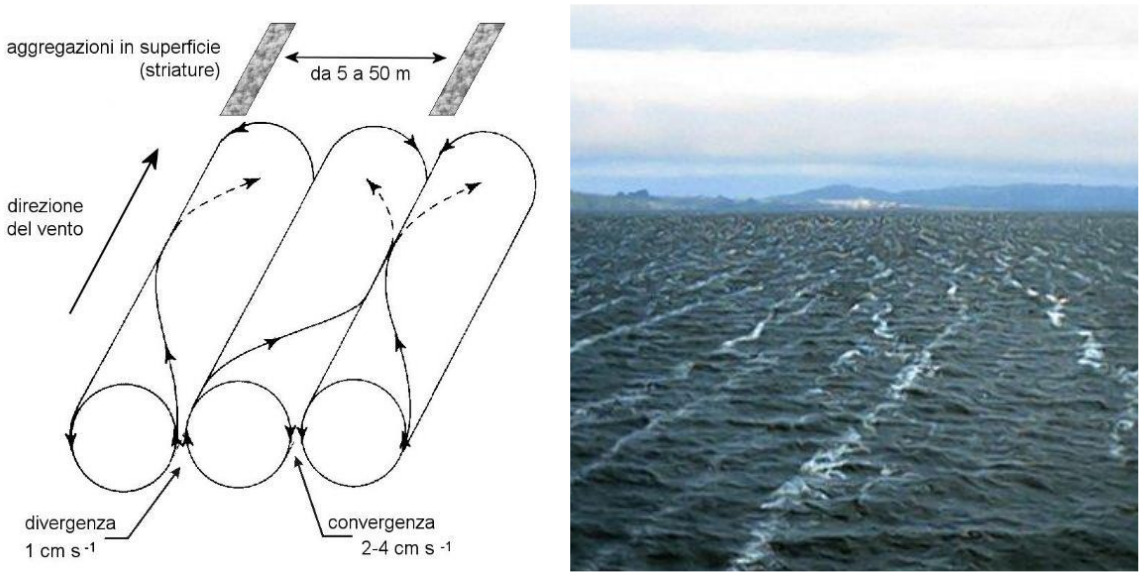

Figura 2.11: Le spirali di Lagmuir
(R.Bertoni, 2018)

2.3.4 Le correnti superficiali di deriva

Sono movimenti non periodici delle acque determinati dal trascinamento nella direzione del vento di massa in lame d'acqua superficiali. L'acqua spostata dalle correnti è rimpiazzata da altra proveniente dalle porzioni di lago circostanti e, soprattutto, dagli strati più profondi e tranquilli, non soggetti all'azione diretta del vento. Si genera un rimescolamento che permane anche quando l'azione diretta del vento è cessata.

Correnti indipendenti dai venti e reperibili anche in profondità nel lago sono le correnti di immissario, generate da acque fluviali, generalmente più fredde (particolarmente in estate), quindi più dense delle acque superficiali lacustri. (R.Bertoni, 2018)

2.4 Teoria del moto ondoso

L'importanza di fluidi come l'acqua e l'aria ha spronato vari scienziati e ricercatori a definire una descrizione matematica capace di spiegare i fenomeni fisici legati al loro comportamento. Tali fenomeni, tuttavia, sono molto complessi da descrivere e lo si può capire dal confronto con i corpi solidi: in questi le molecole sono ben ordinate e possono spostarsi di poco dalla loro posizione, nei fluidi invece, come liquidi e gas, le molecole possono spostarsi ovunque all'interno del corpo, pur interagendo tra di loro.

Nel corso dell'Ottocento fisici matematici come Airy, Boussinesq, Stokes, Lagrange ecc. condussero i primi studi sulle onde marine, ottenendo delle soluzioni intorno alla metà del Novecento.

I vari modelli matematici si basano sulla risoluzione delle equazioni idrodinamiche con particolari condizioni al contorno.

2.4.1 La teoria lineare delle onde superficiali

Questa teoria nota anche come Teoria di Airy, teoria di Stokes al primo ordine, teoria delle onde di piccola ampiezza o più genericamente teoria del primo ordine, descrive il comportamento dell'onda con espressioni semplici. Queste espressioni non vengono sempre perfettamente verificate nella realtà, ma sono di fondamentale importanza perché rappresentano le basi teoriche per modelli matematici più precisi, che però risultano anche essere più complessi.

Si consideri il sistema di riferimento cartesiano posizionato sulla superficie libera, con asse z verticale diretto verso l'alto e asse y normale al piano. Si definisce la profondità locale del fondale h(x) la distanza tra il fondale e la superficie libera e l'elevazione della superficie libera η(x,t) la distanza tra la superficie libera ed il livello indisturbato, concorde con l'asse z.

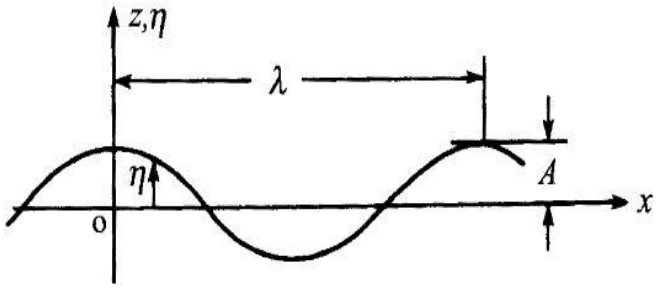

Figura 2.12: superficie libera η(x,t) nel dominio dello spazio z-x
(Onorio, 2010)

all'istante t=0 l'ordinata spettrale vale:

$$\eta_{t=0} = A \cdot coskx$$

dove A è l'ampiezza massima, k è il numero d'onda e x è il valore dell'ascissa. Il numero d'onda è collegato all'ampiezza d'onda mediante la relazione:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

La generica espressione per l'ordinata spettrale in un'onda sinusoidale continua che si muove a velocità c nella direzione positiva è:

$$\eta(x,t) = A \cdot cosk(x - ct)$$

A questo punto, se si pone x = 0 e si considera la variazione dell'ordinata spettrale, si avrà che η varierà dal suo valore massimo (positivo in z) al suo valore minimo (negativo in z). Durante questo percorso η passerà per l'origine, assumendo valore pari a zero. Si ha:

$$\eta_{x=0} = A \cdot cos(-kct) = A \cdot cos(kct)$$

Quindi illustrando η nel dominio dello spazio e in quello del tempo si può osservare quanto detto finora. Il profilo risulta di forma sinusoidale sia nel dominio dello spazio che nel dominio del tempo.

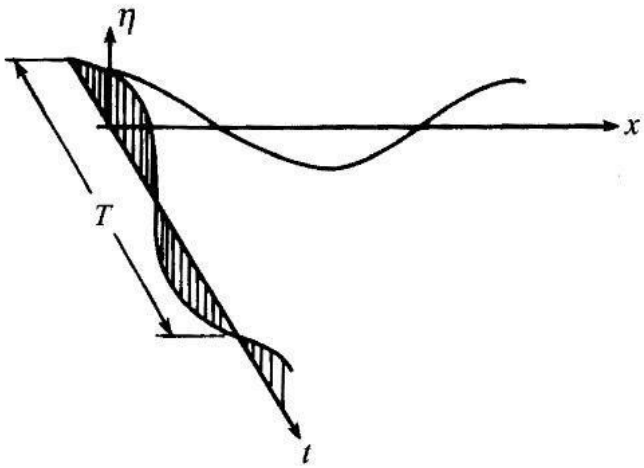

Figura 2.13 superficie libera η(x,t) nel dominio dello spazio z-x e del tempo z-t (Onorio, 2010)

Il significato di kct è il seguente:

$$kct = 2\pi\frac{t}{T}$$

dove **T** è quel particolare valore di t in corrispondenza del quale il coseno di kct diviene unitario. La quantità T, come noto, prende il nome di periodo. Il periodo è collegato alla frequenza angolare mediante la relazione:

$$kc = \frac{2\pi}{T} = \omega \text{ rad/sec}$$

Si ricava la relazione tra lunghezza d'onda e periodo:

$$\lambda = cT$$

Alla base della teoria lineare delle onde è necessario introdurre le seguenti ipotesi di base:

- Si considera un'onda di pendenza molto ridotta, in particolare si impone la condizione (H/λ) < 100; n deriva che l'ampiezza A della superficie disturbata è molto piccola se confrontata con la lunghezza d'onda λ e la profondità d dal fondale;
- la velocità del fronte (u^2+w^2) /2g è piccola se confrontata con la pressione idrostatica ρgz avendo indicato con u e w rispettivamente la velocità orizzontale e verticale della particella d'acqua;
- la profondità dell'onda d è uniforme;
- l'acqua non è viscosa ed irrotazionale;
- poiché le tensioni di superfice sono basse l'acqua può essere considerata incomprimibile ed omogenea, quindi la densità è costante (ρ=cost);
- le forze di Coriolis dovute alla rotazione terrestre sono trascurabili;
- la tensione superficiale è trascurabile;
- il fondale marino è liscio ed impermeabile;
- la pressione atmosferica al livello del mare è uniforme.

Risolvendo così le equazioni idrodinamiche:

- Principio di conservazione della massa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div(\rho \vec{V})$$

- Principio di conservazione della quantità di moto

$$\rho(\vec{F} - \vec{A}) = gradP$$

La ben nota soluzione del problema a cui è giunto Airy attraverso le varie condizioni al contorno, definisce il moto come moto potenziale:

$$\Phi(x,z,t) = \frac{ag}{\sigma}\frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} cos(kx - \sigma t)$$

dove:

$$\sigma = \frac{2\pi}{T}$$

Dalla condizione al contorno dinamica si ottiene l'elevazione della superficie libera che è descritta da una funzione periodica di altezza a:

$$\eta = a \cos kx - \omega t$$

Dalla condizione al contorno cinematica si ottiene la cosiddetta relazione di dispersione ovvero la relazione tra lunghezza d'onda e periodo:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} tgh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)$$

Si definiscono onde superficiali quelle onde per cui λ < h (essendo h la profondità e λ la lunghezza d'onda). Se invece si ha λ≃h, tutta l'acqua partecipa all'oscillazione ondosa in maniera più o meno accentuata sino al fondo. Quindi, il rapporto h/λ è un numero caratteristico significativo per definire il tipo ed il comportamento di un moto ondoso.

Data questa considerazione è possibile osservare come la relazione precedente varia in base al rapporto h/λ, ottenendo:

- Relazione di dispersione per acque profonde (deep water), per $\frac{h}{\lambda} > \frac{1}{2}$:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi}$$

- Relazione di dispersione per acque poco profonde (shallow water), per $\frac{h}{\lambda} < \frac{1}{20}$:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} tgh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)$$

Con la soluzione di Airy è possibile ottenere varie informazioni su un'onda, come: celerità; campo di moto; pressioni, energia potenziale e cinetica; celerità di gruppo.

Per il presente lavoro è utile osservare le equazioni che definiscono la pressione e le energie:

- Pressione:

$$p = -g\rho z + \rho g\eta \frac{\cosh\left[k(h+z)\right]}{\cosh\left(kh\right)}$$

Questa relazione indica come varia nel tempo la pressione esercitata dall'acqua in presenza di un'onda. Nella seguente immagine si può notare come le pressioni sono maggiori rispetto ad una pressione idrostatica in corrispondenza delle creste, viceversa

la pressione esercitata è minore rispetto a quella idrostatica in corrispondenza dei cavi. Inoltre, questo effetto diminuisce man mano che si va in profondità.

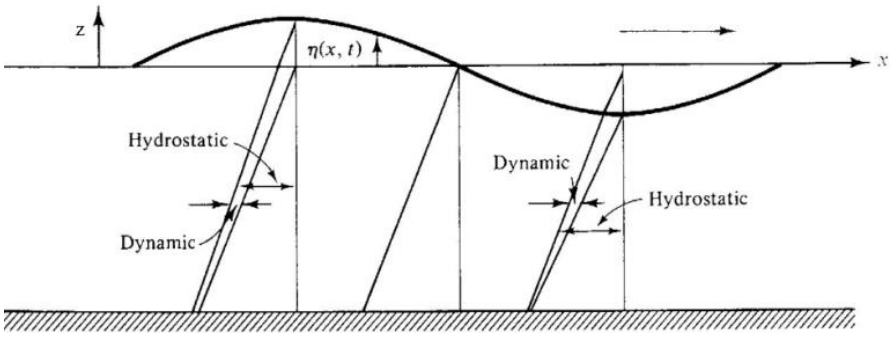

Figura 2.14: andamento della pressione di un'onda lineare
(E.Pugliese Carratelli, F.Dantale)

- Energia Potenziale media per un periodo d'onda

$$\overline{E}_p = \gamma \frac{h^2}{2} + \gamma \frac{\mathrm{H}^2}{16}$$

Si potrebbe pensare che l'energia media sia dovuta solo ad h ma invece come si osserva dall'equazione, va considerato un termine aggiuntivo dovuto ad H.

- Energia cinetica:

$$\overline{E}_c = \gamma \frac{\mathrm{H}^2}{16}$$

- Energia totale dell'onda:

$$\overline{E}_p + \overline{E}_c = \gamma \frac{h^2}{2} + \gamma \frac{\mathrm{H}^2}{8}$$

Nello studio delle difese costiere questa espressione assume notevole importanza. Si nota come H sia elevato al quadrato, quindi l'energia di un'onda aumenta considerevolmente all'aumentare della sua altezza.

2.4.2 Altre teorie

Nel seguente paragrafo si accenna alle teorie non lineari. Nella realtà non tutte le onde sono sinusoidali e quindi si è reso necessario dare una definizione analitica diversa rispetto a quelle di Airy.

Dall'osservazione si vide come la teoria lineare era molto più valida per acque profonde ma andando verso la costa, in acque meno profonde, l'onda si trasformava e tendeva ad avere cavi sempre più allungati e creste più ripide rispetto alla forma lineare di Airy.

Tutte le teorie non lineari, tra cui molto famose sono le approssimazioni di Stokes e Boussinesq, sono riassunte nel diagramma di B. Le Méhauté, di seguito illustrato. Nel

seguente grafico è possibile vedere il dominio di validità di ogni teoria e i limiti di frangimento di un'onda.

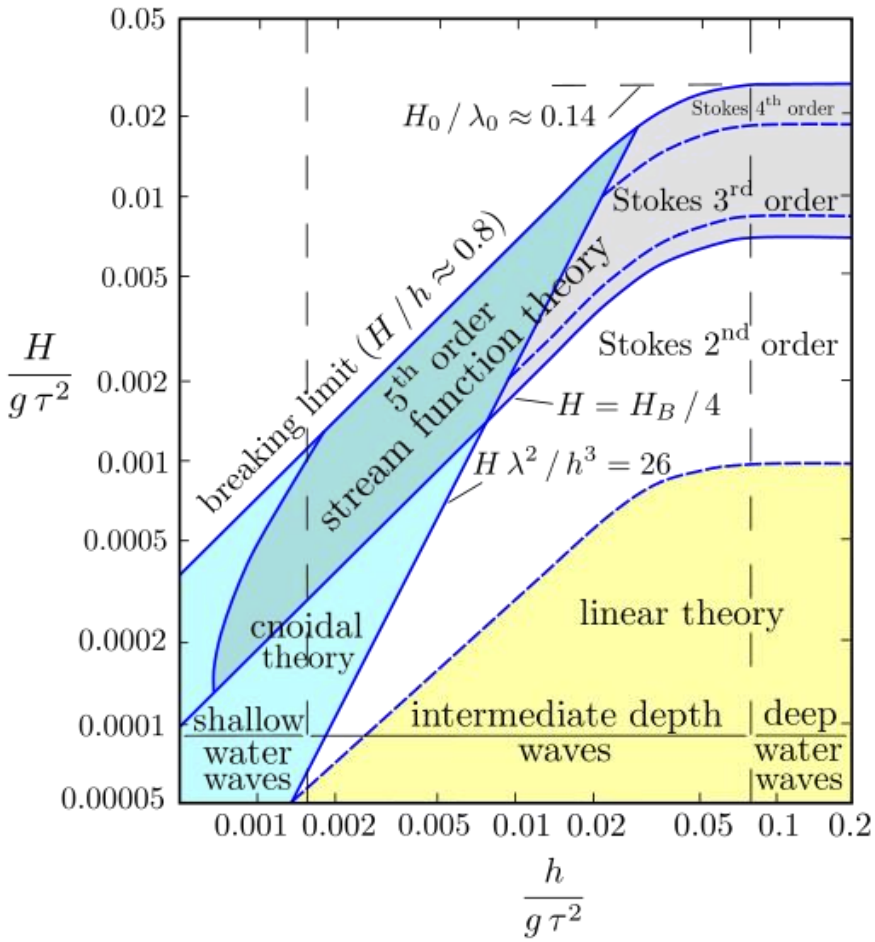

Figura 2.15 Dominio di validità delle teorie delle onde d'acqua.
Diagramma di Méhauté.
(Foto estratta da Wikipedia)

2.4.3 Trasformazione dell'onda

Tra i principali fenomeni di trasformazione di un'onda si annoverano i seguenti:

- Riflessione e trasmissione. Quando un'onda incontra una struttura si può avere una riflessione totale o parziale. Se la struttura è attraversata almeno in parte dall'onda si ha una quota parte trasmessa e una riflessa, invece, nel caso di barriera impermeabile si avrà solo la riflessione e si parla di riflessione totale. Se si trascurano le dissipazioni energetiche si ottiene la seguente uguaglianza:

onda incidente = onda riflessa + onda trasmessa

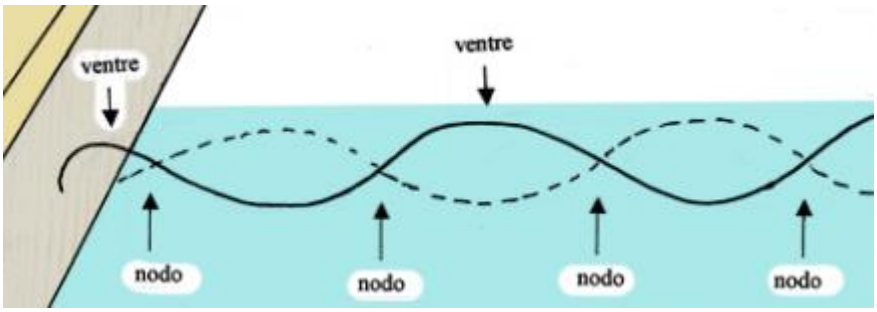

Figura 2.16 Onda riflessa

Nelle aree portuali si possono formare a causa del sommarsi di un'onda incidente con quella riflessa, le cosiddette onde stazionarie. Il termine stazionarie indica la proprietà che queste onde hanno di non muoversi in nessuna direzione; sono caratterizzate da punti in cui non c'è vibrazione, i nodi, e punti in cui l'ampiezza aumenta anche fino al doppio dell'onda incidente, chiamati ventri.

- Rifrazione. Arrivata in acque basse un'onda subisce un rallentamento della velocità di propagazione dovuto alla diminuzione del fondale. Questo provoca una deviazione della direzione di propagazione dell'onda che è la rifrazione. Il fronte d'onda tende a disporsi parallelamente alla costa anche se al largo il fronte d'onda è disposto in direzione differente.

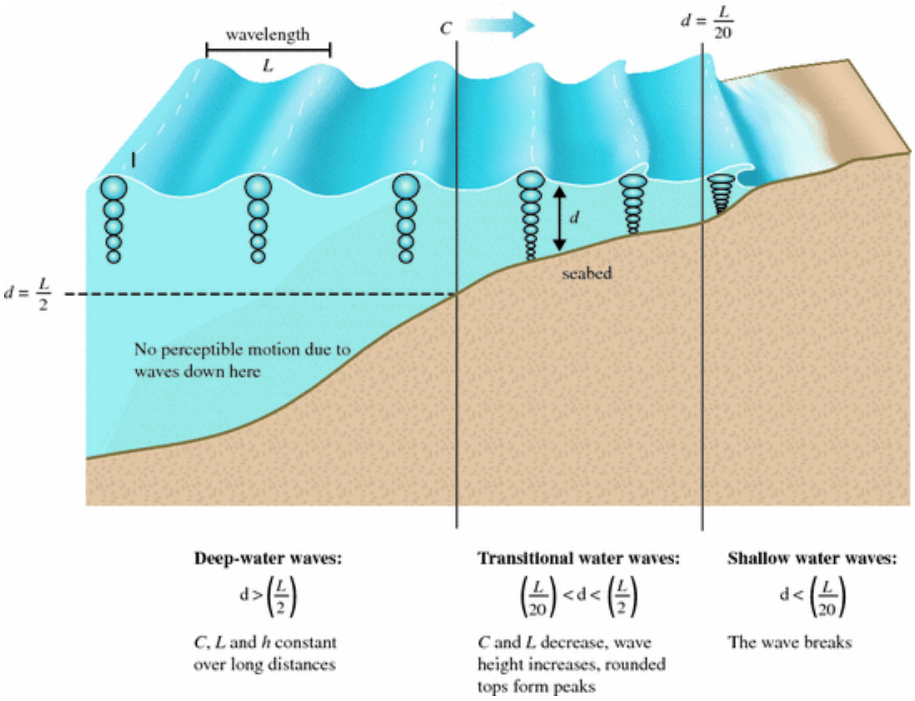

Figura 2.17 Movimento delle particelle d'acqua da acque profonde a poco profonde. (Foto estratta da www.link.springer.com)

Questo provoca una deviazione della direzione di propagazione dell'onda che è la rifrazione. Il fronte d'onda tende a disporsi parallelamente alla costa anche se al largo il fronte d'onda è disposto in direzione differente.

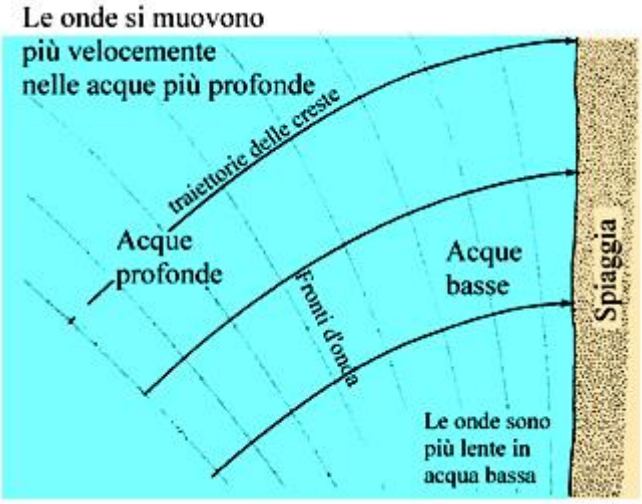

Figura 2.18 Rifrazione di un'onda
(Foto estratta da
http://web.tiscali.it/circoloaquarius/mare.htm)

Nel caso di coste basse non rettilinee, come conseguenza della rifrazione, si hanno i seguenti fenomeni:

- concentrazione del moto ondoso sui promontori;
- dilatazione in corrispondenza di baie ed insenature.

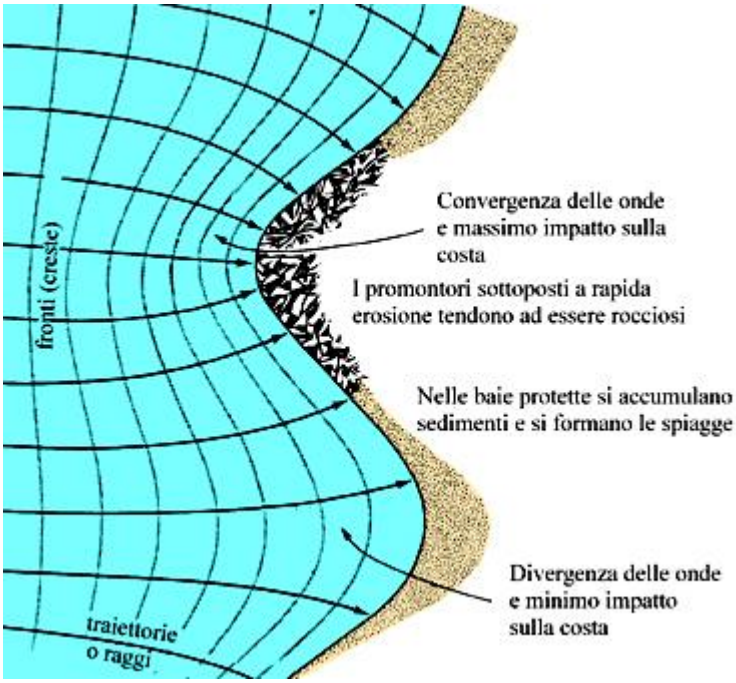

Figura 2.19 Convergenza e divergenza di onde rifratte
(*Foto estratta da http://web.tiscali.it/circoloaquarius/mare.htm)*

- Diffrazione. Anche questo fenomeno riguarda la deviazione della direzione di propagazione di un'onda, ma in questo caso l'effetto non è dovuto al fondale ma alla presenza di un ostacolo, come la presenza di frangiflutti.

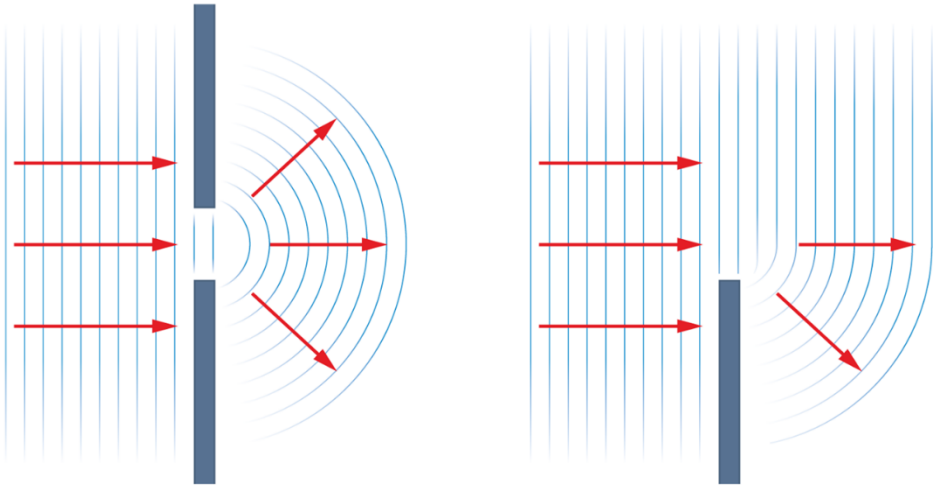

Figura 2.20 Diffrazione onde marine
(Foto estratta da www.roguephysicist.com)

2.5 Metodologia per l'individuazione dell'onda incidente e riflessa

Nel seguente capitolo verrà illustrato uno studio preliminare alle sperimentazioni di questa tesi, svolto dal professore Davide Poggi; il suo scopo è stato di definire l'efficienza del molo e quindi il tempo di ritorno delle altezze d'onde trasmesse nel bacino interno del porto, attraverso l'applicazione di formule empiriche reperibili in letteratura.

L'efficienza dei frangiflutti viene valutata in funzione dei coefficienti di dissipazione dell'energia e di trasmissione e riflessione dell'onda. Mediante il metodo a due punti di Goda e Suzuki (1976) è possibile stimare l'altezza dell'onda incidente (Hi) e riflessa (Hr), mediante due posizioni di registrazione devono essere impostate davanti al modello di frangiflutti. Per misurare le altezze d'onda trasmesse (Ht), una posizione di registrazione aggiuntiva deve essere impostata dietro il modello di frangiflutti ad una distanza prefissata dal lato dei frangiflutti della riva. I coefficienti di riflessione (kr) e trasmissione (kt) possono essere valutati dalle misurazioni nel seguente modo:

$$k_r = H_r/H_i$$

e

$$k_t = H_t/H_i.$$

Parte dell'energia dell'onda incidente viene dissipata e può essere stimata attraverso il coefficiente di dissipazione dell'energia delle onde k_L in funzione dei coefficienti di riflessione e trasmissione:

$$k_L = 1 - {k_r}^2 - {k_t}^2$$

in cui.

In letteratura sono stati studiati molti parametri:

- parametri tipici dell'onda
    - lunghezza d'onda L
    - periodo dell'onda T
- parametri strutturali
    - tiraggio D
    - larghezza del cassone B
    - diametro del palo d
    - lo spazio libero tra le pile G
    - interasse S

L'analisi presenta l'efficienza del frangiflutti sotto forma di relazioni tra i coefficienti di trasmissione, riflessione e dissipazione di energia (kr, kt e k_L). Questa relazione può essere espressa in funzione dei parametri adimensionali caratteristici dell'onda e della struttura:

$$kr, kt, k_L = f\,(B / h, d / B, G / d, D / L)$$

Lo studio che ha indagato il pontone frangiflutti più simile a quello installato a Stresa, ma comunque molto differente come caratteristiche geometriche, è stato condotto da Rageh et al. nel 2009 e pubblicato sulla rivista scientifica Ocean Engineering. L'efficienza del frangiflutti, che consiste in cassoni supportati da due o tre file di pile (Figure 1.18), è stata studiata usando opportuni modelli fisici.

Le caratteristiche di trasmissione, riflessione e dissipazione dell'energia dell'onda sono state studiate per onde regolari di diverse altezze d'onda e periodi e per una profondità d'acqua costante. Le conclusioni salienti tratte dal presente studio sono riportate di seguito.

- Il coefficiente di trasmissione kt si riduce all'aumentare del tiraggio relativo del frangiflutti D/L, diminuendo il rapporto tra il diametro del gap delle pile G/d e aumentando la larghezza relativa del frangiflutti B/h. In questo studio, il coefficiente di trasmissione variava tra 0.75 e 0.03 mentre D/L variava tra 0.01 e 0.24, G/d tra 2 e 9 e B/h è uguale a 1.0 o 15. È possibile ottenere kt inferiore a 0.25 quando D/L > 0.1 per tutti i casi studiati.

- Il coefficiente di riflessione kr aumenta all'aumentare del D/L, diminuendo G/d e aumentando B/h, specialmente quando D/L<0.15. In questo studio, il coefficiente di riflessione kr compreso tra 0.45 e 0.99 per gli stessi intervalli di D/L, G/d e B/h. Il coefficiente di dissipazione dell'energia aumenta leggermente con la diminuzione di D / L, aumentando G/d e B/h.

- L'effetto del diametro della pila sui diversi coefficienti idrodinamici non supera il 5%, e può quindi essere trascurato.

Gli autori hanno sviluppato semplici equazioni empiriche per stimare la trasmissione e la riflessione dell'onda e indicato un buon accordo con i dati sperimentali. Utilizzando i suddetti parametri adimensionali, l'analisi di regressione ed i dati misurati, due equazioni empiriche per stimare la trasmissione e i coefficienti di riflessione sono state sviluppate da Rageh et al, come segue (Rageh, O. S. Koraim, A. S. Salem, T. N., 2009):

$$k_t = 0.646 - 0.108\,\frac{B}{h} - 0.048\frac{d}{B} + 0.013\frac{G}{d} - 3.01\frac{D}{L}$$

e

$$k_r = 0.617 - 0.077\,\frac{B}{h} - 0.076\frac{d}{B} - 0.01\frac{G}{d} + 1.98\frac{D}{L}$$

2.5.1 Applicazione delle formule empiriche al caso del nuovo porto turistico di Stresa

In questo paragrafo vediamo come sono state applicate le formule empiriche al caso del porto turistico di Stresa. I risultati ottenuti sono solo indicativi e non hanno valore progettuale, in quanto le condizioni utilizzate in fase sperimentale dagli autori sono estremamente semplificate (fondo piano ed orizzontale, onde regolari, etc.) e non riproducono adeguatamente le condizioni geometriche ed al contorno del porto di Stresa. Un'analisi quantitativa rigorosa può essere condotta solamente costruendo un modello fisico che riproduca precisamente le condizioni reali del nuovo porto di Stresa. Ciò nonostante, le analisi fatte possono fornire delle indicazioni qualitative molto utili per comprendere l'efficacia della barriera frangiflutti e quali siano i venti ed i livelli che possono portare a condizioni di agitazione interna critiche per le imbarcazioni.

L'analisi che qui si presenta ha ricercato l'efficienza del frangiflutti in termini di coefficiente di trasmissione, kt. Considerando i parametri del nuovo porto B=5 m, d=1.2 m e G=3 m, e sostituendoli nella formula del kt di Rageh at all. scritta al paragrafo precedente si è ottenuto:

$$k_t = 0.667 - 0.108\,\frac{B}{h} - 3.01\frac{D}{L}$$

Il tiraggio e la profondità dell'acqua sono univocamente legati dall'espressione h=D+7.9, dove 7.9 è la distanza, in metri, tra l'intradosso del cassone ed il fondo del lago sottostante in una sezione media. Inoltre, entrambe le variabili sono legate al livello del lago, L_L, in un dato giorno dell'anno come h = L_L - 184 e D = L_L - 184 - 7.9. La precedente espressione può essere riscritta come:

$$k_t = 0.667 - 0.108\,\frac{B}{L_L - 184} - 3.01\frac{L_L - 191.90}{L}$$

Tale equazione risulta particolarmente utile a livello ingegneristico poiché relaziona direttamente il coefficiente di trasmissione della barriera frangiflutti alle due variabili caratteristiche di interesse, la lunghezza d'onda ed il livello del lago.

La lunghezza d'onda, a sua volta può essere legata univocamente, anche se in modo semplificato, alla velocità media del vento attraverso le formulazioni già richiamate in precedenza

$$L = \frac{gT^2}{2\pi}$$

e

$$g\frac{T_{1/3}}{2\pi U^2} = 1.37\left\{1 - \left[1 + 0.008\left(g\frac{F}{U^2}\right)^{\frac{1}{3}}\right]^{-5}\right\}$$

dove T è il periodo dell'onda, F il fetch ed U è la media oraria del vento. La procedura di calcolo inizia con la stima della velocità del vento media ed il fetch (23 km); quindi, si calcola il periodo e, dalla precedente espressione, la lunghezza d'onda. Infine, con il livello del lago

misurato o stimato, si deriva il coefficiente di trasmissione della barriera (compreso tra 0 e 1). Moltiplicando il kt per l'altezza dell'onda incidente scritta come:

$$g\frac{H_{1/3}}{U^2} = 0.30\left\{1 - \left[1 + 0.004\left(g\frac{F}{U^2}\right)^{\frac{1}{2}}\right]^{-2}\right\}$$

Si ottiene l'altezza dell'onda nel porto, senza considerare gli effetti di accumulo energetico dovuti alla riflessione ed alle sesse. Questo tipo di analisi permette di

a) stimare l'altezza delle onde trasmesse all'interno del porto durante uno specifico evento, come fatto per il 25 marzo 2019 in Figura 24;

b) valutare la performance della barriera in condizioni estreme di livello e vento una volta fissato il tempo di ritorno;

c) valutare statisticamente, sulla base dei dati di vento e livello registrati negli anni passati, la probabilità di avere una certa agitazione ondosa nel porto.

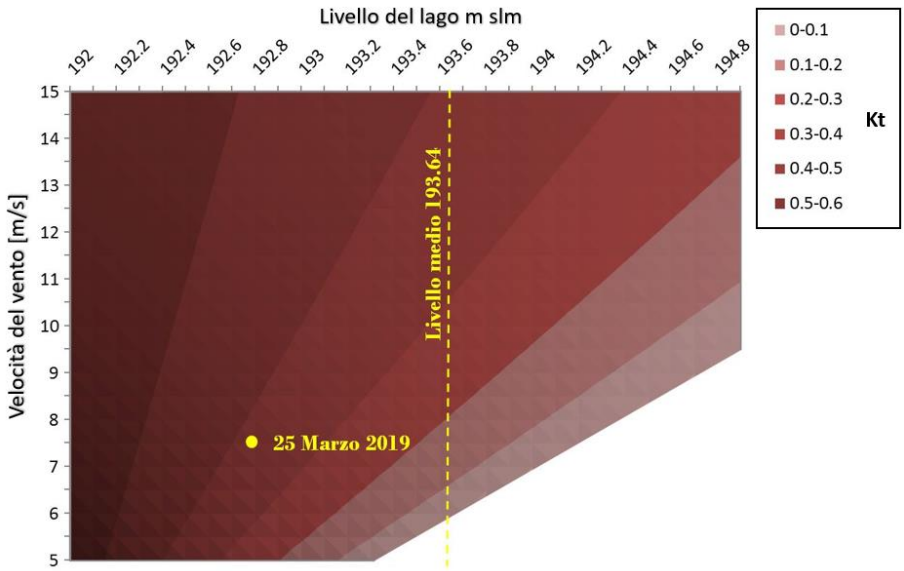

Figura 2.21 Andamento di Kt in funzione della velocità del vento e del livello del lago.

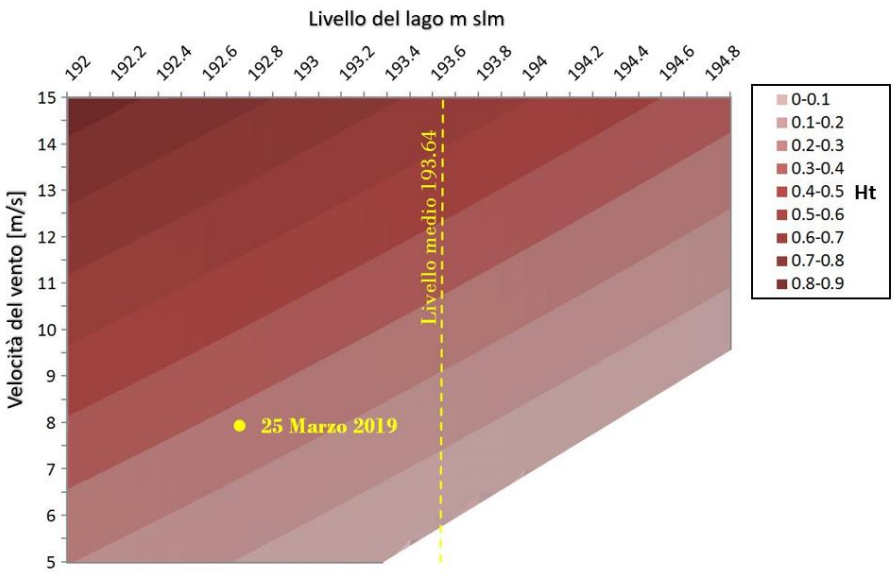

Figura 2.22 andamento di Ht (altezza d'onda trasmessa) in funzione della velocità del vento e del livello del lago.

In particolare, dall'uso dei diagrammi mostrati, si può stimare il coefficiente di trasmissione attraverso la barriera frangiflutti in circa 0.4-0.45 e la conseguente altezza delle onde trasmesse nel porto in 0.3-0,35 m.

2.5.2 Applicazione delle formule empiriche alle serie storiche al fine di valutare il tempo di ritorno delle onde trasmesse in porto attraverso la barriera frangiflutti

Così come fatto per l'evento del 25 marzo 2019, sono state applicate le formule empiriche alle serie storiche, di ventosità e livello, misurate in Pallanza. Sono state utilizzate queste serie poiché sono le più lunghe serie storiche in termini di velocità e direzione del vento e poiché, contemporaneamente, hanno delle letture coerenti del livello del lago.

Si riportano le principali caratteristiche del moto ondoso che possono incidere la barriera frangiflutti del nuovo porto turistico di Stresa, partendo dalla serie storica del massimo giornaliero delle medie orarie delle velocità del vento ed assumendo un fetch di 23 km e tutte le direzioni. Risulta che il periodo si ferma intorno ai 4 secondi e la lunghezza d'onda intorno ai 25 m e che, in tale condizione l'altezza significativa dell'onda non dovrebbe mai raggiungere il metro e mezzo di altezza. Da questi dati è stato possibile, applicando le formulazioni empiriche precedentemente descritte, ottenere i risultati in termini di agitazione ondosa all'interno del porto.

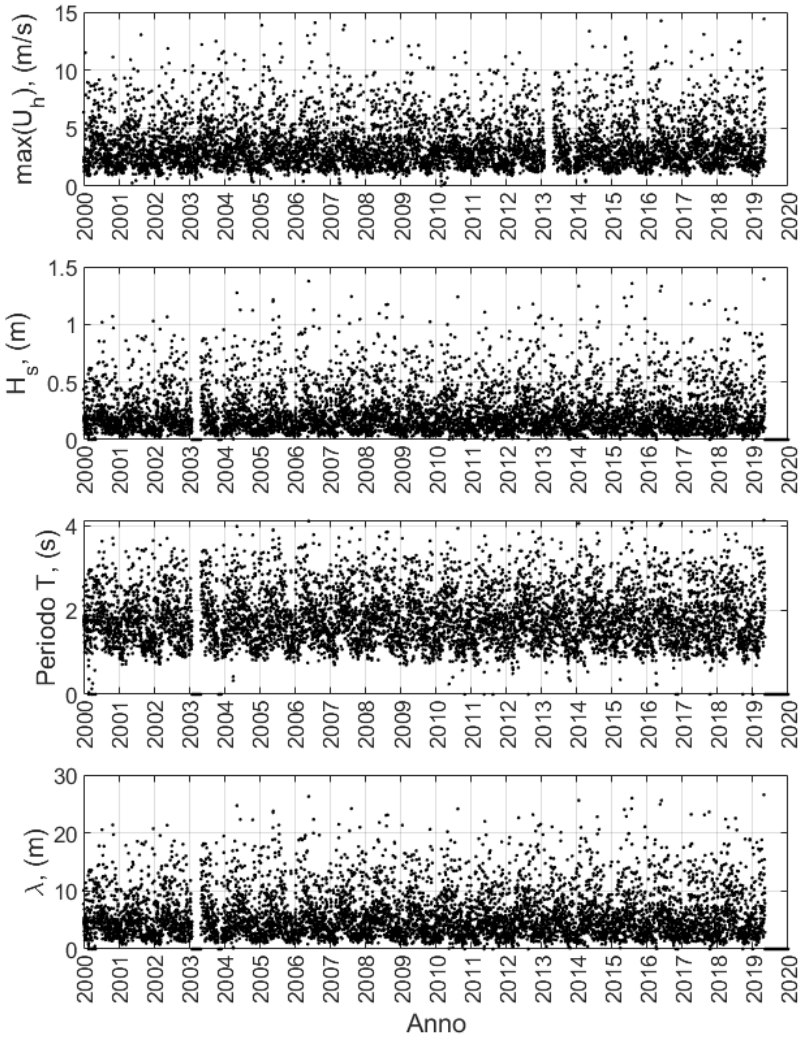

Figura 2.23 Le caratteristiche principali delle onde vive in Stresa in funzione del fetch (23 km) e della velocità del vento (massima giornaliera della media oraria).

Nella successiva figura sono mostrate le serie storiche misurate in Pallanza, dal 2000 al 2019, sia del massimo giornaliero della velocità media oraria del vento che dei livelli del lago. Negli altri due pannelli si mostrano i coefficienti di trasmissione kt, e le relative altezze dell'onda trasmessa nel porto, Ht.

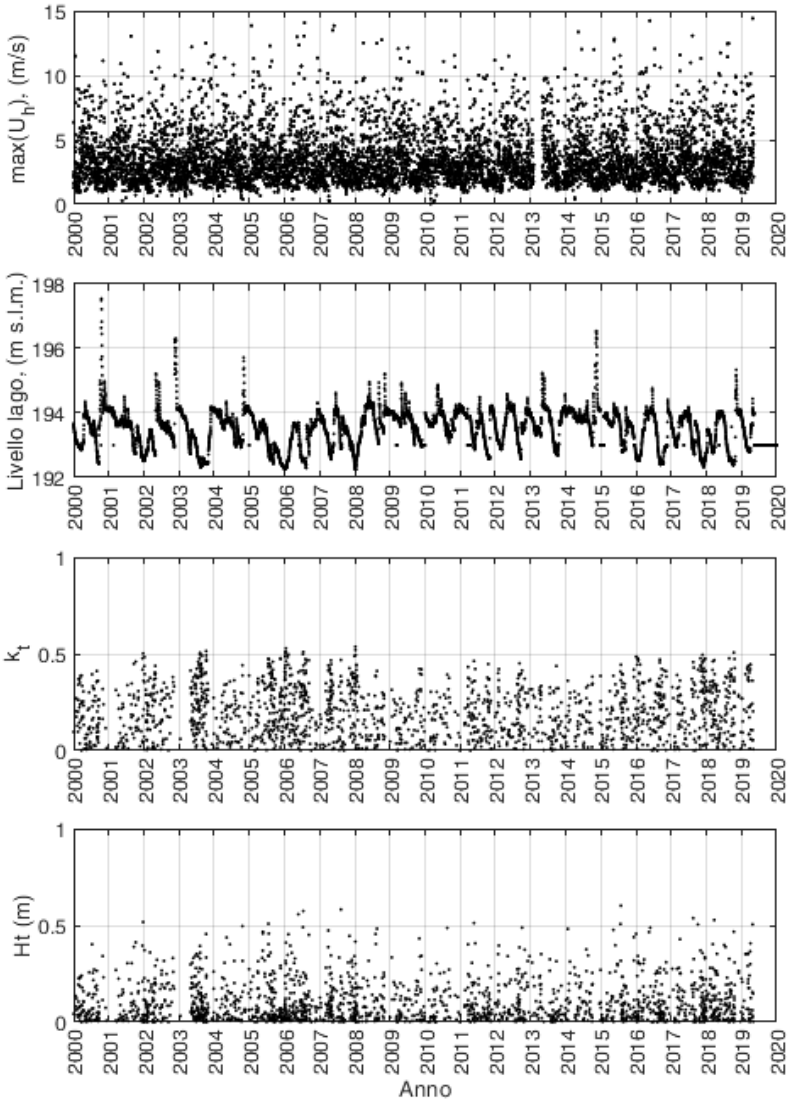

Figura 2.24 Primi due pannelli in alto: le serie storiche misurate in Pallanza del massimo giornaliero della velocità media oraria del vento e dei livelli del lago. Negli altri due pannelli si mostrano i coefficienti di trasmittanza e le relative altezze dell'onda trasmessa nel porto.

Si constata che il coefficiente di trasmissione raggiunge spesso il valore di kt = 0.5 e, l'altezza dell'onda trasmessa passa anch'essa il valore di 0.5 m diverse volte all'anno. Si consideri, come esposto in precedenza, che il valore di comfort accettato dell'agitazione ondosa in un porto turistico è di 0.15 m. Inoltre, 0.5 è il valore di altezza d'onda trasmessa che viene ulteriormente incrementato, in termini di agitazione ondosa, dall'onda che viene riflessa dalla banchina interna del porto ed accumulata nello specchio d'acqua. È evidente che quest'analisi è peggiorativa dal punto di vista della performance del porto, poiché le onde che non incidono perpendicolarmente la barriera frangiflutti hanno meno capacità di penetrare e, di conseguenza, il coefficiente di trasmittanza delle onde è sicuramente sovrastimato. In ogni caso quest'analisi indica le condizioni più gravose a cui il porto può essere soggetto.

Nei seguenti grafici s'illustrano i livelli e le velocità misurati in circa venti anni dalla stazione di Pallanza. Questa rappresentazione permette di evidenziare in quali zone del piano

livelli-velocità del vento si verificano le maggiori criticità. In particolare, sovrapponendo a questa figura il luogo dei punti di livello e velocità che producono un'onda trasmessa nel porto di 15 cm (soglia comunemente accettata per la tranquillità di un porto turistico) è possibile conoscere quali e quanti eventi giornalieri non rispettino il livello di tranquillità suggerito dalle norme internazionali.

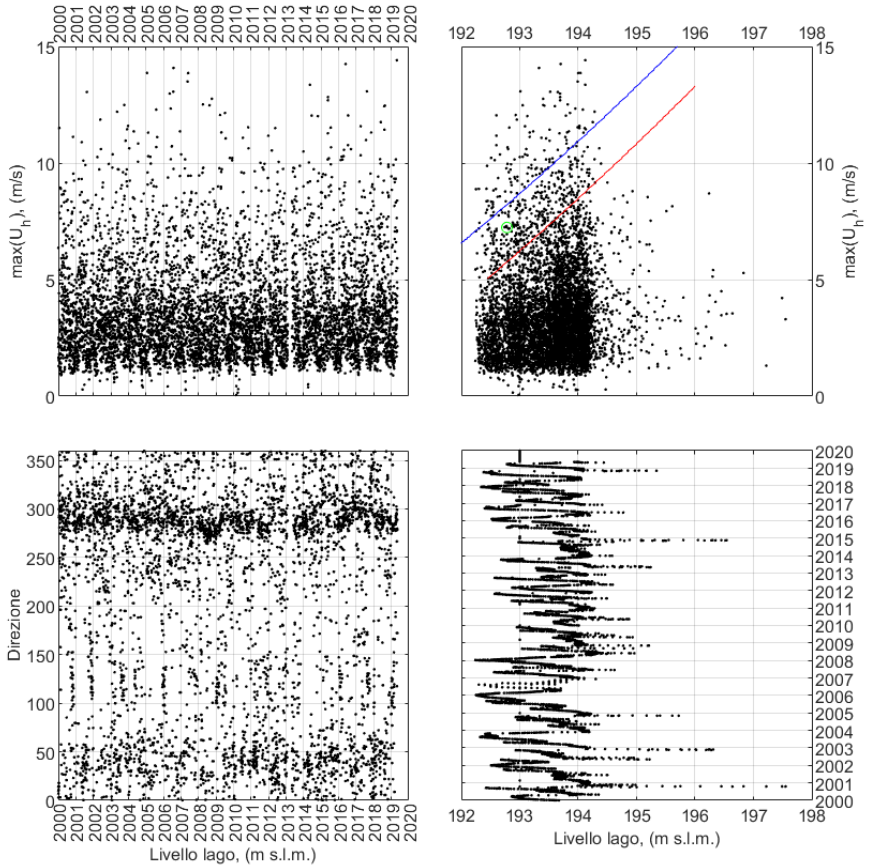

Figura 2.25 L'analisi correlata tra i livelli del lago maggiore e la velocità del vento (massima giornaliera della media oraria). Nel pannello in alto a sinistra sono mostrati tutti i livelli e le velocità, per i venti anni di misura, insieme al luogo dei punti di livello e velocità che producono un'onda trasmessa nel porto di 15 cm (soglia rossa comunemente accettata per la tranquillità di un porto turistico) e 30 cm (soglia rossa comunemente accettata per la sicurezza di un porto turistico)

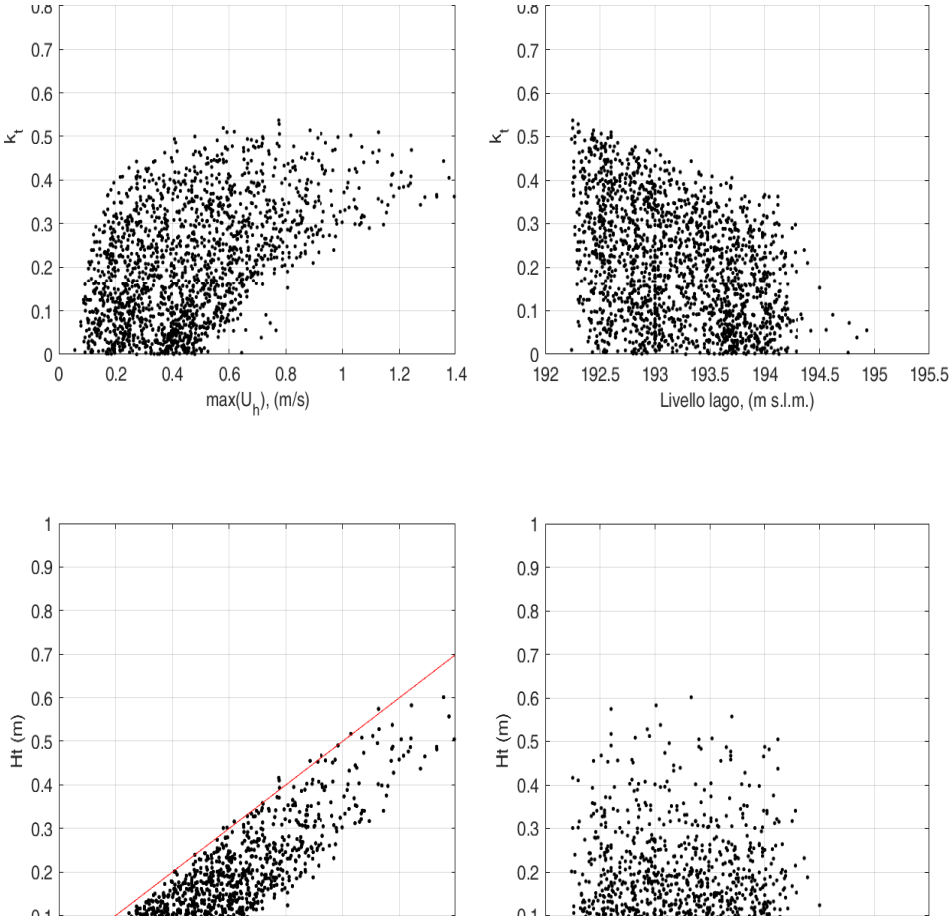

Figura 2.26 La rappresentazione del coefficiente di trasmittanza e dell'altezza trasmessa attraverso la barriera in funzione della velocità del vento e del livello del lago

La stessa applicazione è stata fatta utilizzando i dati di vento condizionati alla direzione di provenienza del vento tra 0 e 90°. Ciò ha permesso di ignorare gli effetti con direzione del vento tangenziale rispetto alla barriera frangiflutti. Questa analisi è più aderente alla verità ma meno cautelativa. Infatti, se è già difficile stabilire il grado di agitazione interna al porto nel caso di onde che impattano perpendicolarmente la barriera frangiflutti, è praticamente impossibile, sulla base dei risultati di letteratura, sapere cosa succede per onde che la investono con direzione più tangenziale. Ciò non vuol dire che tali onde siano da escludere nell'analisi dell'agitazione interna. La conclusione a cui si giunge è che il coefficiente di trasmittanza raggiunge anche in questo caso il valore di kt=0.5. Nondimeno, essendo l'intensità del vento inferiore al caso non condizionato, l'altezza dell'onda trasmessa raggiunge raramente il valore di 0.5 m ma si assesta su valori più bassi (circa 0.3 m).

Una prima conclusione che si ricava dalla *Figura 2.25* è che l'evento del 25 marzo si sarebbe dovuto collocare, sulla base di questa analisi, tra la soglia di tranquillità e quella di pericolo. Il livello di agitazione interna al porto, tuttavia, è stato molto superiore ai 30 cm della soglia di pericolo. Si potrebbe dunque concludere che la metodologia di analisi non è stata corretta, ma in realtà il problema è più complesso. "*Per assurdo si assuma che il coefficiente di*

trasmissione sia del 100%, l'onda trasmessa nel porto sarebbe pari a quella incidente che, per l'evento del 25 marzo, risulta essere di circa 60 cm. Anche in questo caso l'altezza dell'onda all'interno del porto è inferiore a quella osservata e che può essere stimata in 1-1.2 m. L'incongruenza consiste nel fatto che l'onda calcolata è quella trasmessa attraverso la barriera frangiflutti ma non quella che si accumula, a causa dei giochi di riflessione contro le banchine rigide, nel porto. Si ritiene che la problematica della trasmissione dell'onda sotto la barriera sia solo uno dei problemi, quello scatenante, ma non l'unico. L'altro problema costituito dalle mura verticali e lisce delle banchine fisse interne al porto che, non avendo grandi capacità di assorbire l'onda, la accumulino nello specchio acqueo. Chiaramente, se non esistesse un'onda trasmessa non esisterebbero nemmeno le onde riflesse. Ovvero, sebbene l'elemento scatenate sia certamente la bassa efficacia nel riflettere o dissipare le onde della barriera frangiflutti, il problema diviene molto più complesso all'interno del porto. Altra problematica, anche se minore e legata all'innescarsi delle grandi onde all'interno del porto, è dovuta alla dimensione del bacino portuale le cui dimensioni caratteristiche (profondità dell'acqua e distanza tra la barriera e la banchina) sono tali da imporre alle onde riflesse nel porto una frequenza che è prossima o multipla di quella delle onde incidenti." (prof. Davide Poggi, 2020)

Quest'analisi statistica si è conclusa con una valutazione qualitativa del fitting delle principali leggi di distribuzione (Lognormale, Gumbel, Weibuill, Distribuzione Normale, LogNormale e GEV). Di seguito si illustra la relazione tra le altezze delle onde trasmesse nel porto Ht e il tempo di ritorno in anni T.

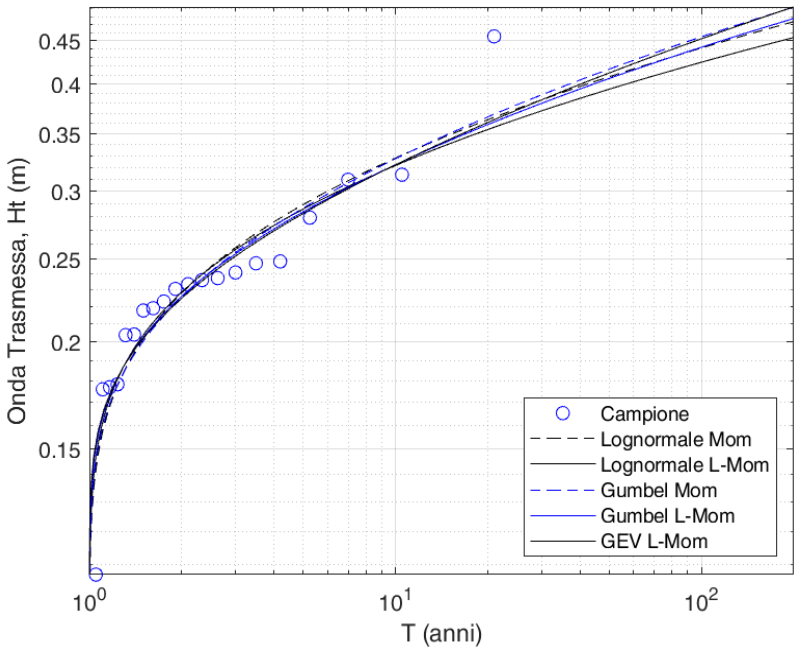

Figura 2.27 Tempo di ritorno delle Ht

2.6 Teoria dei modelli

Nell' ingegneria idraulica i modelli fisici, spesso rivestono un ruolo molto importante, sebbene la loro realizzazione sia vincolata alla disponibilità di idonee strumentazioni e attrezzature di laboratorio. La loro applicazione si rivela utile quando non è possibile formulare o risolvere numericamente un sistema di equazioni atto a descrivere i processi che hanno luogo nella realtà. Questa metodologia trova il suo ideale utilizzo nell'analisi dei fenomeni localizzati. (A.Montanari)

Affinché il modello fisico sia rispettoso del sistema reale (prototipo) è necessario rispettare determinati criteri di similitudini. Tuttavia, soddisfare questi criteri, non è così semplice. Pertanto, un modello non rappresenta tutti i fenomeni del prototipo, ma si pone attenzione su quali siano i "fenomeni rilevanti" per lo studio da effettuare.

Per ottenere una valida realizzazione del modello fisico bisogna quindi definire:

- una formulazione adimensionale del problema.
- i criteri di similitudine:
    - *geometrica*, ogni dimensione del modello è in rapporto costante con le dimensioni del prototipo;
    - *cinematica*, in ogni punto del dominio del modello la velocità deve avere la stessa direzione e verso della corrispondente velocità del prototipo;
    - *dinamica*, ogni forza che agisce nel modello deve avere la stessa direzione e verso della corrispondente forza che agisce nel prototipo.

Attraverso il teorema Π, quindi, viene stabilita una relazione funzionale fra le diverse grandezze fisiche del problema.

$$\mathbf{f}\,(\boldsymbol{\pi}_1, \boldsymbol{\pi}_2, \ldots, \boldsymbol{\pi}_{m-n}) = 0$$

Per un'adeguata formulazione adimensionale si individuano le grandezze fondamentali, per le quali è necessario definire l'unità di misura e le grandezze derivate, la cui unità di misura è invece desumibile dalle unità delle grandezze fondamentali per mezzo delle leggi fisiche predette.

Nella meccanica classica è consuetudine assumere tre grandezze fondamentali, cioè lunghezza, la cui unità di misura verrà di seguito indicata con il simbolo L, tempo (T) e massa (M). Nel caso della meccanica dei fluidi sono spesso assunte come grandezze fondamentali la densità di massa del fluido ρ, la velocità v, e la lunghezza L, che sono tre grandezze tra loro dimensionalmente indipendenti.

Se si realizza il modello nel rispetto dei criteri di similitudini, la relazione funzionale ottenuta con il teorema Π che governa il problema reale (prototipo) è rappresentativa anche del problema riprodotto in sede sperimentale (modello). In altri termini, indipendentemente dai valori delle singole grandezze fisiche che intervengono nel problema il generico parametro adimensionale Π_i assume lo stesso valore sia in riferimento al prototipo che al modello. (M.Morganti, 2013)

In genere, al fine di definire i rapporti tra le forze, si assume come forza di riferimento la 'forza di inerzia'

$$F_i \propto \rho L^2 V^2$$

dove con L si indica una opportuna dimensione geometrica e con V un opportuno valore di velocità, in riferimento al dato problema.

Le diverse similitudini dinamiche che possono interessare i problemi idraulici sono, quindi, definite nel modo seguente.

– Similitudine per le forze peso

$$\frac{Fi}{Fg} \propto \frac{\rho L^2 V^2}{\rho g L^3} \propto \frac{V^2}{gL} \rightarrow \frac{V^2}{\sqrt{gL}}$$: numero di Froude

– Similitudine per le forze viscose

$$\frac{Fi}{Fv} \propto \frac{\rho L^2 V^2}{\mu V L} \propto \frac{VL}{\upsilon}$$: numero di Reynolds

Similitudine per le forze di pressione

$$\frac{Fi}{Fp} \propto \frac{\rho L^2 V^2}{\Delta p L^2} \propto \frac{\rho V^2}{\Delta p} \rightarrow \frac{\Delta p}{\rho V^2}$$: numero di Eulero

– Similitudine per le forze di tensione superficiale

$$\frac{Fi}{F\sigma} \propto \frac{\rho L^2 V^2}{\sigma L} \propto \frac{\rho L V^2}{\sigma} \rightarrow V\sqrt{\frac{\rho L}{\sigma}}$$: numero di Weber.

Definite le similitudini si possono ottenere i fattori di scala del modello. Nella teoria dei modelli idraulici ormai, è nota l'impossibilità di assicurare contemporaneamente la similitudine delle forze peso e delle forze viscose. Infatti, se si impone la contemporanea conservazione del numero di Froude e Reynolds si ottiene:

$$\begin{cases} \lambda_v \lambda_L \lambda_\rho \lambda_\mu^{-1} = 1 \\ \lambda_v^2 \lambda_g^{-1} \lambda_L^{-1} = 1 \end{cases}$$

Assumendo ora che λ_g, λ_ρ e λ_μ assumano valore unitario per l'invarianza della gravità e delle proprietà fisiche del fluido si ottiene:

$$\begin{cases} \lambda_v = \dfrac{1}{\lambda_L} \\ \lambda_v^2 = \lambda_L \end{cases}$$

Questo significa che il liquido usato nel modello deve essere diverso dal liquido del prototipo, soluzione non facilmente realizzabile sia per ragioni tecniche che economiche.

Quindi, in questi casi, considerate le tipologie di forze da analizzare si opera realizzando il modello nel rispetto della similitudine dinamica di esse. Il modello siffatto presenta una cosiddetta '**similitudine dinamica incompleta**'.

Il seguente elaborato non trattando cambi di regime del moto della corrente ma piuttosto lo studio di oscillazioni della superficie libera, pone attenzione alla similitudine delle forze peso e quindi alla conservazione del numero di Froude. Considerando λ come il fattore di scala geometrico si ottengono, quindi, tutti gli altri fattori di scala:

$\lambda_V = \lambda^{1/2}$ (fattore di scala velocità)

$\lambda_T = \lambda^{1/2}$ (fattore di scala tempi)

$\lambda_Q = \lambda^{5/2}$ (fattore di scala portate)

$\lambda_F = \lambda^3$ (fattore di scala forze)

$\lambda_{Re} = \lambda^{3/2}$ (fattore di scala Reynolds).

3 Realizzazione dell'apparato sperimentale

3.1 Introduzione

Il modello idraulico del moto ondoso nel lago Maggiore del porto di Stresa è stato realizzato a partire dalla fine del 2019 e durante il 2020, presso il laboratorio di Ingegneria Idraulica "Giorgio Bidone" del Politecnico di Torino. Le prove a cui tale modello è stato sottoposto avranno un duplice scopo. In primo luogo, confermare le caratteristiche del moto ondoso (periodo, altezza d'onda e livello idrico) pericolose per l'area portuale corrispondenti allo stato di fatto. In secondo luogo, determinare le oscillazioni nella darsena, provocate dalle medesime onde, una volta operate sulla diga foranea le sistemazioni previste da diverse alternative progettuali al fine di ottimizzare l'effetto di dissipazione.

3.2 Progettazione componenti del modello

Il modello è stato realizzato secondo la similitudine di Froude con scala di risoluzione geometrica pari a 1/20. Tale scala ha permesso di apprezzare pienamente le grandezze d'interesse ed è risultata compatibile con gli spazi in laboratorio. La scelta della scala geometrica, infatti, è stata condotta da un'attenta analisi dei disegni di progetto e, contemporaneamente, considerando le dimensioni del canale ad onde in cui effettuare le prove.

Il canale ad onde si estende per una lunghezza di circa 50 m, è costruito con supporti in acciaio e pareti in vetro e ha una sezione utile per gli esperimenti larga 61 cm e alta 80 cm. Le onde vengono generate attraverso un battitore in acciaio installato in una delle due estremità del canale, mentre nell'altra estremità, è presente un dissipatore d'onde che, analogamente ad una spiaggia nella realtà, provoca il frangimento delle onde allo scopo di avere meno onde riflesse

Figura 3.1 Battitore genera onde

possibili. Un computer, da cui è possibile definire le caratteristiche dell'onda che si vuole creare, ovvero ampiezza e periodo, invia al battitore le informazioni riguardanti come oscillare.

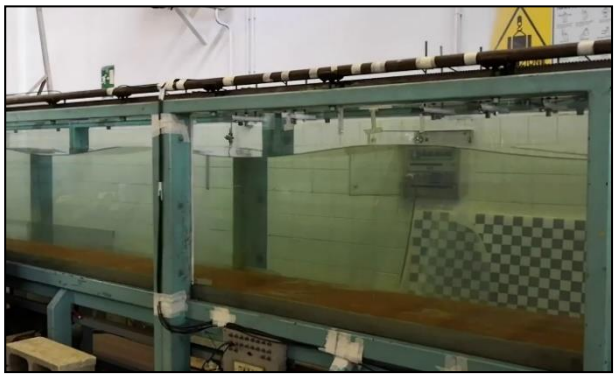

Figura 3.2 breve tratto del canale ad onde

Figura 3.3 Dissipatore

Dopo aver considerato le caratteristiche del canale, attraverso un'attenta analisi degli elaborati progettuali si è individuata una sezione rappresentativa del molo tale da poter essere considerata prototipo del modello. La sezione scelta come prototipo è stata la 4G dei disegni progettuali. Si è giunti, quindi, alla definizione della scala geometrica pari ad 1/20 allo lo scopo di creare un modello rispettoso della condizione di onde in acque profonde (deep water). Definita la sezione e la scala geometrica, si sono individuate le dimensioni del prototipo e di conseguenza del modello.

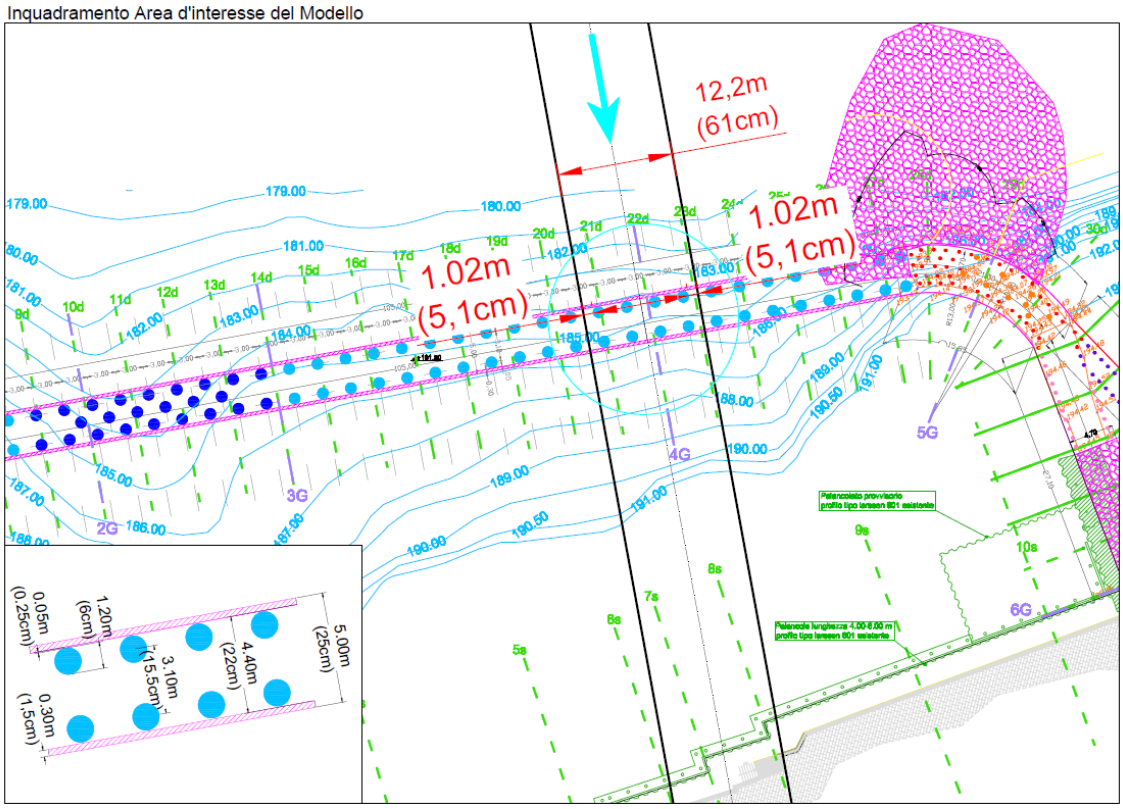

Figura 3.4: Sezione scelta come prototipo

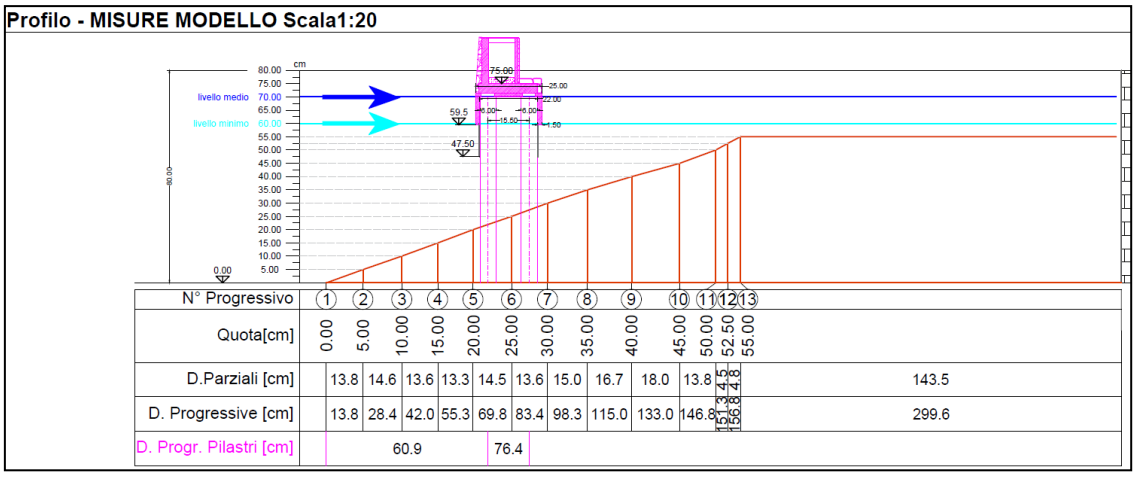

Figura 3.5: Profilo del modello

Per una corretta descrizione del modello, è stata realizzata una rappresentazione 3D dello stesso che ha permesso di avere una visione chiara dei vari elementi atti a definirlo: ciò ha facilitato la scelta dei vari materiali da utilizzare e i processi di lavorazione da adottare per la sua realizzazione. Come è ben visibile nella seguente immagine, il modello della diga foranea comprende la muratura, le lamiere forate e i pilastri, ed è sostenuta da un telaio in ferro che sorregge il carico poggiandosi sui bordi del canale.

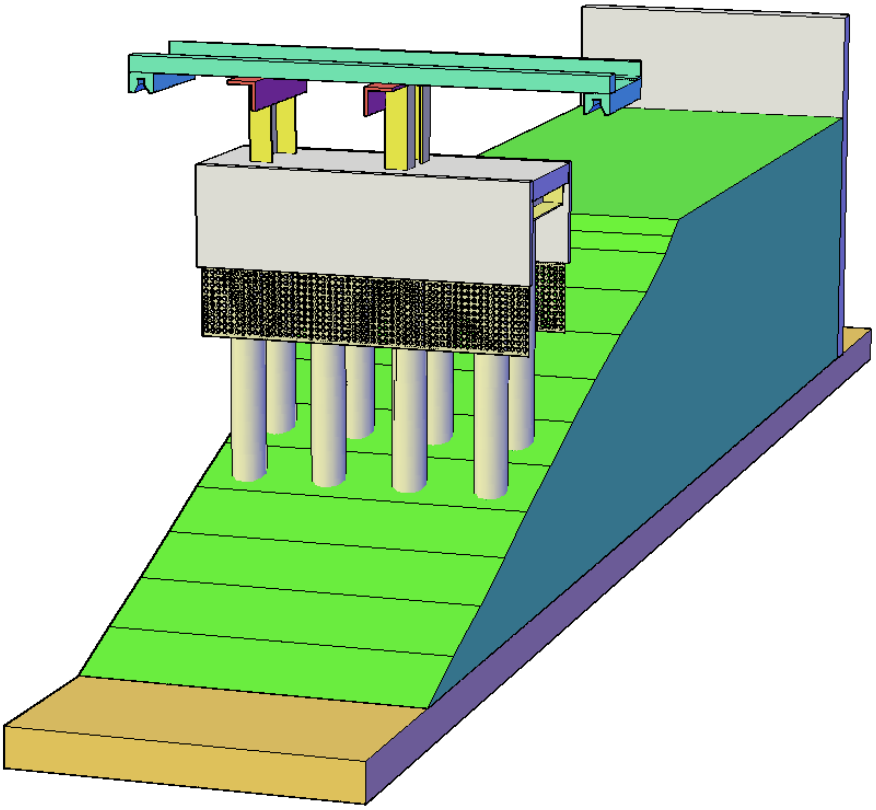

Figura 3.6: Rappresentazione 3D del modello da realizzare

L'apparato sperimentale, nello specifico, è composto da:

- *fondale*, definito in base alle curve di livello dei disegni progettuali. Esso ha una lunghezza di quasi 300 cm e un'altezza massima di 55 cm; geometricamente è caratterizzato da due andamenti: uno pianeggiante e uniforme che riproduce la parte di fondale meno profonda e adiacente al muro perimetrale del porto; l'altro inclinato con andamento irregolare rappresentante la parte del fondo lago che inizia ad essere sempre più profonda man mano che ci si allontana dalla costa. Proprio in corrispondenza di questo tratto, nel nostro modello sorge la diga foranea.

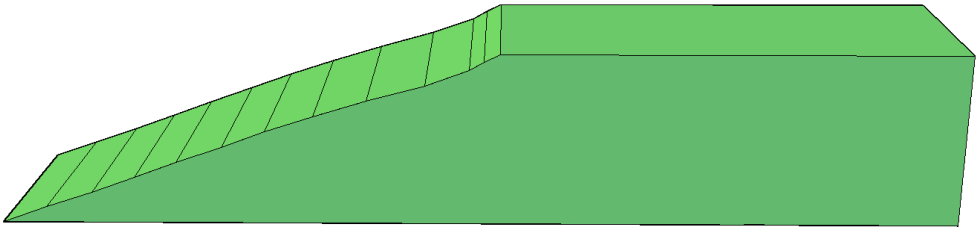

Figura 3.7: Fondale

- *muro di controripa*, rappresentato attraverso un esaedro. Esso ha lo scopo di riprodurre il muro impermeabile lungo la costa che fa da contenimento per il camminamento del lungo lago e per la strada sovrastante. Posto, quindi verticalmente al bordo del fondale, le sue dimensioni sono 77,5 x 60 x 1,5 cm.

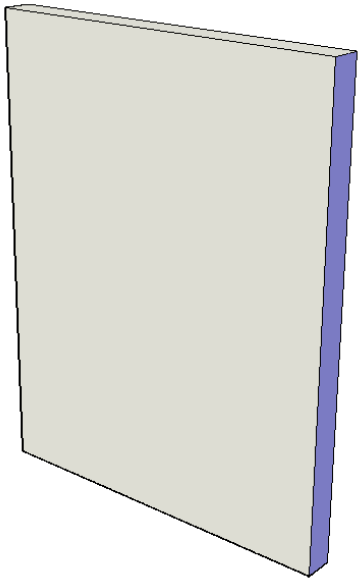

Figura 3.8: Muro di contenimento

- *pali di fondazione,* ne sono in numero di otto all'interno della sezione di studio e con diametro di 6 cm. La loro lunghezza varia in base all'inclinazione del tratto di fondale su cui poggiano: quattro hanno una lunghezza di 43,66 cm con un'inclinazione della base di 20°; gli altri quattro hanno una lunghezza di 49,10 cm e un'inclinazione della base di 19°.

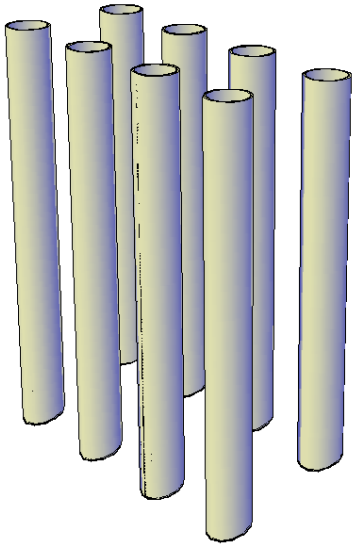

Figura 3.9: Pilastri

- *muratura diga foranea,* composta da tre elementi esaedrici, di cui quello superiore avente dimensioni 60 x 25 x 3,5 cm e i restanti due verticali aventi dimensioni 60 x 18 x1,5 cm.

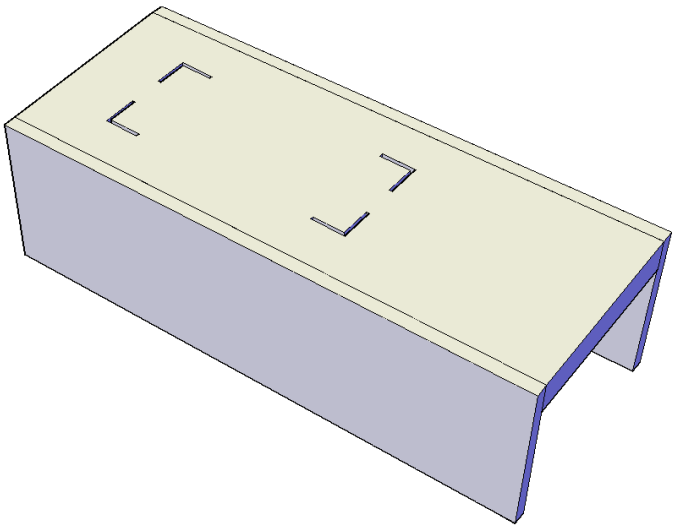

Figura 3.10: Muratura diga foranea

- *lamiere forate*, che hanno lo scopo di riprodurre la barriera semipermeabile del molo. Sono lunghe 60 cm, alte 12,5 cm e hanno uno spessore di 0,75 mm. I fori hanno un diametro di 8,5 mm con un interasse di 11,5 mm.

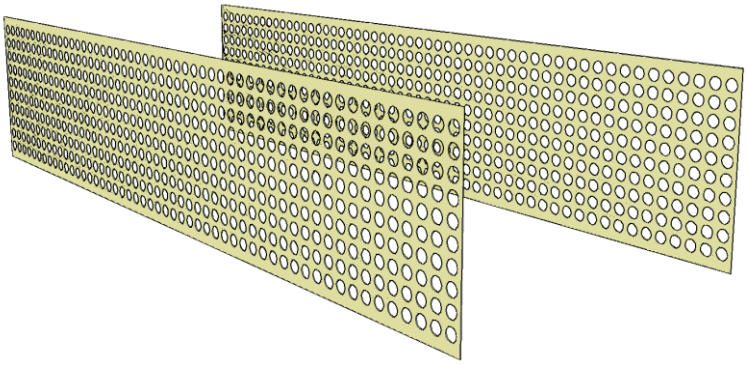

Figura 3.11: Lamiere forate

3.3 Costruzione dell'apparato sperimentale

La costruzione del modello si è articolata in diverse fasi, scegliendo il materiale più adatto per ciascun componente da realizzare e la relativa tecnica di lavorazione più adatta. Una volta eseguita la realizzazione dei singoli elementi, si è proceduto all'assemblamento del modello attraverso saldatura, bullonatura e rivettatura.

Il primo elemento realizzato è stato il fondale. Esso è il componente del modello volumetricamente più grande, costruito utilizzando lamiere di ferro per garantire duttilità in fase di lavorazione e resistenza in fase di sperimentazione. Seguendo i disegni del profilo del terreno, si è proceduto a tagliare la lamiera in tre piani di ferro, poi disposti in maniera verticale e parallela. Un'ulteriore lamina, larga poco meno del canale e quindi circa 60 cm, è stata sagomata seguendo il profilo delle tre lamine verticali per poi essere saldata su queste. Dopo che l'intero complesso è stato saldato, si è provveduto alla sua verniciatura interna ed esterna, necessaria per contrastare i

Figura 3.12: struttura in ferro Fondale

fenomeni di ossidazione. Il sollevamento e lo spostamento della struttura, attraverso il carroponte, è stato possibile grazie all'installazione di quattro golfari disposti in modo da far evitare inclinazioni e rotazioni durante la sua disposizione nel canale.

Figura 3.13: diverse fasi della costruzione del Fondale

La realizzazione del modello è proseguita con la creazione dell'elemento rappresentante il muro di contenimento impermeabile da disporre dietro al fondale. Il pannello è stato fatto con diversi componenti in plexiglass trasparente, collegati rigidamente tra di loro attraverso piattine e bulloni. È stata aggiunta un'altra lastra in plexiglass per garantire la stabilità verticale del pannello.

Figura 3.14: costruzione parete impermeabile

Si è proceduto alla realizzazione dei componenti riproducenti la diga foranea. Sono stati realizzati gli otto pilastri partendo da tubolari in acciaio con diametro di 6 cm. Sono stati realizzati tagli perpendicolari all'asse del tubo per le sommità dei pilastri e tagli inclinati di 20° (quattro tubi) e 19° (quattro tubi) per le basi. La correttezza dei tagli è stata verificata con una mappatura quotata della proiezione dei pilastri sul fondale.

Figura 3.15: Pilastri in acciaio

Per un posizionamento adeguato della diga foranea, all'interno del canale, si è cercata una soluzione capace di consentirne un comodo assemblamento. Questo è stato possibile grazie alla creazione di un supporto in ferro che tuttavia non riproduce alcuna struttura realmente esistente

nel prototipo. La parte superiore del telaio sorregge il carico poggiando sui bordi del canale, mentre la parte inferiore permette l'ancoraggio dei vari elementi della diga foranea.

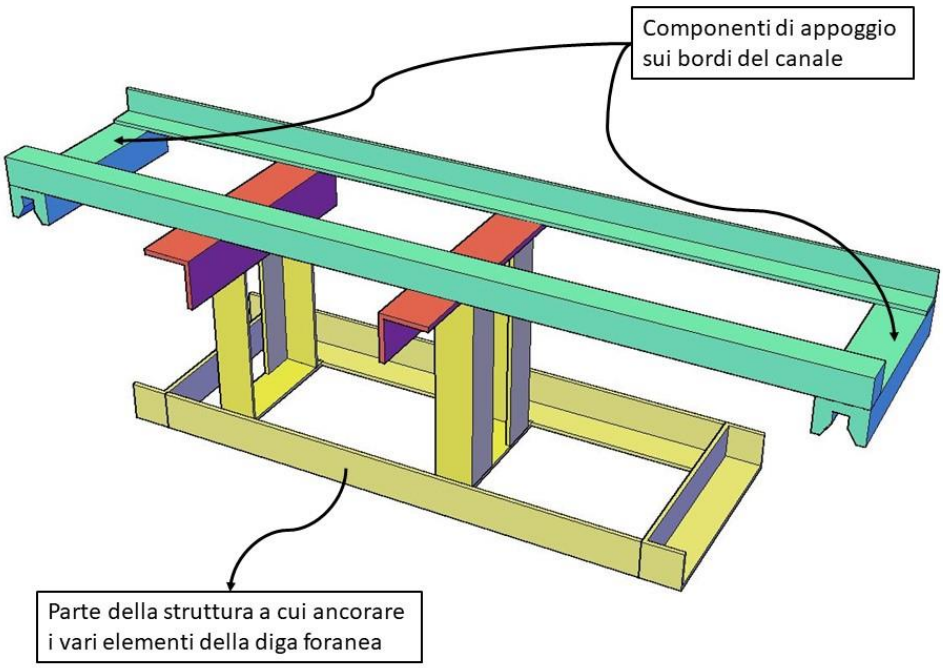

Figura 3.16: progettazione 3D dell'intelaiatura metallica di supporto alla Diga foranea

Figura 3.17: fasi di costruzione intelaiatura metallica

I pilastri sono stati i primi elementi ad essere fissati, tramite saldatura, all'intelaiatura metallica. Dopo la fase di lavorazione e assemblamento si è avuto cura di verniciare tutte le zone di ferro scoperte soggette ad ossidazione, quindi i punti in cui si sono effettuati tagli, saldature e smerigliature.

Figura 3.18: posizionamento pilastri

La parte superiore della diga, rappresentante la muratura del prototipo, è stata realizzata in plexiglass trasparente. Quest'ultimo per le sue proprietà duttili permette una facile lavorazione e sagomatura, inoltre è un materiale rigido e impermeabile. I tre elementi sono stati fissati alla struttura di sostegno per bullonatura. Il taglio dei tre pezzi di plexiglass e le fessure necessarie per il passaggio del telaio di supporto sono stati realizzati tramite seghetto alternativo, mentre i vari fori con il trapano. In aggiunta, sono stati sagomati pezzi di polistirene con lo scopo di chiudere la base dell'intelaiatura metallica per evitare che, in fase di sperimentazione l'acqua potesse seguire percorsi completamente differenti rispetto al prototipo nella parte inferiore della diga foranea.

Figura 3.19: installazione pannelli polistirene

Figura 3.20: varie fasi della realizzazione di quella che rappresenta la muratura della diga foranea

Le lamiere forate sono state gli ultimi elementi realizzati del modello che hanno simulato le piastre metalliche poste sotto la muratura della diga foranea. La scelta del materiale non è risultata per nulla agevole: la difficoltà ha riguardato la creazione di una lamina sottile di 0,75 mm (corrispondente ad 1,1 cm nel prototipo) avente sia la stessa percentuale di foratura necessaria per rispettare la semipermeabilità del prototipo sia la sua elevata rigidità. Dopo varie prove il materiale più idoneo è risultato l'alluminio che rivettato ai pilastri, nonostante il piccolo spessore, ha mostrato una rigidezza adeguata a quella ricercata. La maglia di fori si è realizzata con trapano a mano dato l'elevato costo richiesto da procedure automatizzate.

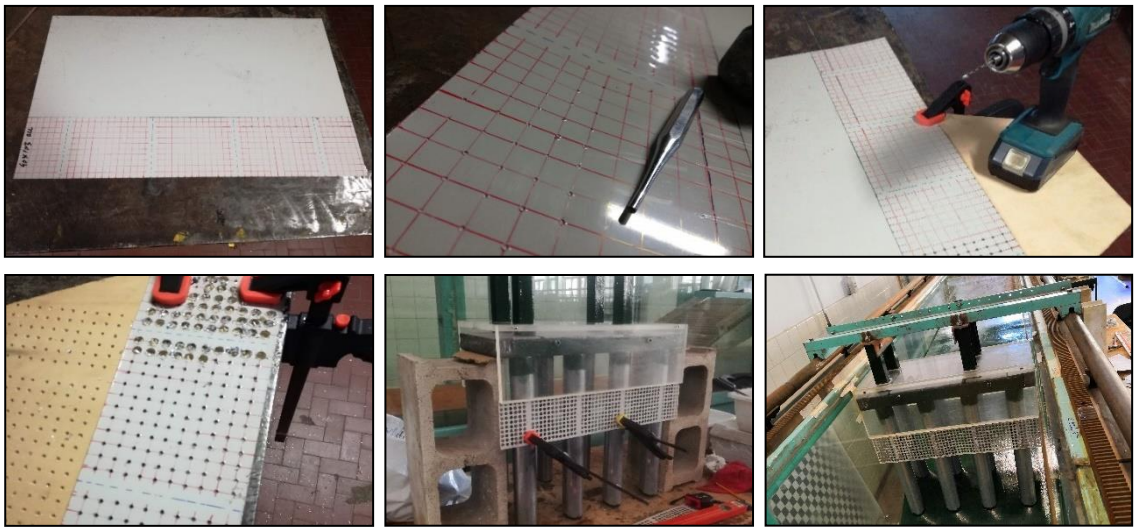

Figura 3.21 varie fasi della realizzazione di quelle che rappresentano le lamiere forate della diga foranea

3.4 Strumentazione

L'acquisizione dei livelli idrici e dell'andamento del moto ondoso è stata effettuata mediante sensori ad ultrasuoni capaci di dare una misura della distanza senza contatto. Il sensore montato sulla parte superiore del canale emette ciclicamente un breve impulso acustico ad alta frequenza (frequenza 380 kHz); questo impulso si propaga nell'aria alla velocità del suono e, quando incontra il livello idrico, viene riflesso e ritorna al sensore in forma di eco. Il sensore ultrasonico, quindi, calcola la distanza dalla superficie in base al ritardo temporale tra la trasmissione del segnale acustico e la ricezione dell'eco. Il modello dei sensori ad ultrasuoni utilizzato è BUS0025 prodotto dalla BALLUFF.

Figura 3.22: Sensore ad ultrasuono Balluff
(foto estratta da www.balluff.com)

Lo strumento è settato per fornire un'uscita analogica in corrente tra i 4 e 20 mA ed ha un range di misura compreso tra 25 e 250 mm dal sensore con caratteristica lineare. La risoluzione della sonda ad ultrasuoni è di 0,07 mm mentre l'errore di ripetibilità è pari allo 0.15% del valore misurato. Nella seguente tabella si illustrano le specifiche tecniche del sensore ad ultrasuoni.

Sensore ad ultrasuoni "BALLUFF" BUS0025	
Assorbimento di corrente max	40 mA
Frequenza ultrasuoni	380 kHz
Alimentazione	24 V dc
Temperatura ambiente	-25/70 °C
Distanza di lavoro	25/250 mm
Precisione di ripetibilità	0.15% dal fondo scala
Risoluzione	≤ 0.07 mm
Collegamento	M12x1-Connettore, 5-poli

Tabella 3.1: Specifiche tecniche sensore di livello ad ultrasuoni

Sono stati utilizzati 12 sensori ad ultrasuoni installati su appositi supporti, in grado di posizionarsi ovunque fosse necessario al di sopra del modello. Attraverso delle barre filettate, inoltre, è stato reso possibile la regolazione della distanza dei sensori dal pelo libero dell'acqua.

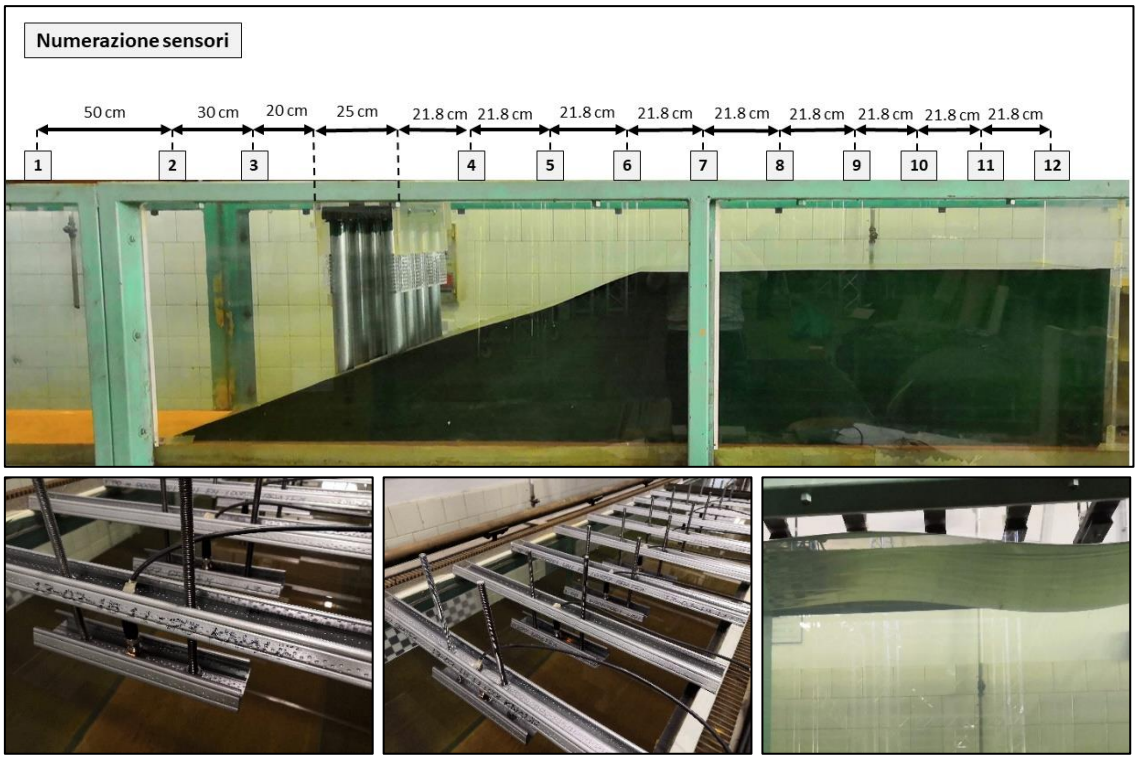

Figura 3.23: disposizione dei sensori ad ultrasuoni sul canale

Per l'acquisizione dei dati si è usata una scheda I/O (input/output) prodotta dalla NATIONAL INSTRUMENTS. Le schede input/ output sono dispositivi hardware che consentono la raccolta automatizzata di segnali analogici e digitali e che fanno in modo che un processore trasferisca informazioni e interagisca con sensori, attuatori e periferiche esterne. Queste schede possono essere usate per svolgere compiti utili a personalizzare le operazioni che devono compiere. (E.C.B. srl)

Siccome tali schede leggono meglio il segnale in voltaggio, è stato creato un circuito in cui i cavi provenienti dai sensori, sono stati collegati in modo tale da trasformare il segnale da corrente in tensione, secondo la legge di Ohm:

$$V = R \cdot I \tag{3.1}$$

Nel circuito così creato si sono utilizzate delle resistenze da 220 Ohm, trasformando così il segnale di corrente tra 4 e 20 mA in un segnale di tensione tra 0,88 e 4,4 V.

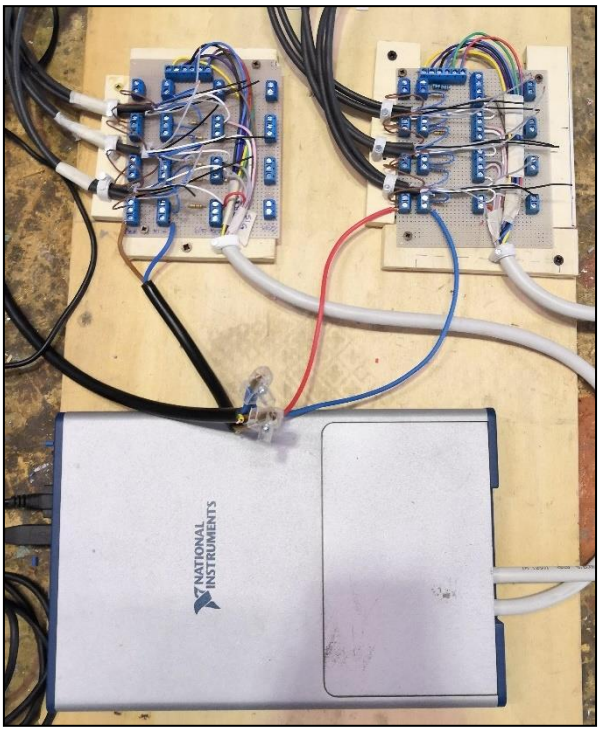

Figura 3.25: circuito elettrico e dispositivo I/O

		colour
1	$+U_B$	brown
3	0 V	blue
4	-	black
2	Out I/U	white
5	Com	grey

Figura 3.25: codice colore cavo di collegamento

I dati così acquisiti sono stati poi elaborati attraverso il software LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench), ambiente di sviluppo integrato per il linguaggio di programmazione visuale della NATIONAL INSTRUMENTS.

Si è quindi proceduto alla regolazione dei sensori: definizione margini di misurazione e sincronizzazione. La definizione dei margini di misurazione è necessaria poiché i sensori hanno delle zone cieche, una nei primi 2,5 cm davanti al sensore e un'altra oltre i 25 cm. Essa è stata eseguita con l'ausilio di un cavalletto treppiede.

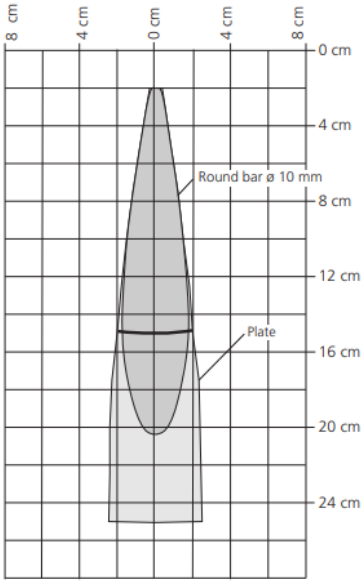

Figura 3.26 area di rilevamento sensore

Figura 3.27 fase di definizione margini di misurazione

La configurazione dei sensori è stata attuata secondo due disposizioni: una per il livello minimo e l'altra per il livello medio del lago. Di seguito vengono indicati i valori delle altezze di regolazione per ogni profondità (h):

- h = 70 cm (distanza dal fondo canale corrispettivo al livello medio del lago di 194 m slm nel prototipo)
  $h_{sensore}$ = 78 cm; $h_{max\ rilevamento}$ = 75 cm; $h_{min\ rilevamento}$ = 55 cm;

- h = 60 cm (distanza dal fondale del canale corrispettivo al livello medio del lago di 194 m slm nel prototipo).
  $h_{sensore}$ = 70 cm; $h_{max\ rilevamento}$ = 67 cm; $h_{min\ rilevamento}$ = 53 cm

Per quanto riguarda la procedura di sincronizzazione, essa è stata necessaria per evitare che i sensori distanti meno di 25 cm potessero disturbarsi a vicenda.

La regolazione è dunque proseguita con la calibrazione dei sensori. Tale procedura ha permesso di trasformare la misura di tensione in distanze; la calibrazione è stata effettuata andando a variare il livello idrostatico dell'acqua nel canale. Letto il livello idrico tramite un metro di riferimento, si è proceduti all'acquisizione del segnale in tensioni da parte dei 12 sensori. In tal modo, attraverso il linguaggio di programmazione MATLAB (MATrix LABoratory), è stata fatta una media temporale della misura di ogni sensore; così nel software LabVIEW si è potuta creare una tabella che mettesse in relazione tensione e distanze (V-cm), e quindi ottenere un grafico che infine ha illustrato in tempo reale la misura in cm del livello idrico.

Calibrazione per misurazioni con $h_{profondità}$ = 70 cm												
h [cm]	**Tensione [V] (media temporale)**											
	1	***2***	***3***	***4***	***5***	***6***	***7***	***8***	***9***	***10***	***11***	***12***
74.40	0.947	1.004	1.047	1.024	1.036	1.030	1.052	1.045	1.040	1.041	1.023	1.010
69.95	1.709	1.768	1.815	1.793	1.804	1.801	1.825	1.805	1.804	1.811	1.793	1.779
64.35	2.678	2.744	2.792	2.777	2.786	2.781	2.798	2.775	2.785	2.787	2.769	2.765
59.90	3.454	3.527	3.568	3.561	3.559	3.561	3.574	3.549	3.561	3.566	3.553	3.550
55.80	4.168	4.246	4.285	4.278	4.274	4.278	4.285	4.259	4.277	4.286	4.266	4.265

Tabella 3.2 Misure di calibrazione per h=70cm

Calibrazione per misurazioni con h $_{profondità}$ = 70 cm												
h [cm]	**Tensione [V] (media temporale)**											
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
67.00	1.049	1.154	1.104	1.132	1.080	1.113	1.140	1.098	1.190	1.116	1.113	1.068
65.50	1.369	1.471	1.424	1.449	1.399	1.434	1.466	1.413	1.504	1.436	1.428	1.387
64.00	1.692	1.798	1.750	1.775	1.724	1.760	1.792	1.737	1.825	1.763	1.756	1.713
62.50	2.015	2.130	2.079	2.103	2.054	2.091	2.117	2.065	2.164	2.100	2.090	2.045
60.00	2.575	2.684	2.636	2.653	2.612	2.647	2.664	2.616	2.715	2.649	2.646	2.604
56.00	3.453	3.569	3.515	3.544	3.484	3.523	3.537	3.485	3.584	3.525	3.519	3.485
53.00	4.093	4.210	4.154	4.176	4.121	4.157	4.169	4.114	4.219	4.165	4.157	4.120

Tabella 3.3 Misure di calibrazione per h=60cm

Organizzati i sensori, si è passati ad un'ulteriore fase di regolazione riguardante il *battitore genera onde,* cercando la relazione tra l'ampiezza di oscillazione assegnata al battitore e l'altezza delle onde generate. Per ogni periodo d'onda da indagare si sono generate delle onde assegnando al battitore diversi modi di oscillazione variandone l'ampiezza.

I periodi da indagare sono stati scelti in base alle dimensioni del molo, cercando quelli delle onde stazionarie; proprio queste ultime risultano essere le più pericolose all'interno di un molo per la loro caratteristica di non propagarsi ma di aumentare l'ampiezza più di quanto sia l'onda incidente.

Dato un numero intero n, detta L la lunghezza del mezzo in cui l'onda si sta propagando (nel seguente studio pari alla lunghezza della darsena di 43,7 m), la lunghezza d'onda corrispondente alle frequenze di risonanza si ricavano con la seguente formula:

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \tag{3.2}$$

La prima λ_1 fa riferimento al primo modo stazionario cioè alla *frequenza fondamentale* o *prima armonica*; di conseguenza avremo poi la *seconda armonica*, la *terza armonica* e così via. Ovviamente saranno tutti sottomultipli della lunghezza L.

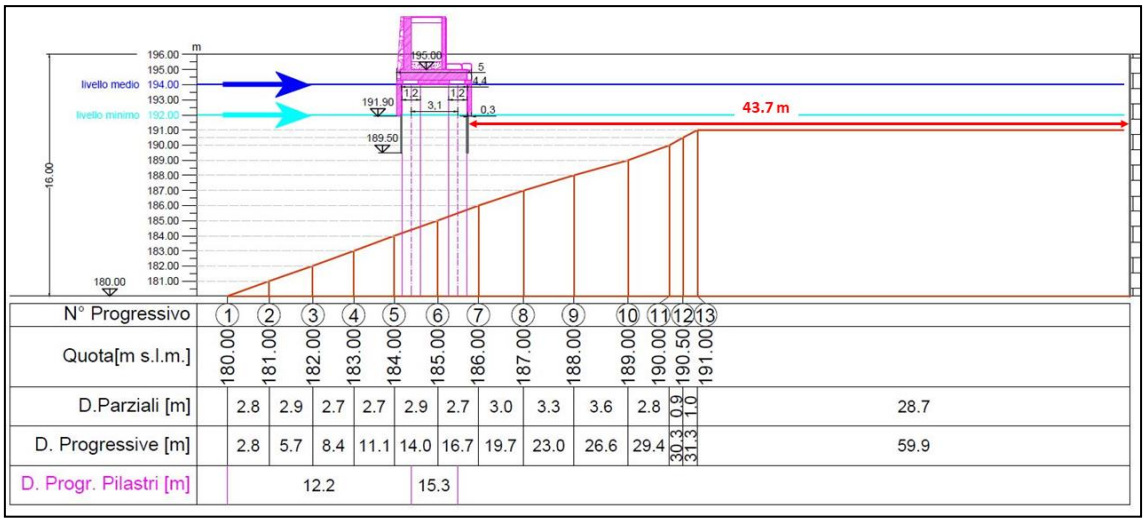

Figura 3.28 Profilo prototipo

Con la relazione di dispersione si mette in relazione la lunghezza d'onda n-esima λ_n con il periodo n-esimo T_n:

$$\lambda_n = \frac{g T_n^2}{2\pi} tgh\left(\frac{2\pi h}{\lambda_n}\right) \tag{3.3}$$

La formula inversa che esprime il periodo in funzione della lunghezza d'onda è la seguente:

$$T_n = \sqrt{\frac{2\pi}{g} \frac{\lambda_n}{tgh\left(\frac{2\pi h}{\lambda_n}\right)}} \tag{3.4}$$

Facendo un confronto con misure effettuate sui moti ondosi avvenuti nel molo di Stresa con i valori ottenuti seguendo l'analisi succitata, le armoniche che hanno un periodo più prossimo a quelli reali sono risultate essere la terza e la quarta, rispettivamente con:

$T_3 = 4.34$ s, $\lambda_3 = 29.13$ m;

$T_4 = 3.75$ s, $\lambda_4 = 21.85$ m.

Nelle seguenti tabelle si illustrano i risultati dell'analisi che ha condotto alla conoscenza della relazione tra l'ampiezza battitore $\mathbf{a_B}$, espressa in Volt, e l'altezza d'onda **H** in funzione dei periodi **T** (scalati nel modello secondo la similitudine delle forze peso, quindi, del fattore di scala geometrico elevato a ½ ovvero $20^{1/2} = 4.47$), per ogni profondità **h** indagata. Inoltre, attraverso il calcolo della lunghezza d'onda **λ** e della celerità di gruppo **cg** si è calcolato il tempo massimo di prova come il tempo in cui le onde vengono riflesse una volta a valle in corrispondenza del modello e una volta a monte del canale, in corrispondenza del battitore, per poi ritornare a valle disturbando le onde da studiare, quindi il tempo in cui le onde percorrono due volte l'intero canale.

Profondità h = 60cm						
T [s] *(prototipo)*	**T** [s] *(modello)*	**f** [Hz] *(modello)*		**a_B** [V] *(Ampiezza battitore)*	**H** [cm] *(Altezza onda modello)*	**H** [cm] *(Altezza onda prototipo)*
4.3449	**0.9715**	**1.029**		0.350	1.03	0.21
3° Periodo di risonanza				0.400	1.17	0.23
				0.420	1.26	0.25
λ	1.4737	m		0.450	1.36	0.27
cg	0.7584	m/s		0.800	2.43	0.49
tmax prova	113.92	s		0.820	2.49	0.50
				1.000	3.11	0.62
	min	s		1.200	3.68	0.74
tmax prova	1	54		1.220	3.71	0.74
				1.250	3.84	0.77
				1.300	4.06	0.81
				1.400	4.31	0.86
				1.500	4.74	0.95
				1.530	4.97	0.99
				1.540	4.63	0.93
				1.550	5.03	1.01

Tabella 3.4 Relazione ampiezza di oscillazione battitore-altezza onde generate h= 60 cm T=4,34s

Profondità h = 60cm						
T [s] *(prototipo)*	**T** [s] *(modello)*	**f** [Hz] *(modello)*		**a_B** *(Ampiezza battitore)*	**H** [cm] *(Altezza onda modello)*	**H** [cm] *(Altezza onda prototipo)*
4	0.8944	1.118		0.400	1.33	0.27
				0.500	1.40	0.500
λ	1.2490	m		0.820	2.59	0.52
cg	0.6982	m/s		0.850	2.70	0.54
tmax prova	123.74	s		1.000	2.93	0.59
				1.100	3.59	0.72
	min	s		1.150	3.81	0.76
tmax prova	2	4		1.200	4.02	0.80
				1.300	4.50	0.90
				1.400	4.89	0.98
				1.420	5.04	1.01
				1.500	5.42	1.08

Tabella 3.5 Relazione ampiezza di oscillazione battitore-altezza onde generate h= 60 cm T=4,00s

Profondità h = 60cm						
T [s] *(prototipo)*	**T** [s] *(modello)*	**f** [Hz] *(modello)*		**a_B** *(Ampiezza battitore)*	**H** [cm] *(Altezza onda modello)*	**H** [cm] *(Altezza onda prototipo)*
3.7453	0.8375	1.194		0.400	1.30	0.26
				0.800	2.46	0.800
λ	1.0950	m		1.100	3.67	0.73
cg	0.6538	m/s		1.250	4.43	0.89
tmax prova	132.15	s		1.350	5.06	1.01
				1.400	5.26	1.05
	min	s		1.500	5.71	1.14
tmax prova	2	12				

Tabella 3.6 Relazione ampiezza di oscillazione battitore-altezza onde generate h= 60 cm T=3.74s

Profondità h = 70cm						
T [s] *(prototipo)*	**T** [s] *(modello)*	**f** [Hz] *(modello)*		**a_B** *(Ampiezza battitore)*	**H** [cm] *(Altezza onda modello)*	**H** [cm] *(Altezza onda prototipo)*
4.3307	0.9684	1.033		0.300	1.06	0.21
3° Periodo di risonanza					1.27	0.380
				0.800	2.42	0.48
λ	1.4641	m		0.840	2.51	0.50
cg	0.7560	m/s		0.900	2.67	0.53
tmax prova	114.29	s		1.280	3.81	0.76
				1.650	4.75	0.95
	min	s		1.800	5.22	1.04
tmax prova	1	54		2.000	5.85	1.17

Tabella 3.7 Relazione ampiezza di oscillazione battitore-altezza onde generate h= 70 cm T=4.33s

Profondità h = 60cm						
T [s] *(prototipo)*	**T** [s] *(modello)*	**f** [Hz] *(modello)*		**a_B** *(Ampiezza battitore)*	**H** [cm] *(Altezza onda modello)*	**H** [cm] *(Altezza onda prototipo)*
4	0.8944	1.118		0.300	1.00	0.20
				0.370	1.22	0.24
				0.380	1.24	0.25
λ	1.4737	m		0.400	1.31	0.26
cg	0.7584	m/s		0.700	2.28	0.46
tmax prova	113.92	s		0.800	2.52	0.50
				1.200	3.79	0.76
	min	s		1.400	4.38	0.88
tmax prova	1	54		1.500	4.58	0.92
				1.600	4.85	0.97
				1.620	4.95	0.99
				1.625	4.98	1.00
				1.630	5.08	1.02

Tabella 3.8 Relazione ampiezza di oscillazione battitore-altezza onde generate

h= 70 cm T=4.00

Profondità h = 70cm						
T [s] *(prototipo)*	**T** [s] *(modello)*	**f** [Hz] *(modello)*		**a_B** *(Ampiezza battitore)*	**H** [cm] *(Altezza onda modello)*	**H** [cm] *(Altezza onda prototipo)*
3.7428	0.8369	1.195		0.400	1.32	0.26
4° Periodo di risonanza				0.450	1.49	0.30
				0.800	2.50	0.50
λ	1.0936	m		1.200	3.64	0.73
cg	0.6533	m/s		1.300	3.91	0.78
tmax prova	132.24	s				
	min	s				
tmax prova	2	12				

Tabella 3.9: Relazione ampiezza di oscillazione battitore-altezza onde generate

h= 70 cm T=3.74s

I risultati sono stati riassunti nei seguenti grafici, dove attraverso un'interpolazione lineare si è cercata la funzione H= f (a $_{battitore}$).

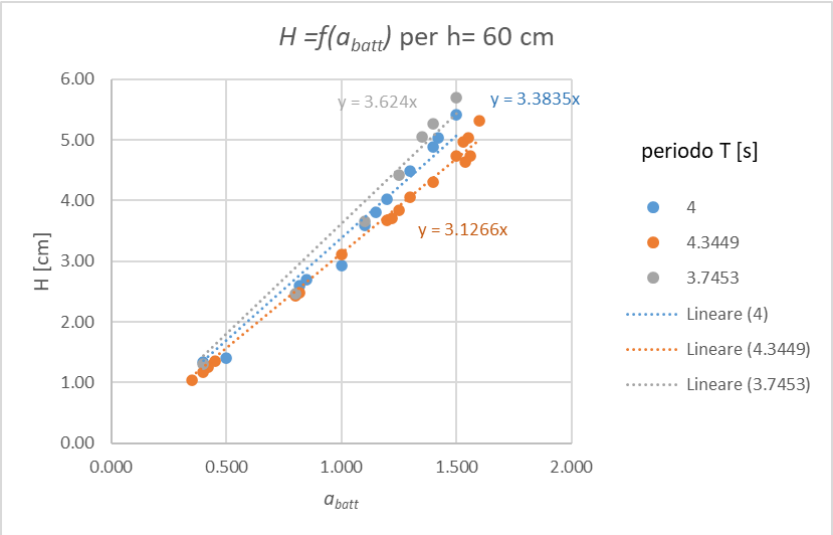

Figura 3.29 Relazione ampiezza di oscillazione battitore-altezza onde generate h= 60 cm

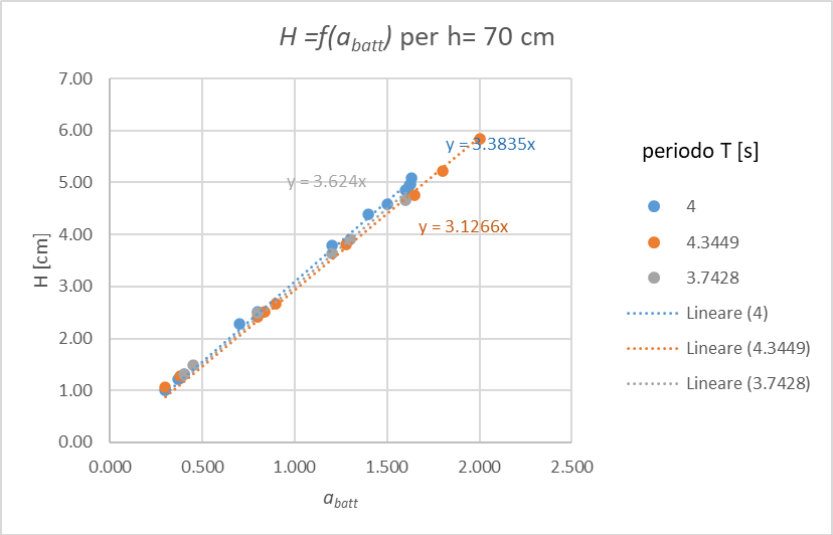

Figura 3.30 Relazione ampiezza di oscillazione battitore-altezza onde generate h= 70 cm

4 Prove su modello ed elaborazioni

4.1 Introduzione

Nel seguente capitolo verranno illustrate le sperimentazioni effettuate sul modello e l'elaborazione delle misure. La scelta delle proprietà delle onde indagate è stata fatta sulla base delle caratteristiche idrauliche illustrate nel Capitolo 2, variando il livello idrico h, il periodo T e l'ampiezza dell'onda (legata all'ampiezza del battitore come illustrato alla fine del Capitolo 3). Acquisiti i dati è stata effettuata una pre-elaborazione di "data cleaning" (pulizia dei dati) da "outliers" (dati molto diversi dai valori attesi). Il segnale così ottenuto è stato utilizzato per il calcolo delle proprietà dell'onda e delle varie statistiche, quindi, sono stati ottenuti i grafici degli andamenti dell'altezza d'onda nel tempo H(t) e delle PSD (Power Spectral Density). L'analisi dei dati si è conclusa con la realizzazione di mappe dei coefficienti di trasmissione Kt e delle altezze d'onde massime interne al porto, aventi in ordinata il periodo T e in ascisse le altezze d'onda incidenti H. Tutte queste operazioni sono state fatte attraverso il software MATLAB.

4.2 Caratteristiche delle prove

Le misure hanno riguardato quattro livelli idrici e, per ognuno di essi, si sono indagati 3 periodi differenti nell'intorno di T = 4 s, che è risultato essere il periodo di eventi più gravosi osservati dall'analisi delle serie storiche; per ogni periodo, quindi, si è fatta variare l'ampiezza del battitore per ottenere onde con diverse altezze.

Ogni prova ha avuto la durata di 1 minuto corrispondente ad un evento nel prototipo di quasi 5 minuti. Prima di generare l'onda si è acquisito il livello statico necessario per il calcolo delle varie statistiche.

Il nome attribuito alle misure tiene conto di questi tre parametri più un numero che considera quante volte è stata ripetuta la medesima prova, come illustrato nella Figura 4.1. a cui segue una tabella riassuntiva delle prove analizzate, escludendo quelle affette da errori e quindi non adatte all'analisi. Ad ogni prova corrispondono 12 acquisizione dei sensori ad ultrasuoni e 3 video.

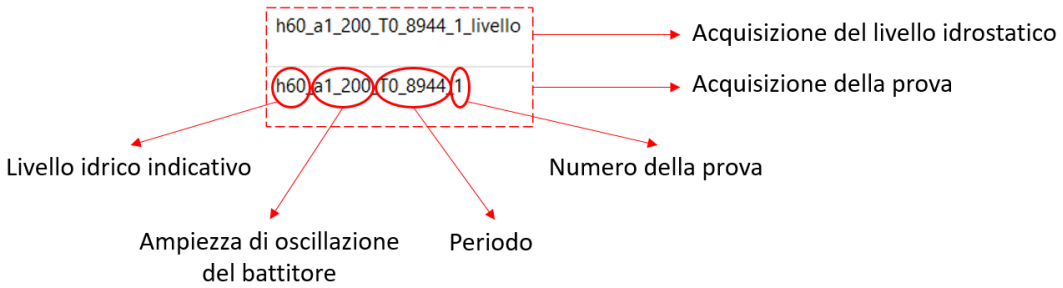

Figura 4.1 Nome attribuito alle misurazioni

h 60 cm (192 m slm)				
T [s]		$a_{battitore}$	N°	nome della prova
prototipo	modello	[V]		
3.74	0.84	0.6	1	h60_a0_600_T0_8375_1
		0.8	2	h60_a0_800_T0_8375_2
		1	2	h60_a1_000_T0_8375_2
		1.2	2	h60_a1_200_T0_8375_2
		1.4	2	h60_a1_400_T0_8375_2
3.9	0.87	0.8	1	h60_a0_800_T0_8721_1
		1	1	h60_a1_000_T0_8721_1
		1.2	1	h60_a1_200_T0_8721_1
		1.4	1	h60_a1_400_T0_8721_1
		1.6	1	h60_a1_600_T0_8721_1
4	0.89	0.8	1	h60_a0_800_T0_8944_1
		0.8	2	h60_a0_800_T0_8944_2
		1	1	h60_a1_000_T0_8944_1
		1	2	h60_a1_000_T0_8944_2
		1.2	1	h60_a1_200_T0_8944_1
		1.4	1	h60_a1_200_T0_8944_1
		1.6	1	h60_a1_600_T0_8944_1
4.15	0.93	0.8	1	h60_a0_800_T0_9280_1
		1	1	h60_a1_000_T0_9280_1
		1.2	1	h60_a1_200_T0_9280_1
		1.4	1	h60_a1_400_T0_9280_1
		1.6	1	h60_a1_600_T0_9280_1
		1.8	1	h60_a1_800_T0_9280_1
4.34	0.97	0.8	3	h60_a0_800_T0_9715_3
		0.8	4	h60_a0_800_T0_9715_4
		1	2	h60_a1_000_T0_9715_2
		1	3	h60_a1_000_T0_9715_3
		1.2	2	h60_a1_200_T0_9715_2
		1.2	3	h60_a1_200_T0_9715_3
		1.4	2	h60_a1_400_T0_9715_2
		1.6	2	h60_a1_600_T0_9715_2
		1.8	1	h60_a1_800_T0_9715_1

Tabella 4.1 Prospetto delle prove eseguite con h=60 cm

h 65 cm (193 m slm)				
T [s]		$a_{battitore}$	N°	nome della prova
prototipo	modello	[V]		
3.74	0.84	0.8	1	h65_a0_800_T0_8371_1
		1	1	h65_a1_000_T0_8371_1
		1.2	1	h65_a1_200_T0_8371_1
		1.4	1	h65_a1_400_T0_8371_1
		1.6	1	h65_a1_600_T0_8371_1
		1.8	1	h65_a1_800_T0_8371_1
3.9	0.87	0.8	1	h65_a0_800_T0_8721_1
		0.8	2	h65_a0_800_T0_8721_2
		0.8	3	h65_a0_800_T0_8721_3
		1	1	h65_a1_000_T0_8721_1
		1	2	h65_a1_000_T0_8721_2
		1.2	1	h65_a1_200_T0_8721_1
		1.4	1	h65_a1_400_T0_8721_1
		1.6	1	h65_a1_600_T0_8721_1
4	0.89	0.8	1	h65_a0_800_T0_8944_1
		0.8	2	h65_a0_800_T0_8944_2
		1	1	h65_a1_000_T0_8944_1
		1	2	h65_a1_000_T0_8944_2
		1.2	1	h65_a1_200_T0_8944_1
		1.2	2	h65_a1_200_T0_8944_2
		1.4	1	h65_a1_400_T0_8944_1
		1.6	1	h65_a1_600_T0_8944_1
4.15	0.93	0.8	1	h65_a0_800_T0_9280_1
		0.8	2	h65_a0_800_T0_9280_2
		1	1	h65_a1_000_T0_9280_1
		1.1	1	h65_a1_100_T0_9280_1
		1.4	1	h65_a1_400_T0_9280_1
		1.6	1	h65_a1_600_T0_9280_1
4.34	0.97	0.8	1	h65_a0_800_T0_9696_1
		1	1	h65_a1_000_T0_9696_1
		1.2	1	h65_a1_200_T0_9696_1
		1.4	1	h65_a1_400_T0_9696_1
		1.6	1	h65_a1_600_T0_9696_1
		1.8	1	h65_a1_800_T0_9696_1
		1.8	2	h65_a1_800_T0_9696_2

Tabella 4.2 Prospetto delle prove eseguite con h=65 cm

h 68.2 cm (193.64 m slm)				
T [s]		$a_{battitore}$	N°	nome della prova
prototipo	modello	[V]		
3.74	0.84	0.8	1	h68_2_a1_200_T0_8370_1
		1	1	h68_2_a1_400_T0_8370_1
		1.2	1	h68_2_a1_600_T0_8370_1
		1.4	1	h68_2_a1_400_T0_8370_1
		1.6	1	h68_2_a1_600_T0_8370_1
3.9	0.87	0.8	1	h68_2_a0_800_T0_8721_1
		1	1	h68_2_a1_000_T0_8721_1
		1.2	1	h68_2_a1_200_T0_8721_1
		1.4	1	h68_2_a1_400_T0_8721_1
		1.6	1	h68_2_a1_600_T0_8721_1
4	0.89	0.8	1	h68_2_a1_200_T0_8944_1
		1	1	h68_2_a1_400_T0_8944_1
		1.2	1	h68_2_a1_600_T0_8944_1
		1.4	1	h68_2_a1_400_T0_8944_1
		1.6	1	h68_2_a1_600_T0_8944_1
		1.8	1	h68_2_a1_800_T0_8944_1
4.15	0.93	0.8	1	h68_2_a0_800_T0_9280_1
		1	1	h68_2_a1_000_T0_9280_1
		1.2	1	h68_2_a1_200_T0_9280_1
		1.4	1	h68_2_a1_400_T0_9280_1
		1.6	1	h68_2_a1_600_T0_9280_1
4.34	0.97	0.8	1	h68_2_a0_800_T0_9688_1
		1	1	h68_2_a1_200_T0_9688_1
		1.2	1	h68_2_a1_400_T0_9688_1
		1.4	1	h68_2_a1_800_T0_9688_1
		1.8	1	h68_2_a1_800_T0_9688_2

Tabella 4.3 Prospetto delle prove eseguite con h=68.2 cm

h 70 cm (194 m slm)				
T [s]		$a_{battitore}$	N°	nome della prova
prototipo	modello	[V]		
3.74	0.84	0.8	1	h70_a0_800_T0_8369_1
		1	1	h70_a1_000_T0_8369_1
		1.2	1	h70_a1_200_T0_8369_1
		1.4	1	h70_a1_400_T0_8369_1
		1.6	1	h70_a1_600_T0_8369_1
		1.8	1	h70_a1_800_T0_8369_1
3.9	0.87	0.8	1	h70_a0_800_T0_8721_1
		1	1	h70_a1_000_T0_8721_1
		1.2	1	h70_a1_200_T0_8721_1
		1.4	1	h70_a1_400_T0_8721_1
		1.6	1	h70_a1_600_T0_8721_1
		1.8	1	h70_a1_800_T0_8721_1
4	0.89	0.8	1	h70_a0_800_T0_8944_1
		1	1	h70_a1_000_T0_8944_1
		1.2	1	h70_a1_200_T0_8944_1
		1.4	1	h70_a1_400_T0_8944_1
		1.6	1	h70_a1_600_T0_8944_1
4.15	0.93	0.8	1	h70_a0_800_T0_9280_1
		1	1	h70_a1_000_T0_9280_1
		1.2	1	h70_a1_200_T0_9280_1
		1.4	1	h70_a1_400_T0_9280_1
		1.6	1	h70_a1_600_T0_9280_1
		1.6	2	h70_a1_600_T0_9280_2
4.34	0.97	0.8	1	h70_a0_800_T0_9684_1
		1	1	h70_a1_000_T0_9684_1
		1.2	1	h70_a1_200_T0_9684_1
		1.4	1	h70_a1_400_T0_9684_1
		1.6	1	h70_a1_600_T0_9684_1
		1.8	1	h70_a1_800_T0_9684_1

Tabella 4.4 Prospetto delle prove eseguite con h=70 cm

4.3 Pre-Elaborazione del segnale acquisito

La prima operazione eseguita dopo aver acquisito un segnale è stata quella di tagliarne la parte iniziale e finale per utilizzare solo la parte a regime. I segnali sono stati acquisiti a 100 Hz ed hanno mostrato dei punti incoerenti con la realtà, presentandosi come outliers. Con il supporto delle riprese si è giunti alla conclusione che i sensori ad ultrasuoni, in generale, non riescono a misurare bene la superficie quando questa raggiunge un certo grado di inclinazione, quindi al diminuire del periodo e all'aumentare dell'altezza d'onda. Gli errori hanno riguardato principalmente la rilevazione dei cavi delle onde. L'operazione di "data cleaning" è stata fatta andando ad eliminare sia i punti che si allontanavano di k volte la deviazione standard σ (dove k è un coefficiente moltiplicativo valutato di volta in volta) sia i punti che mostravano una pendenza eccessiva l'uno dall'altro. Quindi si è interpolato il vuoto lasciato dall'operazione precedente in modo da ottenere un segnale continuo.

Di seguito si illustrano alcuni esempi di questa operazione: si noterà come il sensore 1 dove l'onda arriva indisturbata, restituisce un segnale meno affetto da errori tranne quando la ripidità aumenta con l'incrementarsi dell'altezza d'onda. Invece all'interno del porto (dal sensore 4 al sensore 12) anche per onde con altezze basse, si presenta già qualche errore: questo è tanto più

vero quanto più l'onda viene trasformata dai fenomeni di riflessione e di attrito col fondo che s'instaurano all'interno del porto.

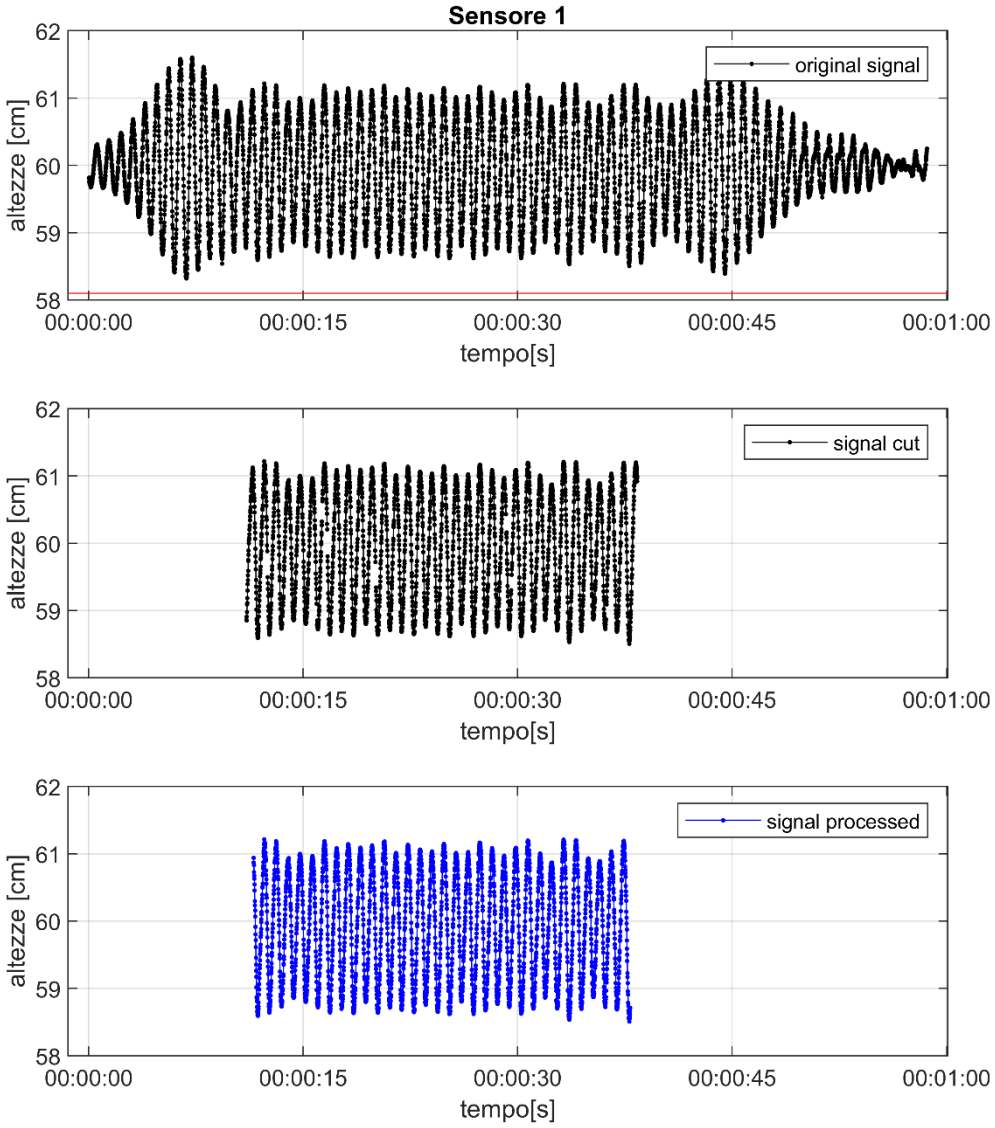

Figura 4.2 Segnale Sensore 1 prova con h=60, T=0.84s (3.75s), $a_{batt.}$ =0.8 V

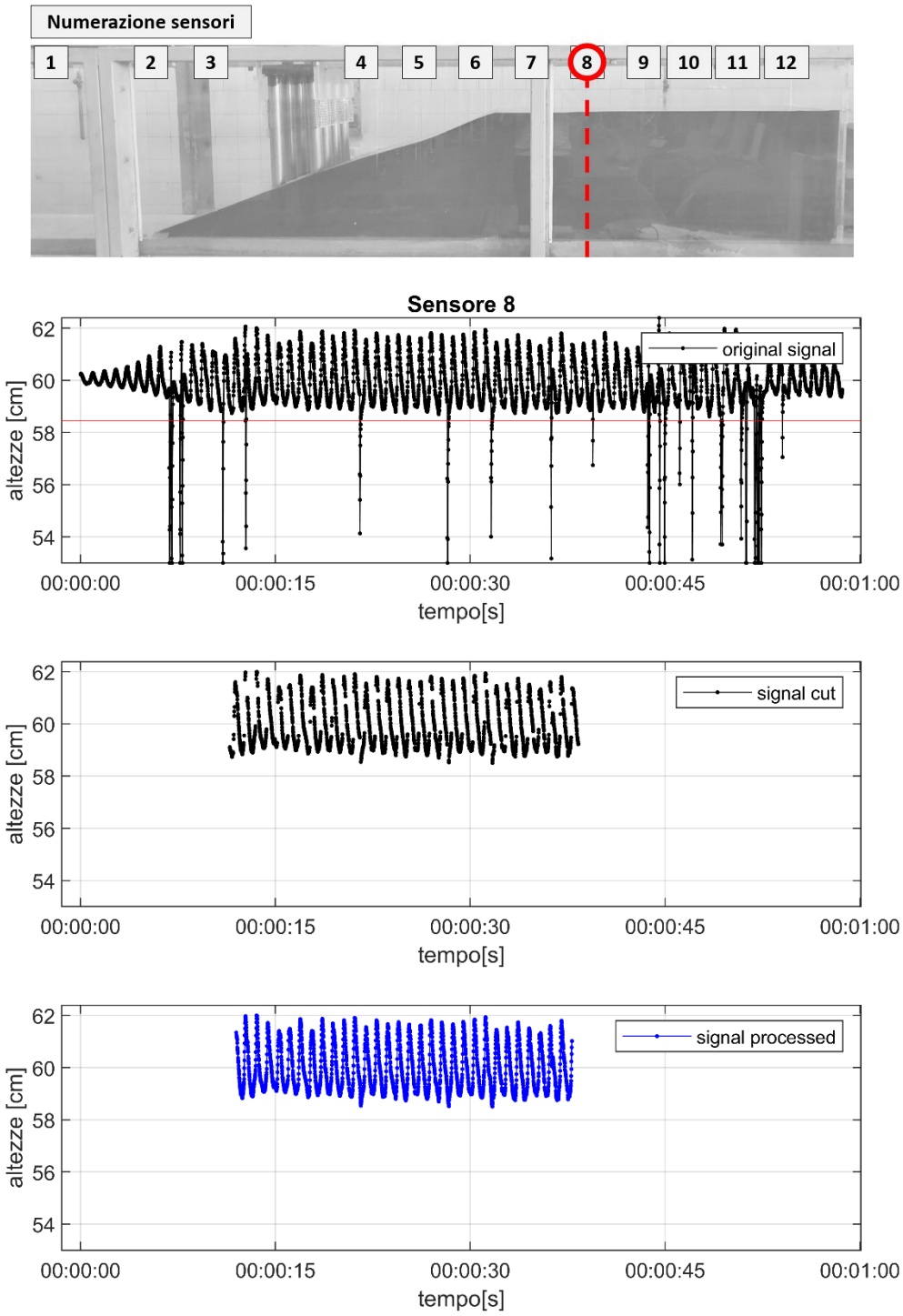

Figura 4.3 Segnale Sensore 8 prova con h=60, T=0.84s (3.75s), abatt. =0.8 V

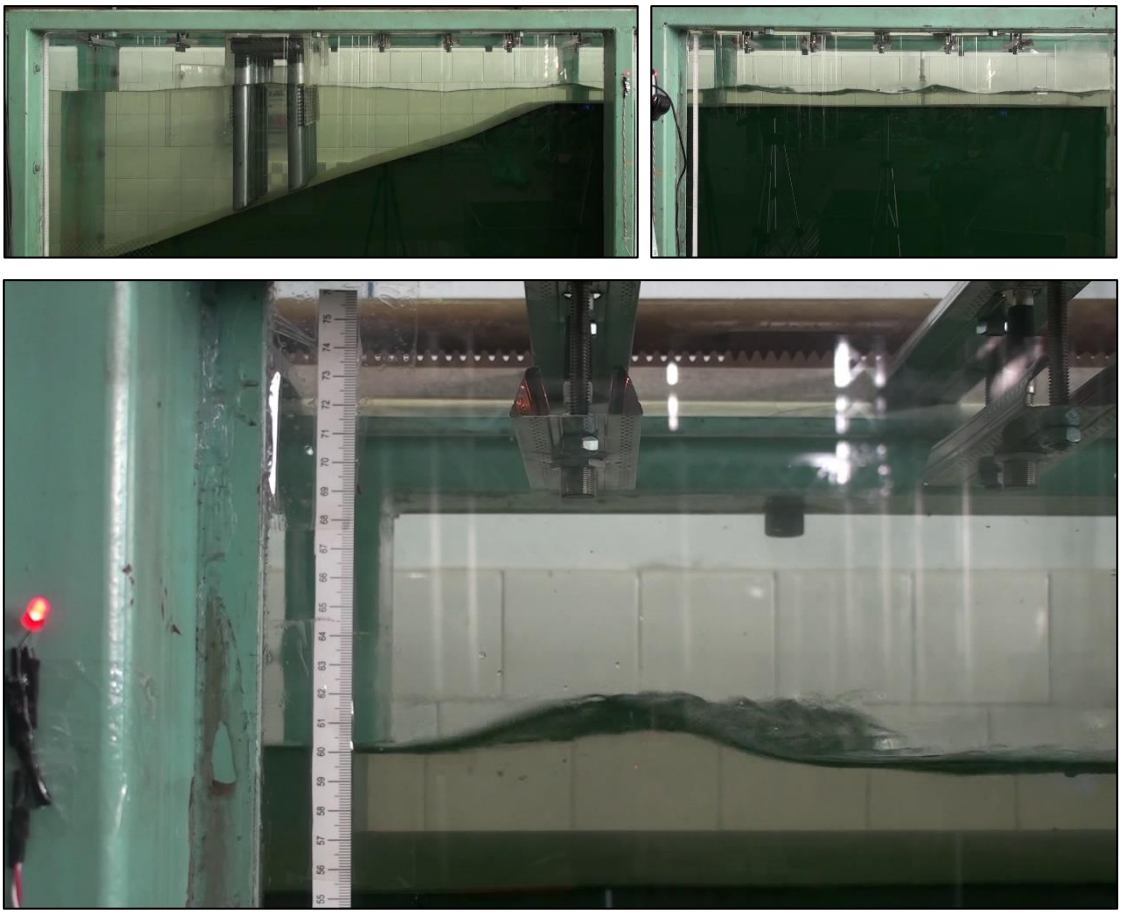

Figura 4.4 Riprese Video prova con h=60, T=0.84s (3.75s), $a_{batt.}$ =0.8 V

Di seguito si illustra un altro esempio in maniera più compatta: anche se questo non permette l'esatta leggibilità della prova, riesce però a dare un quadro completo delle misurazioni fatte.

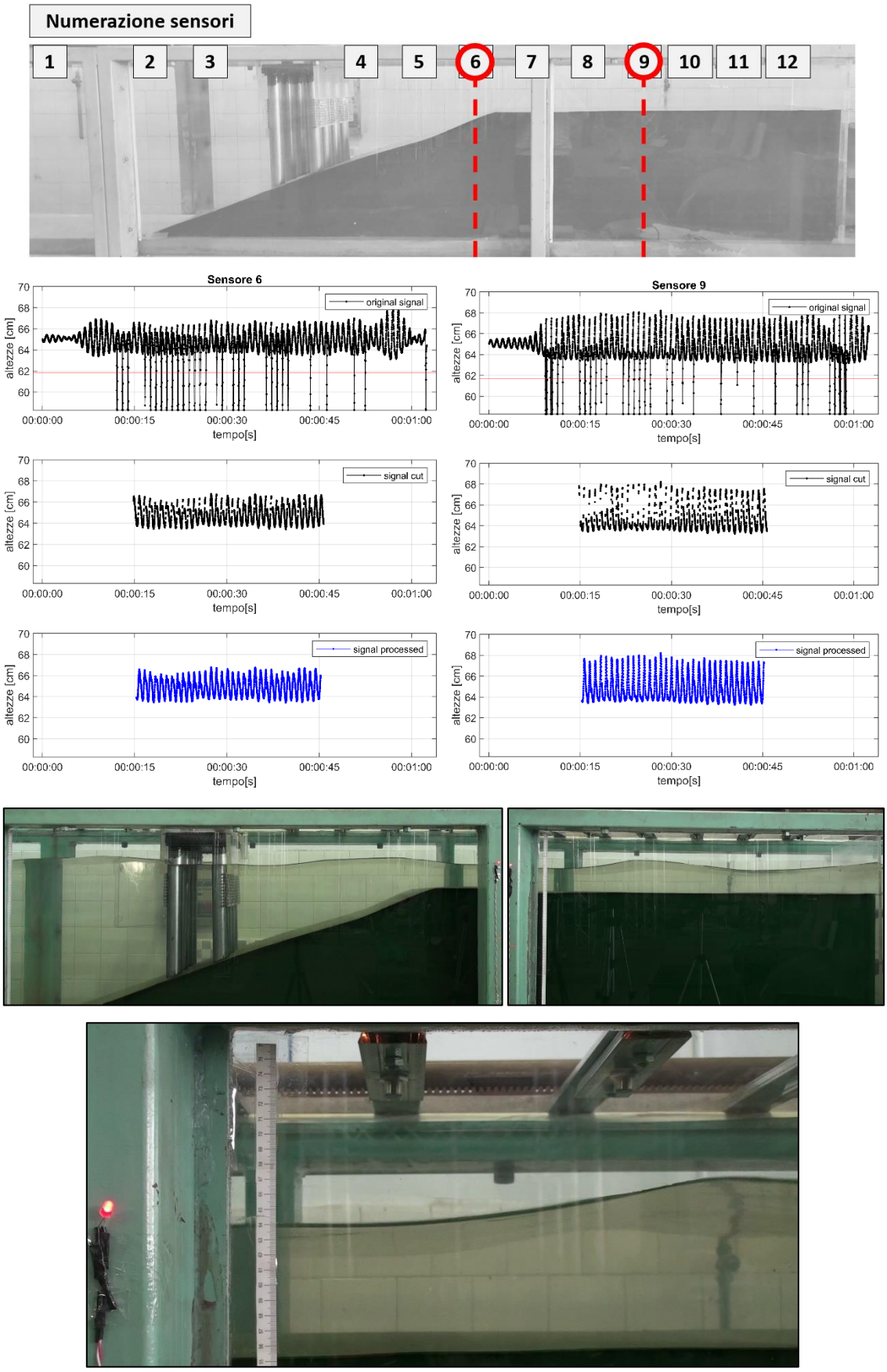

Figura 4.5 misurazioni prova con h=65, T=0.89s (4.00), $a_{batt.}$ =1.00 V

4.4 Calcolo delle proprietà dell'onda e delle statistiche

Per ogni prova sono stati calcolati: lunghezza d'onda **λ**; celerità **c**; celerità di gruppo **cg**. È stato definito, poi, l'andamento delle altezze d'onda nel tempo H**(t)** per ogni sensore, facendo la differenza tra media dei valori massimi e media dei valori minimi in una finestra mobile pari a una durata poco maggiore del periodo. In questo modo si è potuto fare un confronto tra i diversi sensori e determinare come variasse l'altezza d'onda nello spazio. Da queste elaborazioni sono state tabellate le H massime raggiunte da ogni sensore, confrontate con le H significative calcolate come 4 volte la deviazione standard.

Di seguito si illustra l'elaborazione fatta per una singola prova a titolo di esempio.

Prova: h60_a1_600_T0_9715_2

$T_{prototipo}$: 4.34 s	$T_{modello}$: 0.97s	$a_{battitore}$: 1.6V
$\lambda_{prototipo}$: 29.47 m	$\lambda_{modello}$: 1.47 m	
$c_{prototipo}$: 6.78 m/s	$c_{modello}$: 1.52 m/s	
$cg_{prototipo}$: 3.39 m/s	$cg_{modello}$: 0.75 m/s	

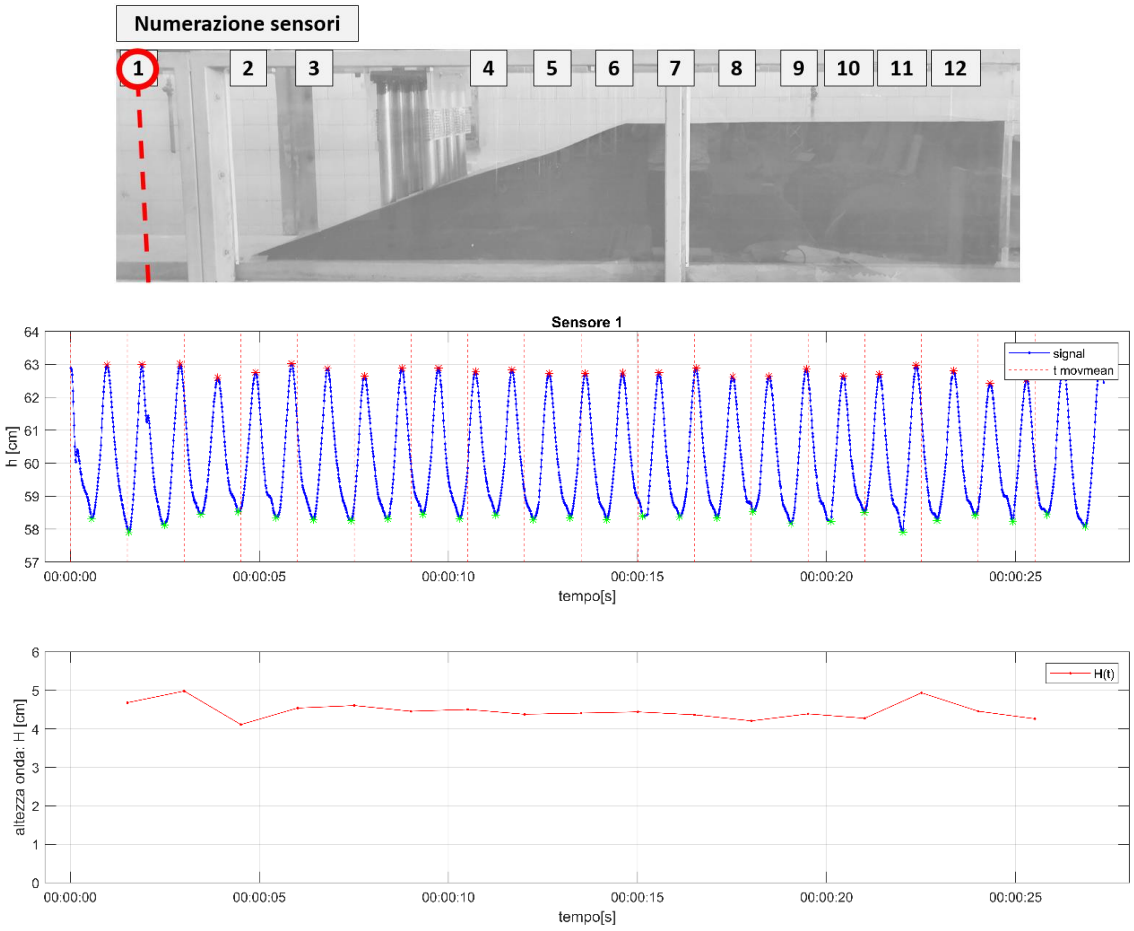

Figura 4.6 massimi e minimi misurati dal sensore 1 e andamento dell'altezza d'onda nel tempo per la prova con h=60 cm, T=0.97s, abatt. =1.6 V

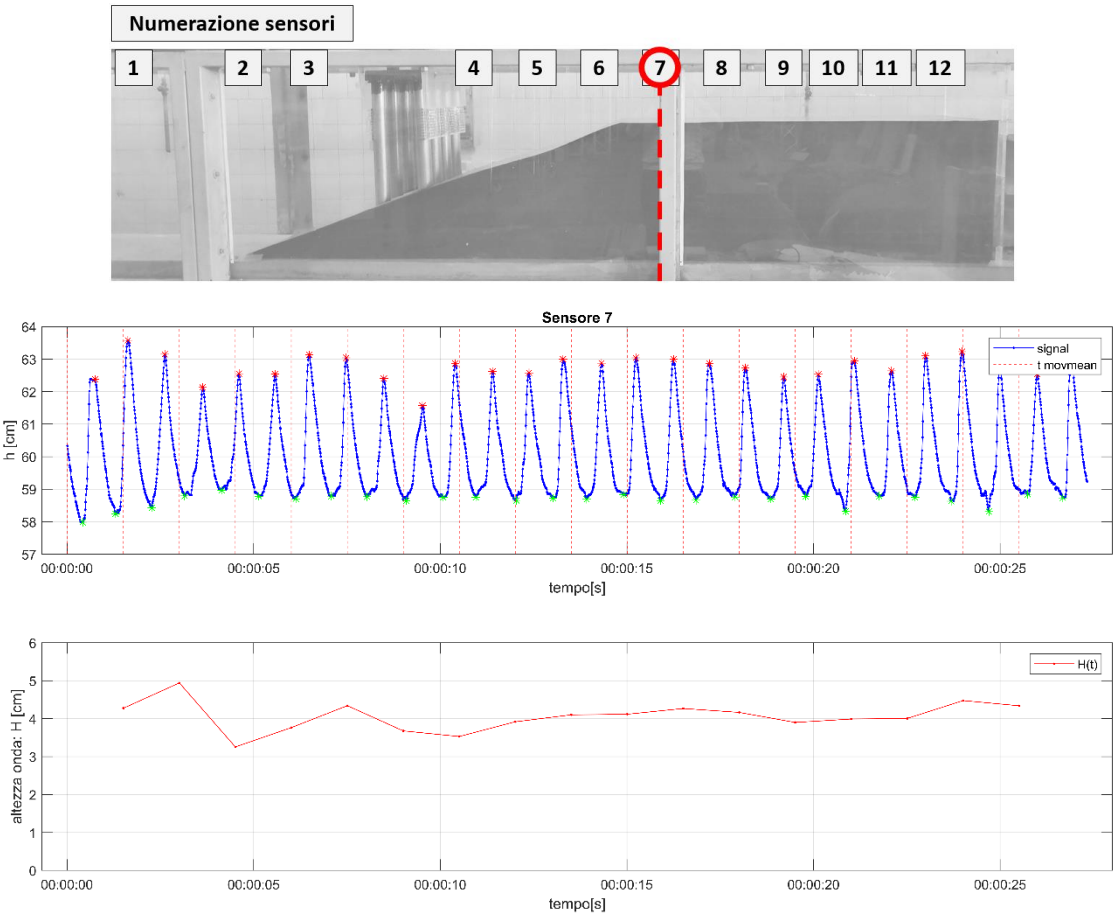

Figura 4.7 massimi e minimi misurati dal sensore 7 e andamento dell'altezza d'onda nel tempo per la prova con h=60 cm, T=0.97s, abatt. =1.6 V

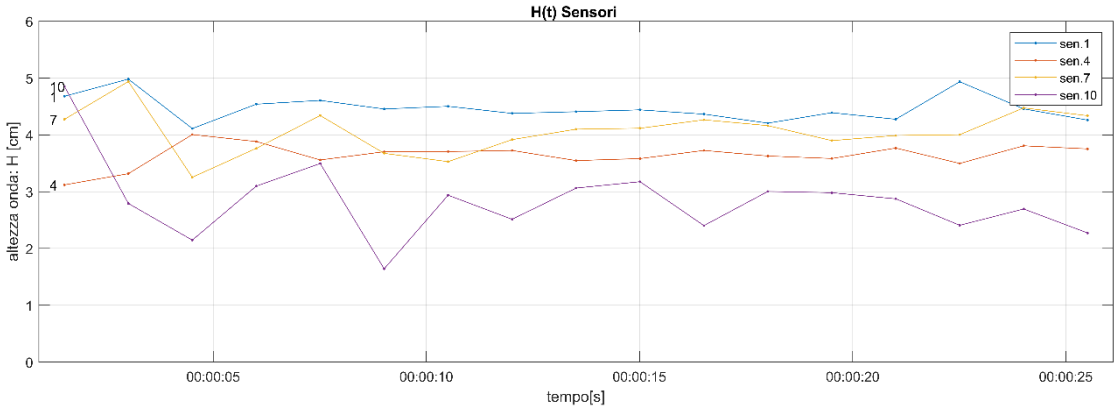

Figura 4.8 confronto dell'altezza d'onda nel tempo tra sensore 1, 4, 7 e 10 per la prova con h=60 cm, T=0.97s, abatt. =1.6

Altezza d' onda modello [cm]

Sensori	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
H max	5.54	5.69	5.15	4.26	5.02	4.50	5.68	4.06	3.71	5.55	4.38	3.39
H significativa	6.50	7.16	6.20	4.90	5.63	5.58	5.39	3.48	2.94	4.58	3.57	3.38

Altezza d' onda prototipo [m]

Sensori	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
H max	1.00	1.11	1.02	0.80	0.92	0.85	0.99	0.67	0.52	0.97	0.64	0.47
H significativa	1.22	1.37	1.25	0.97	1.08	1.06	1.08	0.67	0.39	0.83	0.54	0.33

Infine, per ogni segnale è stata ottenuta la PSD (Power Spectral Density). "*Il termine PSD definisce la Densità Spettrale di Potenza di un segnale. Ogni parola indica una proprietà fondamentale: "Potenza" dice che l'ampiezza è il valore quadratico medio del segnale che si analizza, "Spettrale" specifica che la PSD è una funzione della frequenza e "Densità" si riferisce al fatto che l'ampiezza è normalizzata ad una banda di un singolo Hz.*" (BPS s.r.l.)

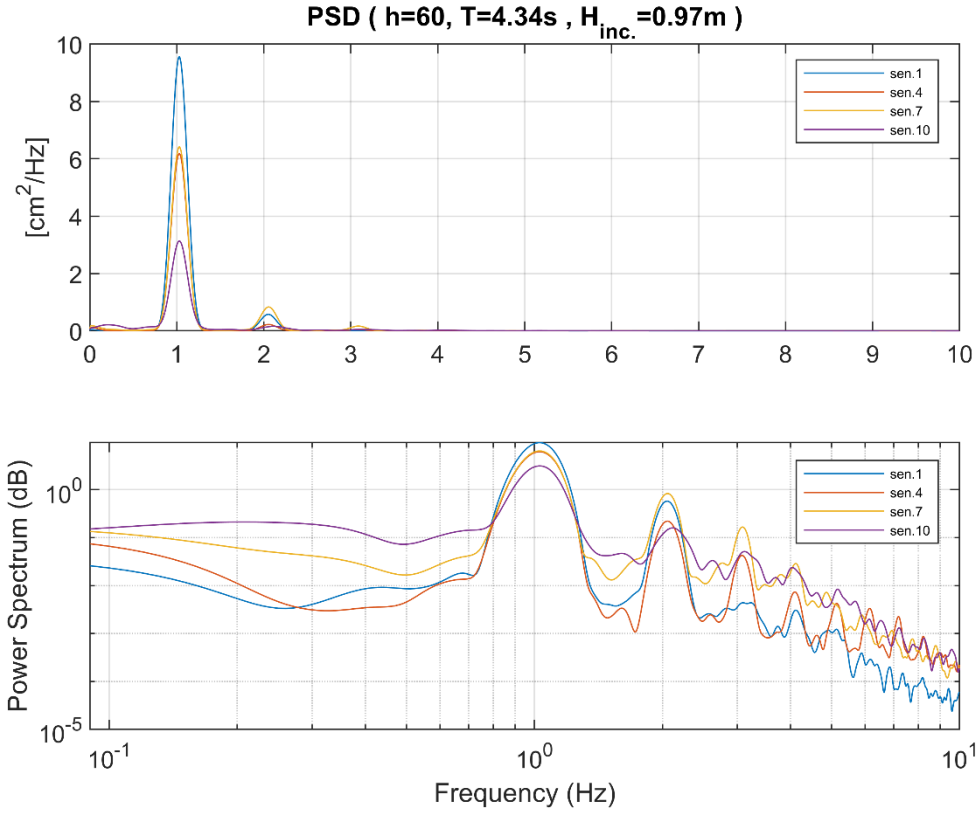

Figura 4.9 confronto delle PSD tra sensore 1, 4, 7 e 10 per la prova con h=60 cm, T=0.97s, $a_{batt.}$ =1.6 V

4.5 Risultati

Dalle analisi precedentemente illustrate si è giunti al calcolo del coefficiente di trasmissione dato dal rapporto tra l'altezza d'onda trasmessa e l'altezza d'onda incidente:

$$K_T = \frac{Ht}{Hi}$$

Tale parametro assume notevole importanza in questo studio perché indicativo dell'efficienza del frangiflutto.

I risultati sono espressi in termini di altezza incidente $H_{inc.}$, coefficiente Kt e altezza d'onda massima raggiunta nella darsena. A tal proposito sono state realizzate delle mappe che consentono di osservare come varia la grandezza indagata al variare del periodo dell'onda T e dell'altezza d'onda incidente H_{inc}.

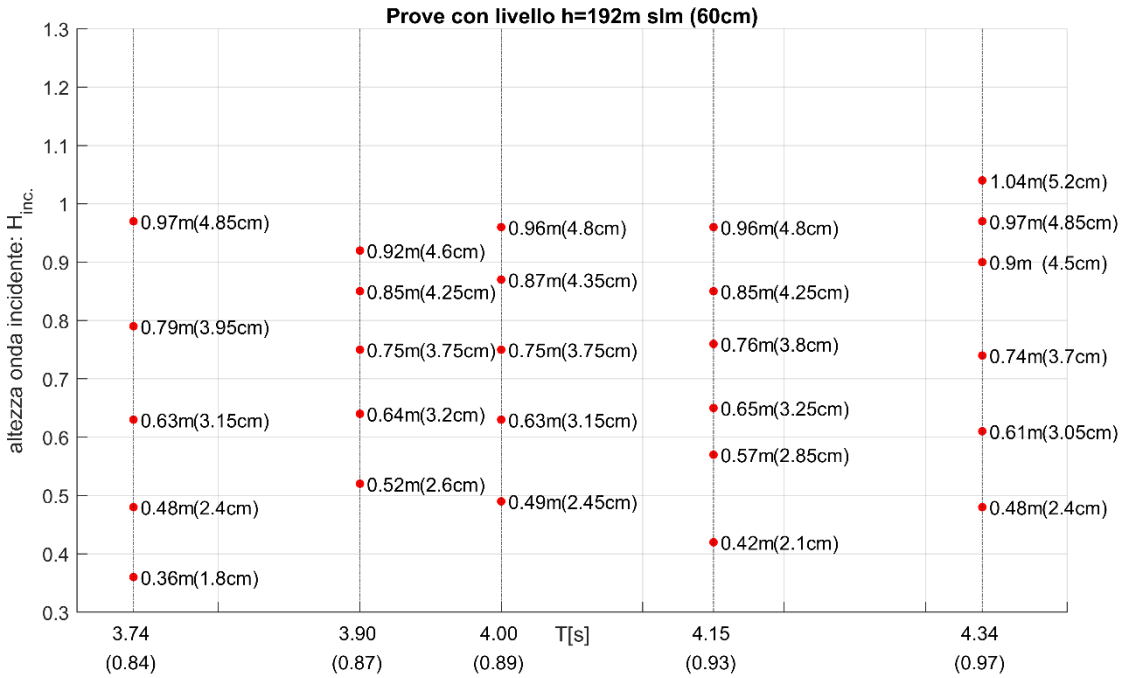

Figura 4.10 Mappa T-Hinc. delle prove effettuate ad h=60cm (192 m slsm)

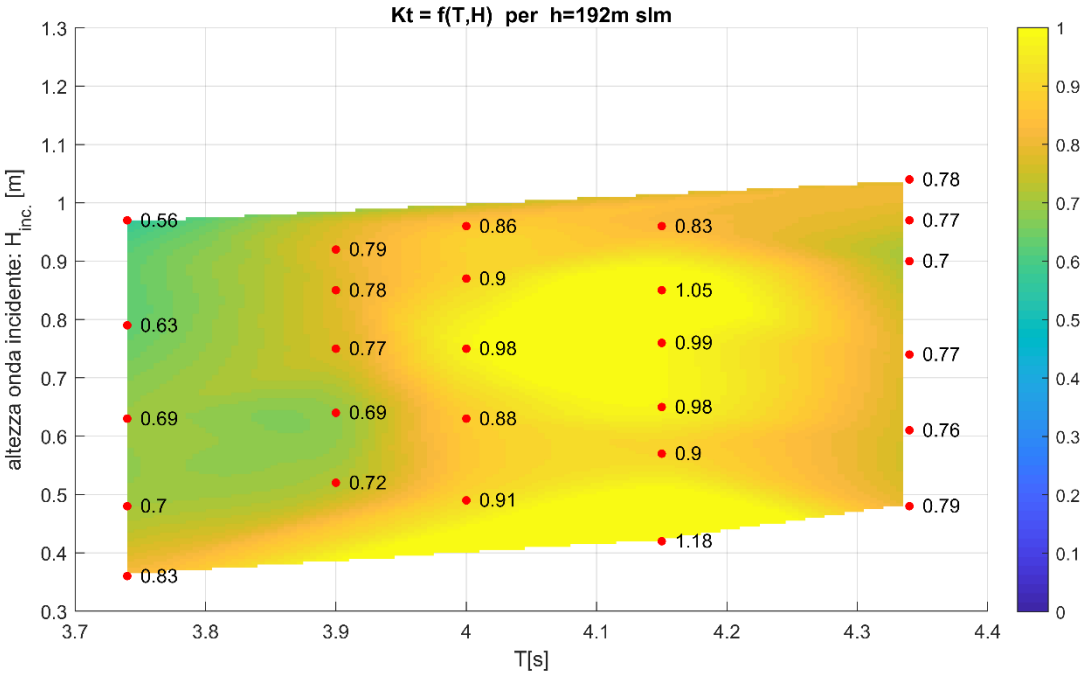

Figura 4.11 Mappa T-$H_{inc.}$ del Kt per h=60cm (192 m slm)

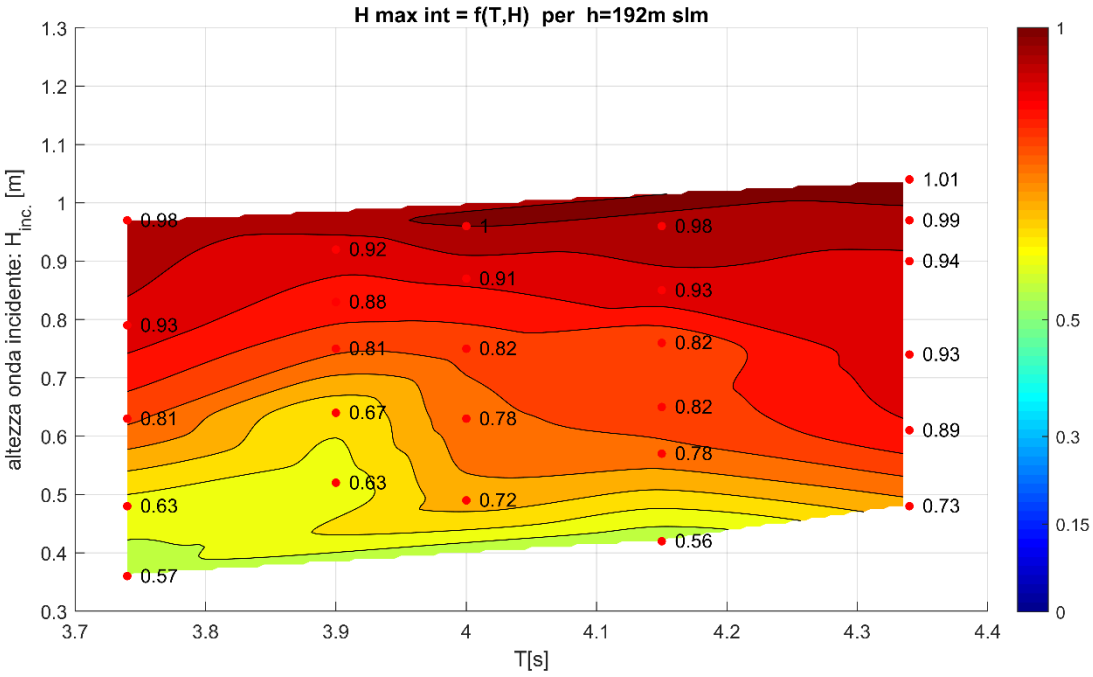

Figura 4.12 Mappa T-$H_{inc.}$ dell'H massima interna al porto per h=60cm (192 m slm)

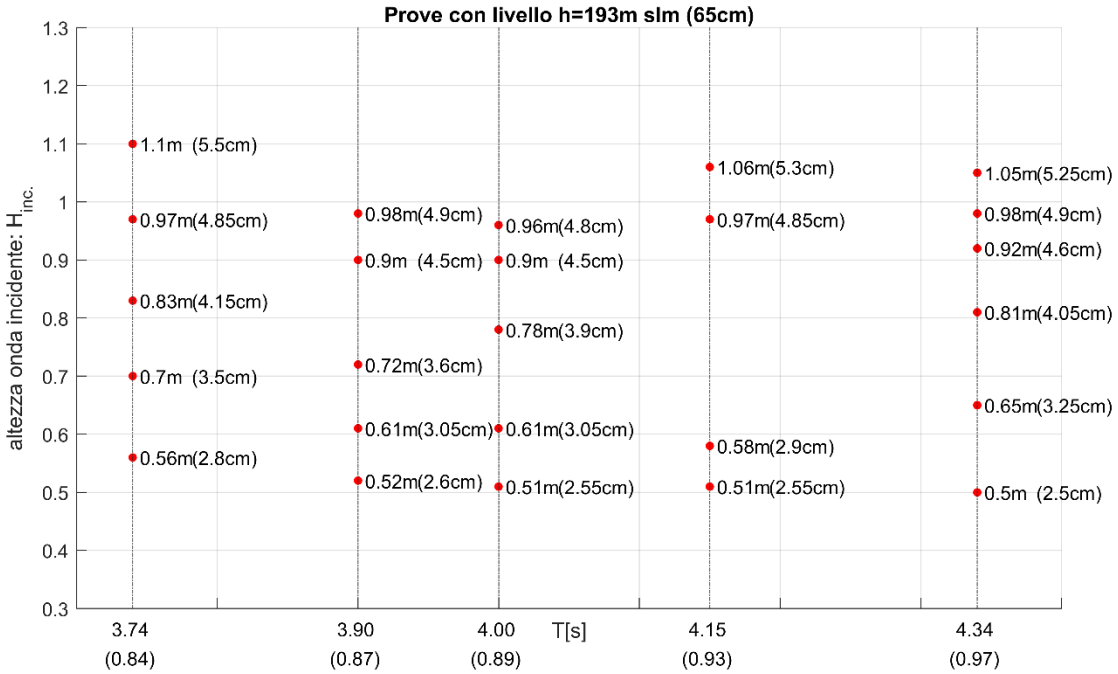

Figura 4.13 Mappa T-$H_{inc.}$ delle prove effettuate ad h=65cm (193 m slsm)

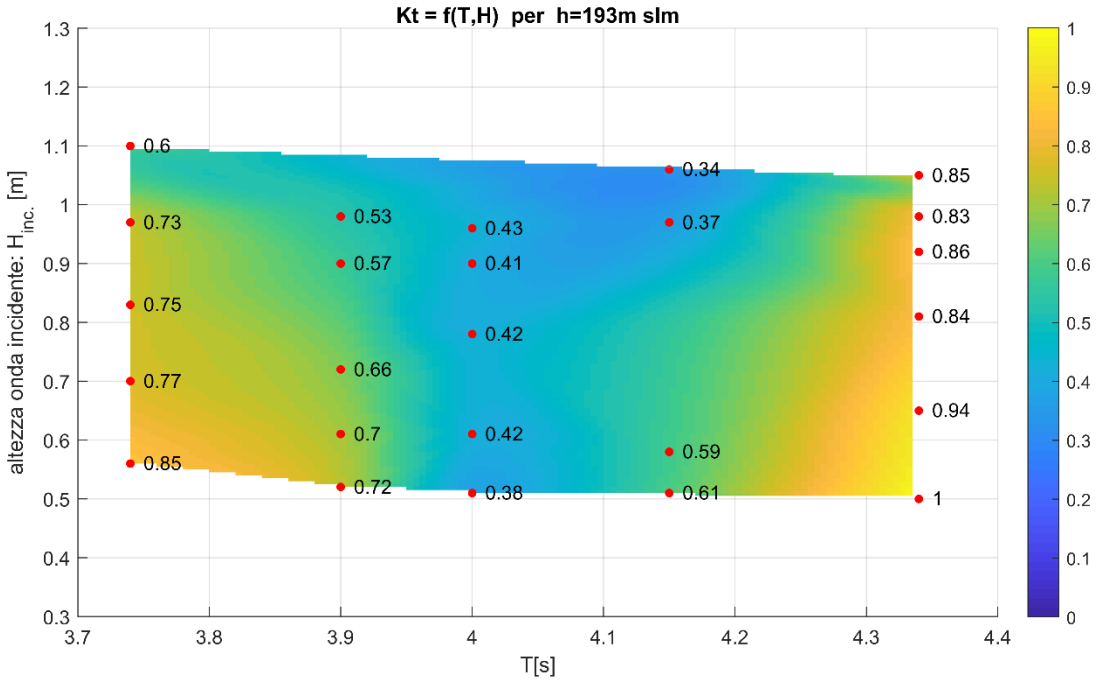

Figura 4.14 Mappa T-$H_{inc.}$ del Kt per h=65cm (193 m slm)

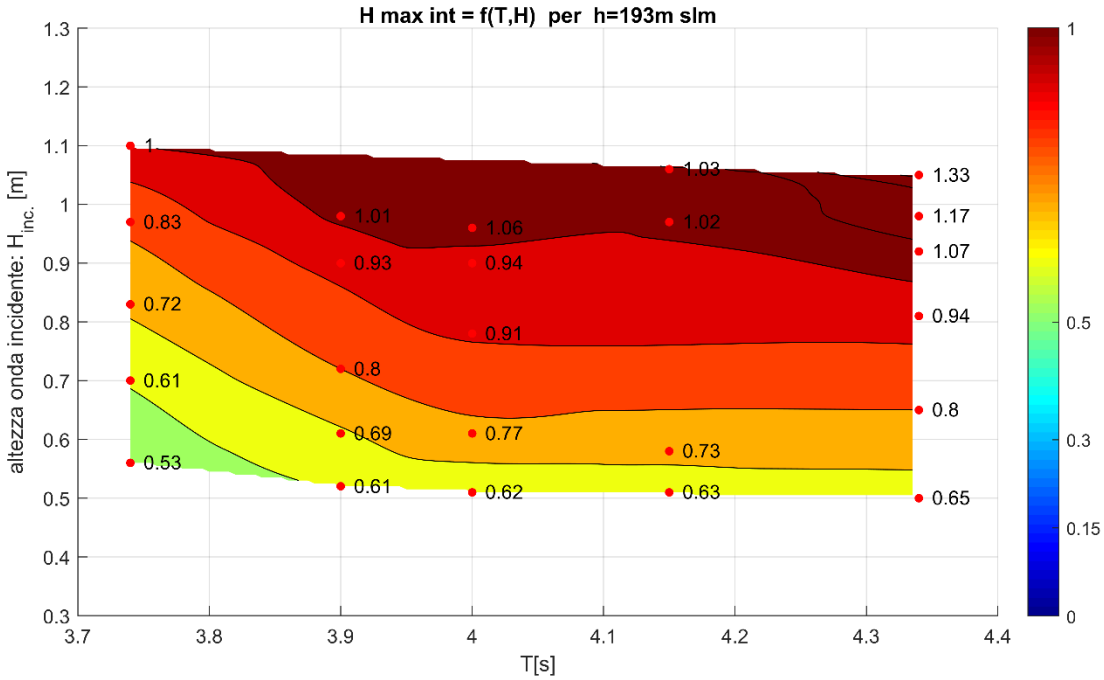

Figura 4.15 Mappa T-$H_{inc.}$ dell'H massima interna al porto per h=65cm (193 m slm)

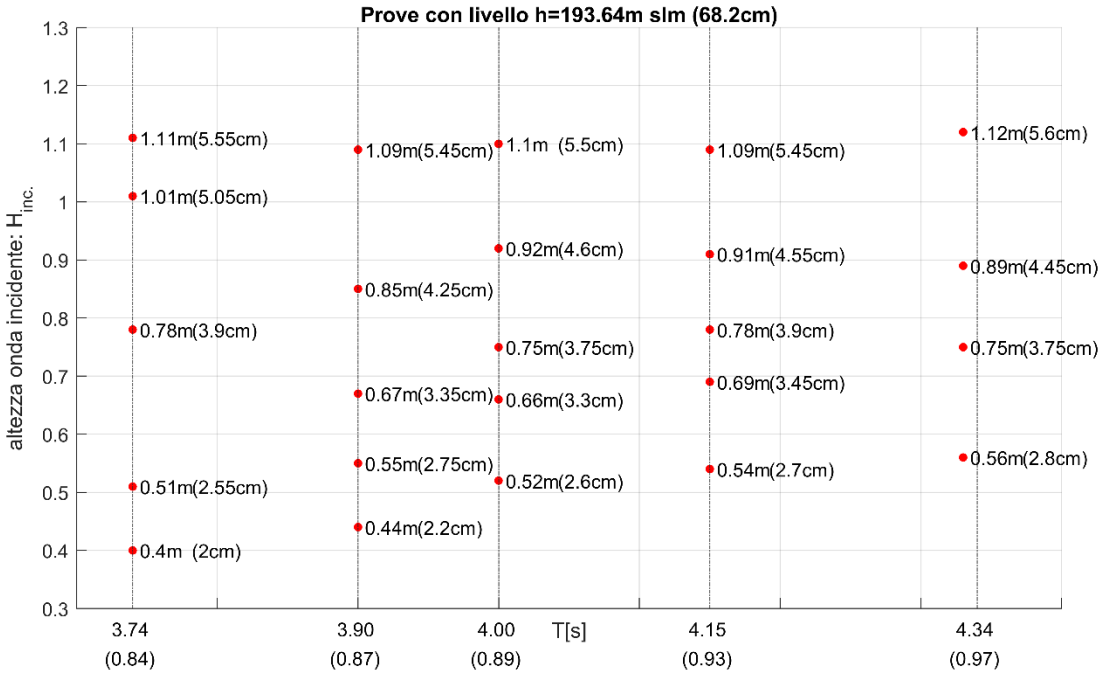

Figura 4.16 Mappa T-$H_{inc.}$ delle prove effettuate ad h=68.2cm (193.64 m slsm)

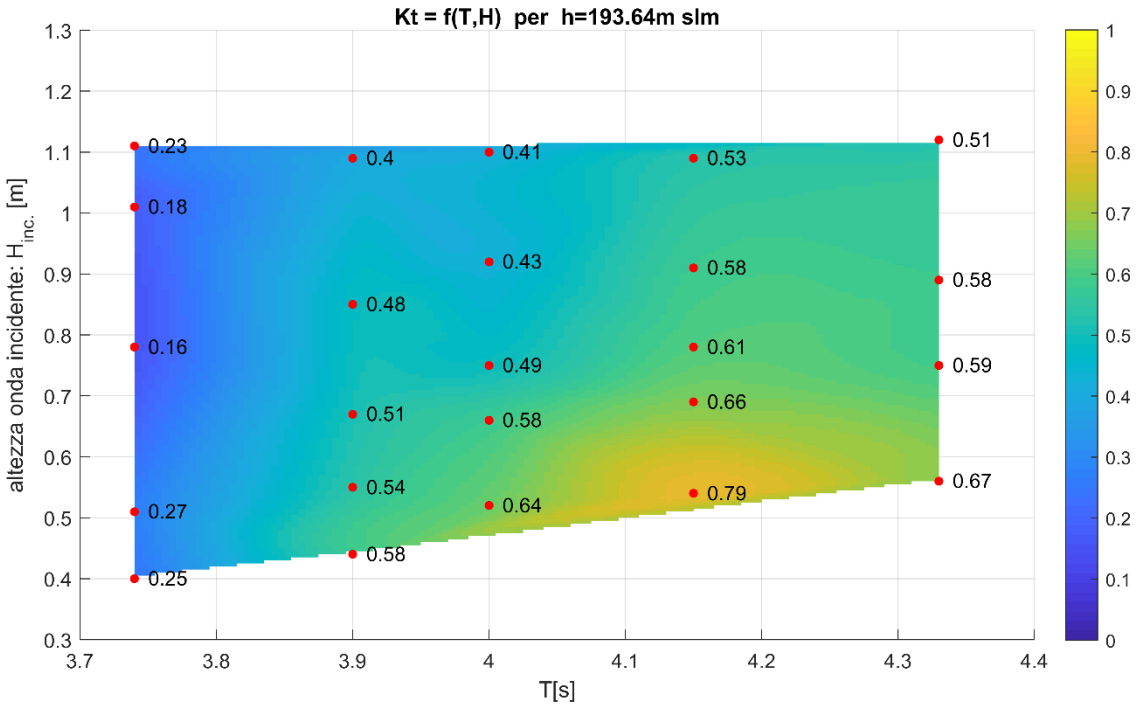

Figura 4.17 Mappa T-$H_{inc.}$ del Kt per h=68.2cm (193.64 m slm)

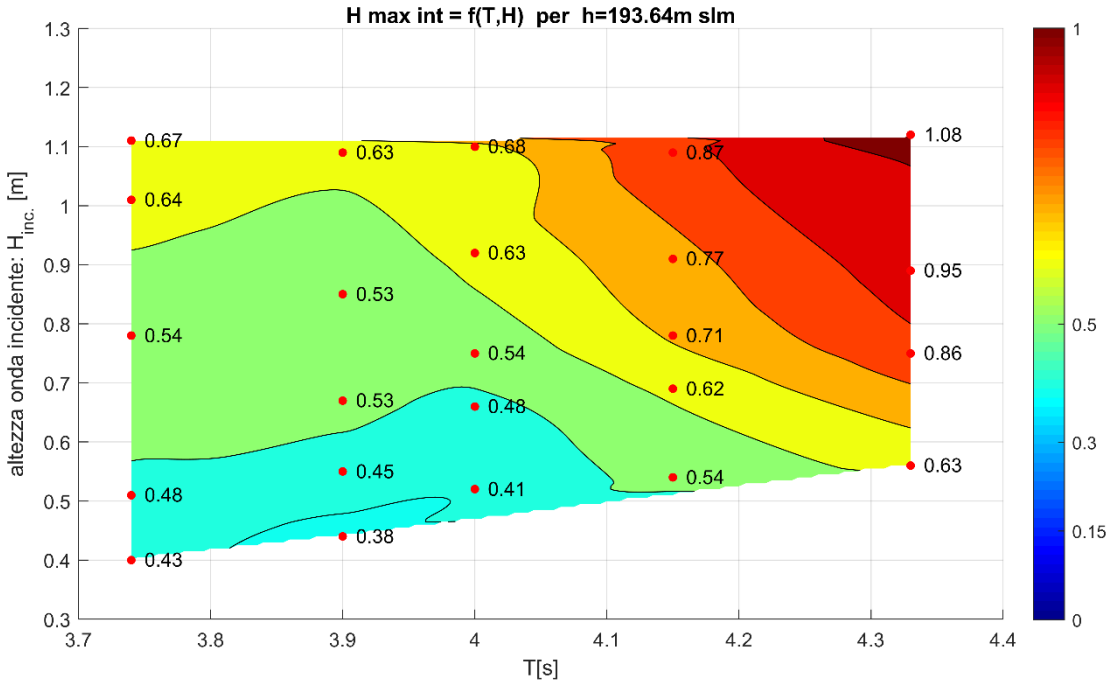

Figura 4.18 Mappa T-$H_{inc.}$ dell'H massima interna al porto per h=68.2cm (193.64 m slm)

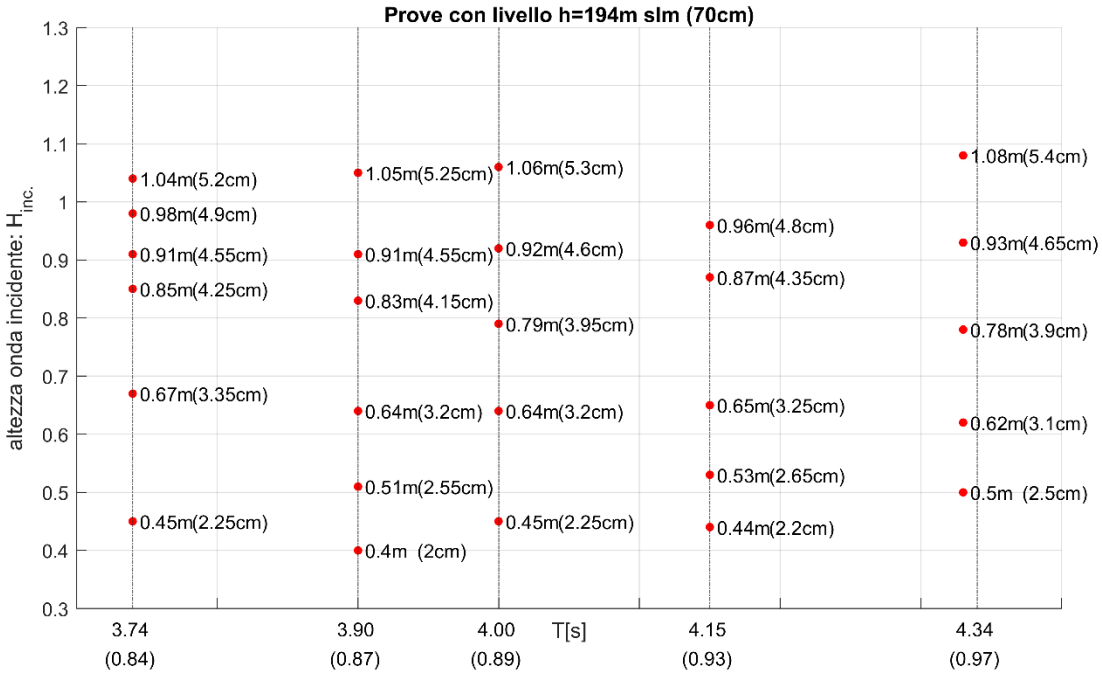

Figura 4.19 Mappa T-$H_{inc.}$ delle prove effettuate ad h=70cm (194 m slsm)

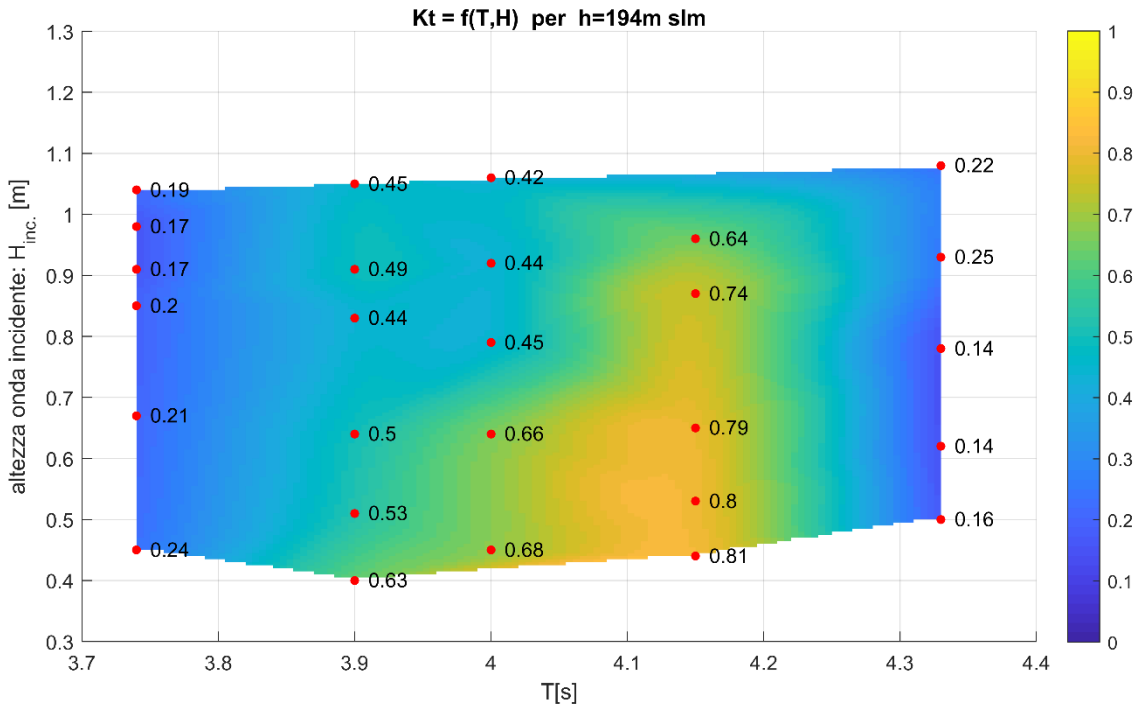

Figura 4.20 Mappa T-$H_{inc.}$ del Kt per h=70cm (194 m slm)

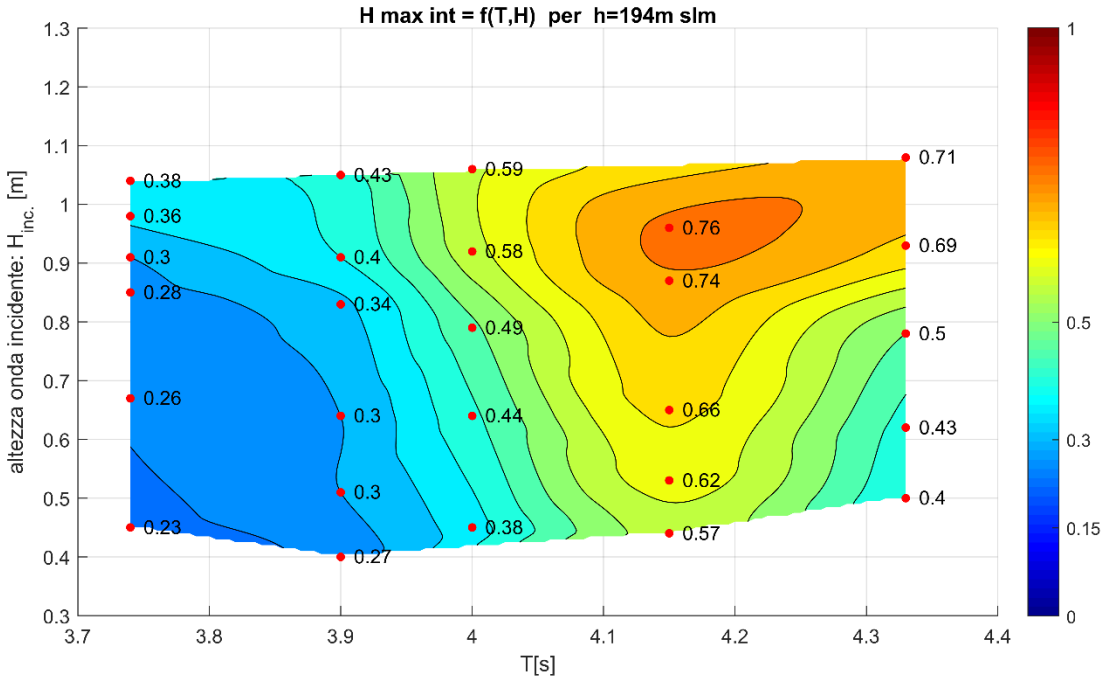

Figura 4.21 Mappa T-$H_{inc.}$ dell'H massima interna al porto per h=70cm (194 m slm)

4.5.1 Osservazioni generali

Dai risultati ottenuti si può osservare che il coefficiente di trasmissione Kt, parametro con cui stimare l'efficienza del molo, tende quasi sempre a diminuire con l'aumentare dell'altezza d'onda incidente H_{inc}: ciò vale per qualsiasi profondità h e qualsiasi periodo T. Tale andamento può essere spiegato dal fatto che, quando l'onda aumenta la sua altezza, impatta con una superfice maggiore contro il molo e questo genera maggiore riflessione e dispersione quindi meno onda trasmessa.

Si nota invece che il Kt al variare delle profondità h, è accentuato per diversi periodi T (o frequenze =1/T) dell'onda. Nel caso di h=192m slm si vede che i periodi in cui Kt è maggiore sono T= 4s e T=4.34 s; per h=193m slm invece il frangiflutti filtra meglio le onde con T= 4s ma non le altre due sperimentate; per il livello medio del lago h=193.64 m slm e il livello h=194 m slm si nota un comportamento simile, infatti, si osserva che con il periodo T = 4.15s c'è più onda trasmessa. Il diverso comportamento del frangiflutto può trovare una spiegazione nella variazione del tiraggio **D** che si ha per le diverse profondità. Si osserva che D assume i seguenti diversi valori:

- h = 60.0 cm (192m slm) D = 0 cm (0 m)
- h = 65.0 cm (192m slm) D = 5.0 cm (1 m)
- h = 68.2 cm (193.64 m slm) D = 8.2 cm (1.64 m)
- h = 70.0 cm (192m slm) D = 10.0 cm (2 m)

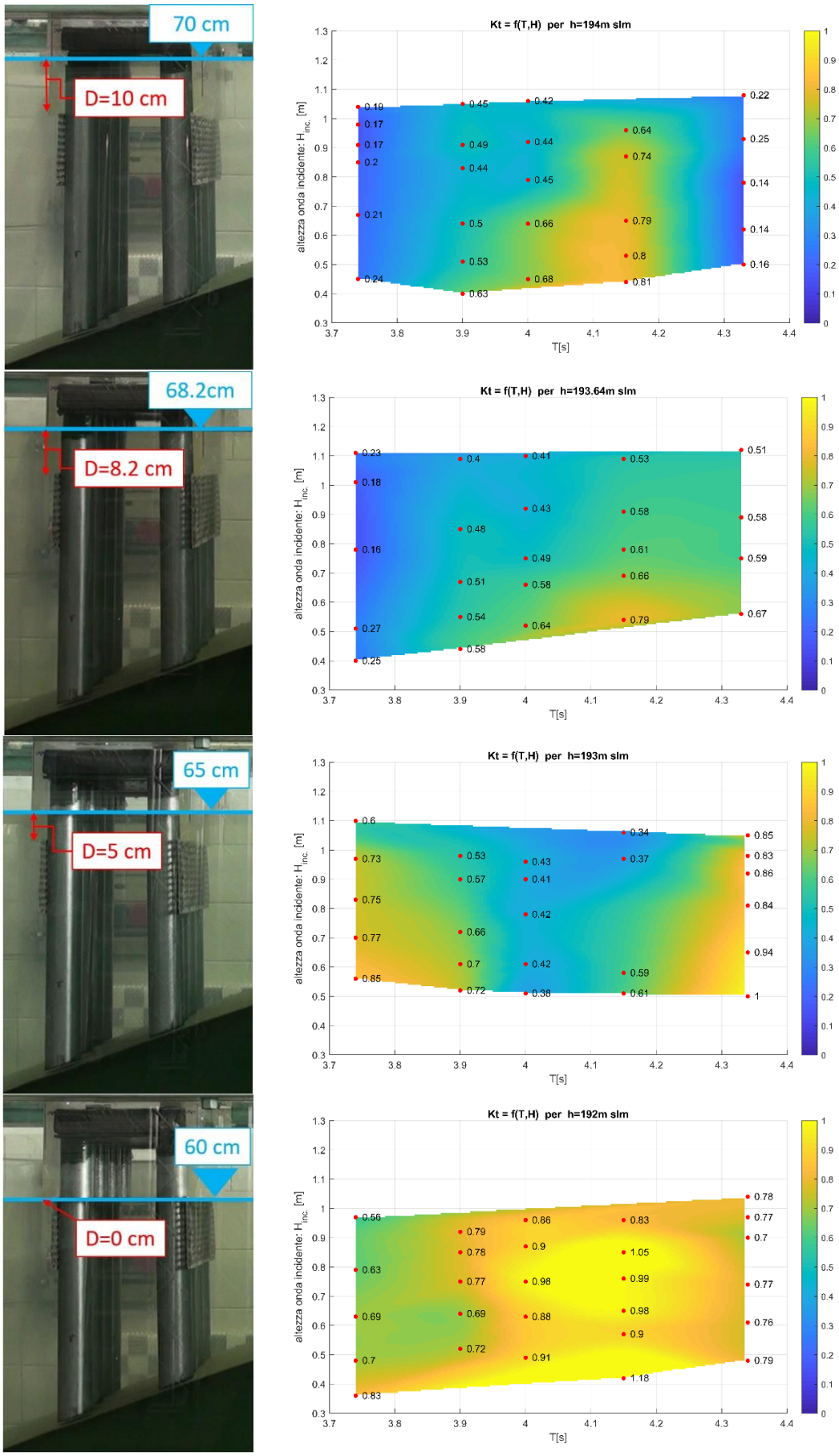

Figura 4.22 Confronto tra variazione del tiraggio D e mappe di Kt

È fondamentale in questo studio considerare che il Kt può dare informazioni riguardo l'efficienza del frangiflutti, anche se essa può risultare fuorviante riguardo a ciò che accade all'interno della darsena. A tal proposito si riporta di seguito una parte di studio condotto in precedenza dal professore Davide Poggi attraverso l'applicazione di formule empiriche alla serie storica del massimo giornaliero della velocità media oraria del vento e dei livelli del lago:

"*Per assurdo si assuma che il coefficiente di trasmissione sia del 100%, l'onda trasmessa nel porto sarebbe pari a quella incidente che, per l'evento del 25 marzo, risulta essere di circa 60 cm. Anche in questo caso l'altezza dell'onda all'interno del porto è inferiore a quella osservata e che può essere stimata in 1-1.2 m. L'incongruenza consiste nel fatto che l'onda calcolata è quella trasmessa attraverso la barriera frangiflutti ma non quella che si accumula, a causa dei giochi di riflessione contro le banchine rigide, nel porto. Si ritiene che la problematica della trasmissione dell'onda sotto la barriera sia solo uno dei problemi, quello scatenante, ma non l'unico. L'altro problema costituito dalle mura verticali e lisce delle banchine fisse interne al porto che, non avendo grandi capacità di assorbire l'onda, la accumulino nello specchio acqueo. Chiaramente, se non esistesse un'onda trasmessa non esisterebbero nemmeno le onde riflesse. Ovvero, sebbene l'elemento scatenate sia certamente la bassa efficacia nel riflettere o dissipare le onde della barriera frangiflutti, il problema diviene molto più complesso all'interno del porto. Altra problematica, anche se minore e legata all'innescarsi delle grandi onde all'interno del porto, è dovuta alla dimensione del bacino portuale le cui dimensioni caratteristiche (profondità dell'acqua e distanza tra la barriera e la banchina) sono tali da imporre alle onde riflesse nel porto una frequenza che è prossima o multipla di quella delle onde incidenti.*" (Poggi, 2020)

Confrontando le mappe di Kt con quelle delle altezze d'onda massime misurate all'interno del bacino portuale, è possibile constatare come la concomitanza della riflessione contro il muro verticale e del passaggio da acque profonde ad acque basse, che genera un irripidimento dell'onda come noto da teoria, porta ad un aumento dell'altezza d'onda interna che nei casi peggiori risultano più alte delle onde incidenti. Attraverso le prove con il modello, quindi, si è visto come all'interno della darsena si formano delle onde stazionarie caratterizzate da punti in cui non c'è oscillazione, i nodi, e punti in cui l'ampiezza aumenta anche fino al doppio dell'onda incidente, i ventri.

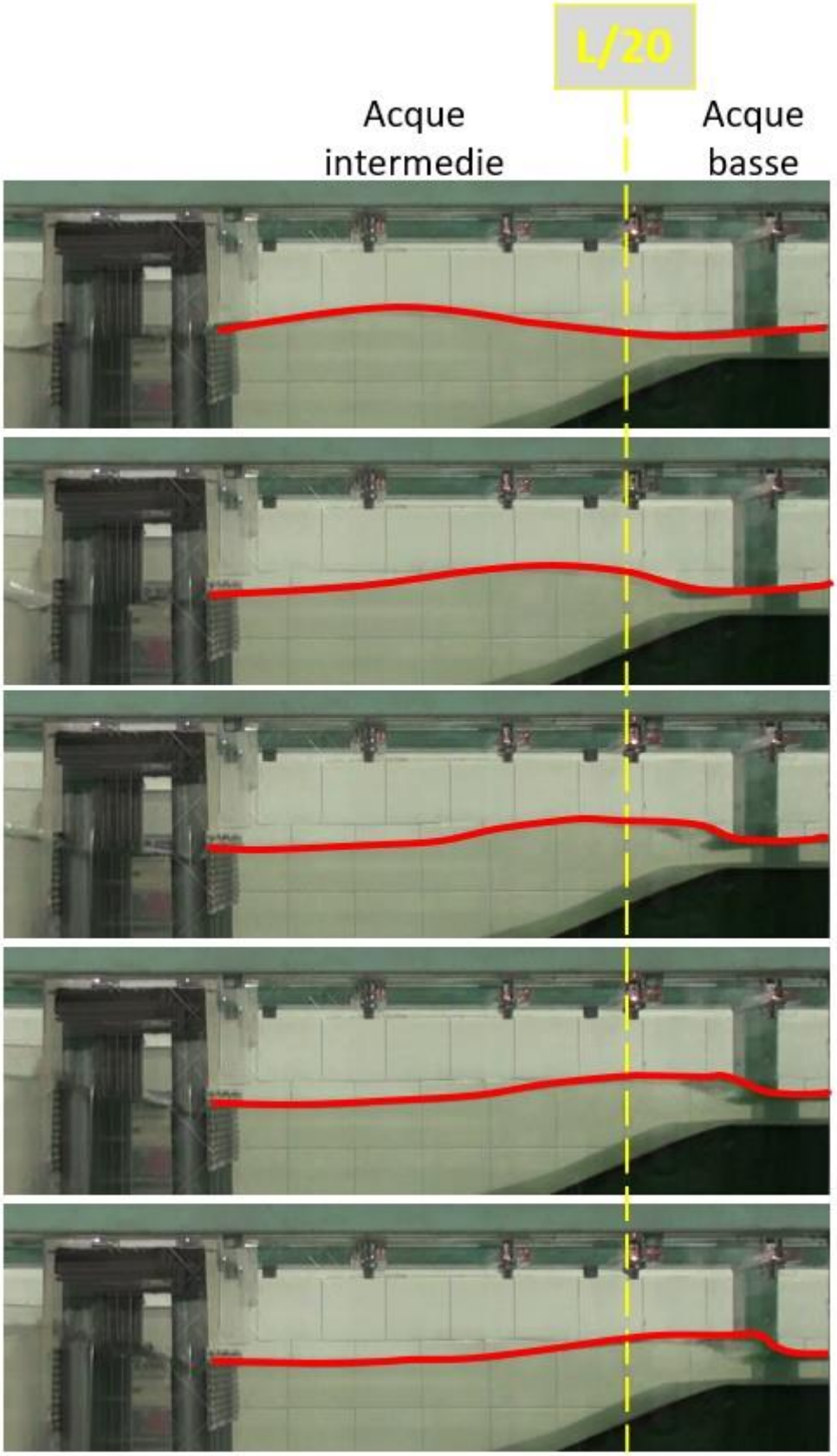

Figura 4.23 irripidimento dell'onda nel passaggio da acque intermedie ad acque basse

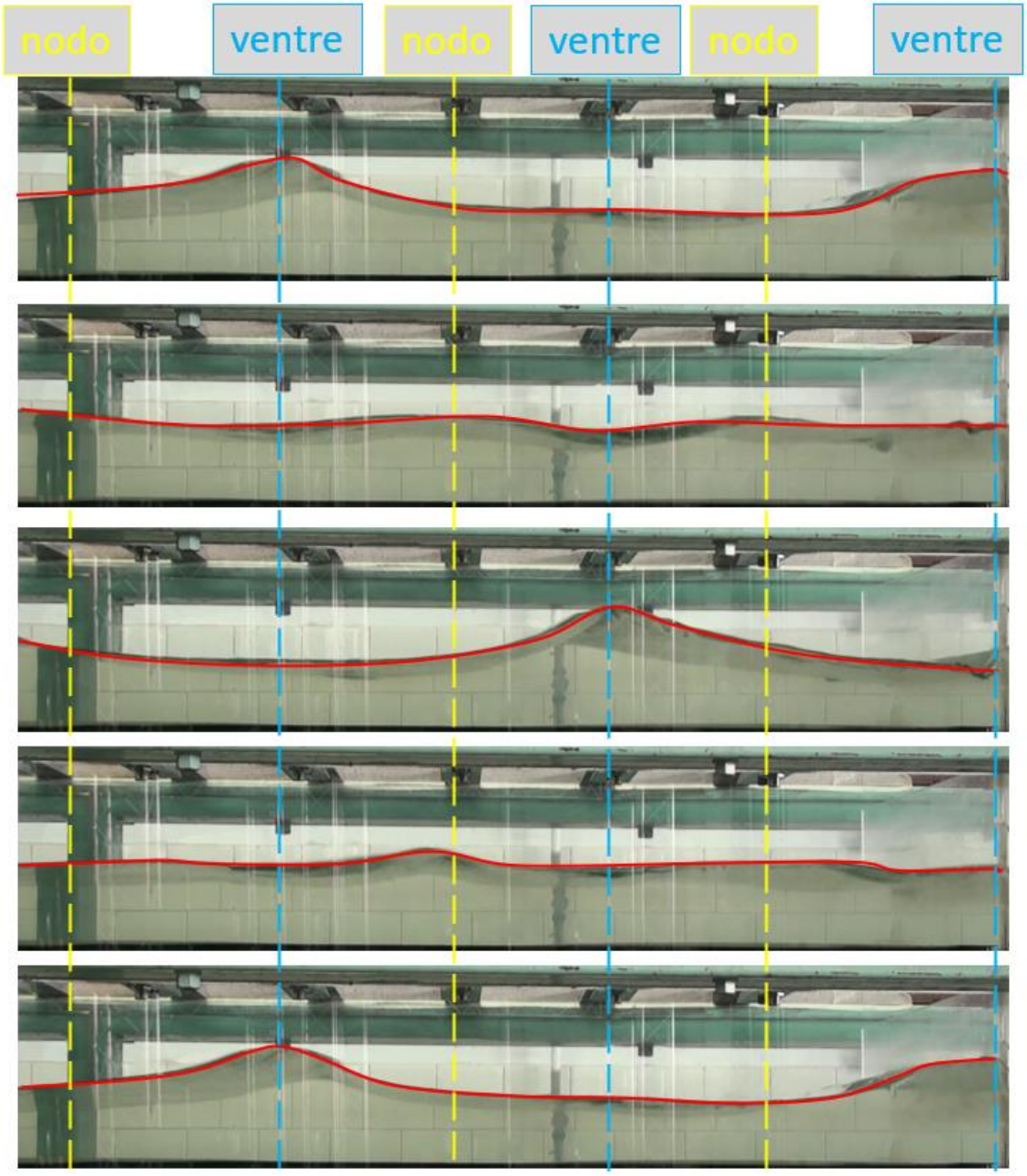

Figura 4.24 Formazione di onde stazionarie nella zona interna del bacino portuale

Questo effetto si può osservare anche attraverso il confronto degli andamenti di H nel tempo e delle PSD dei vari sensori. Ad esempio, se si considerano i grafici di seguito illustrati si vede come l'altezza dell'onda al sensore 1 (curva azzurra) nel tempo si stabilisce intorno a 4 cm, l'altezza dell'onda al sensore 4 (curva rossa), installato subito dopo la diga, si stabilisce intorno a 3 cm (infatti per questa prova si ha un Kt=0.7). È possibile, tuttavia, notare come in corrispondenza del sensore 7 (curva gialla) il valore di H risulta essere maggiore rispetto al sensore 1, pertanto maggiore dell'altezza d'onda incidente. Dal punto di vista della PSD si osserva come l'onda al sensore 4 ha un'energia (area sotto la curva) minore rispetto al sensore 1: in corrispondenza del sensore 7, tuttavia, l'onda ha un'energia che ritorna a quella del sensore 1 e

inoltre si sposta su altre frequenze, indice del fatto che l'onda si sia allontanata dall'andamento sinusoidale. Questo si spiega per l'incontro tra onde riflesse provenienti da valle e onde trasmesse provenienti da monte.

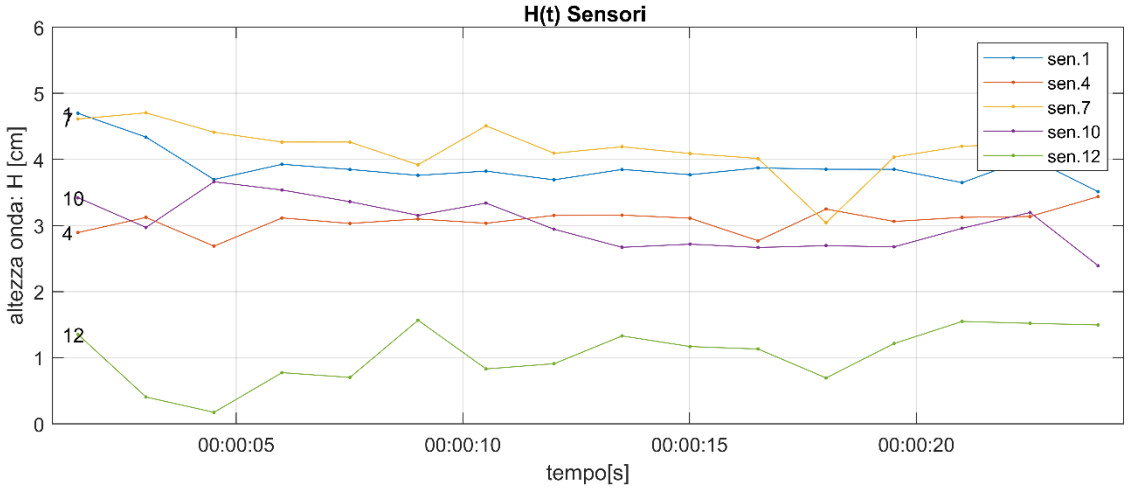

Figura 4.25 confronto dell'altezza d'onda nel tempo tra sensore 1, 4, 7 e 10 per la prova con h=60 cm, T=0.97s, abatt. =1.4

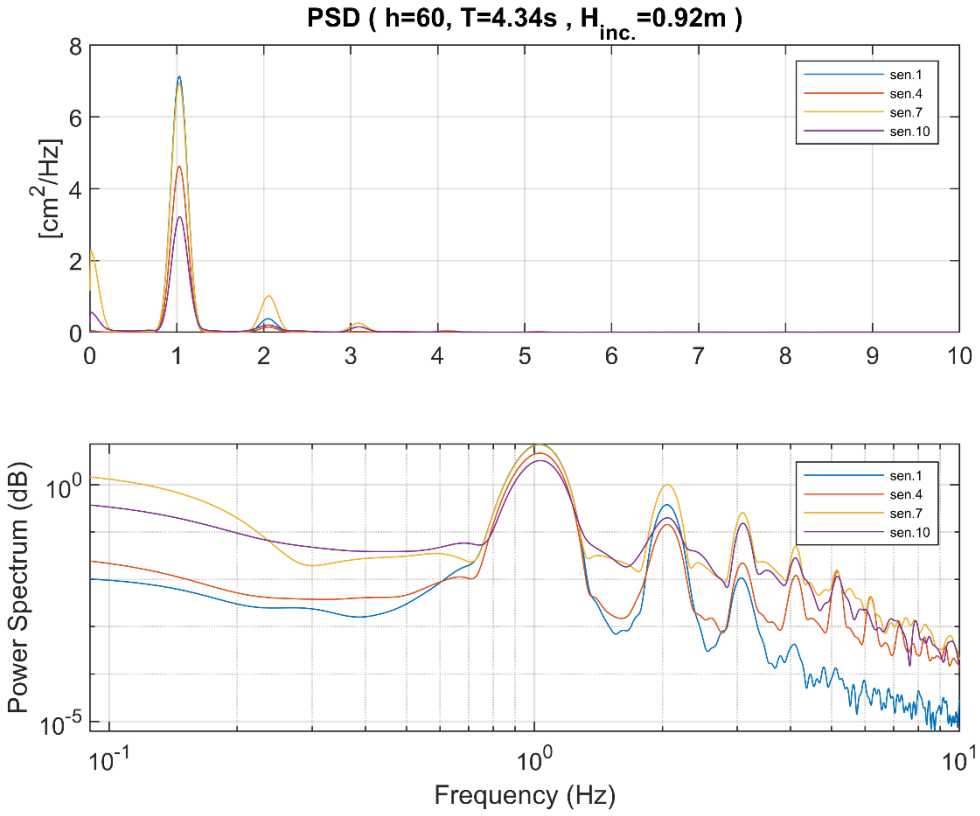

Figura 4.26 confronto delle PSD tra sensore 1, 4, 7 e 10 per la prova con h=60 cm, T=0.97s, abatt. =1.4

Le osservazioni fatte possono essere estese a tutte le prove e le mappe dei Kt, messe a confronto con le mappe delle H massime interne, indicano per quali valori di T ed H dell'onda incidente si innesca il fenomeno delle onde stazionarie e, con quale intensità.

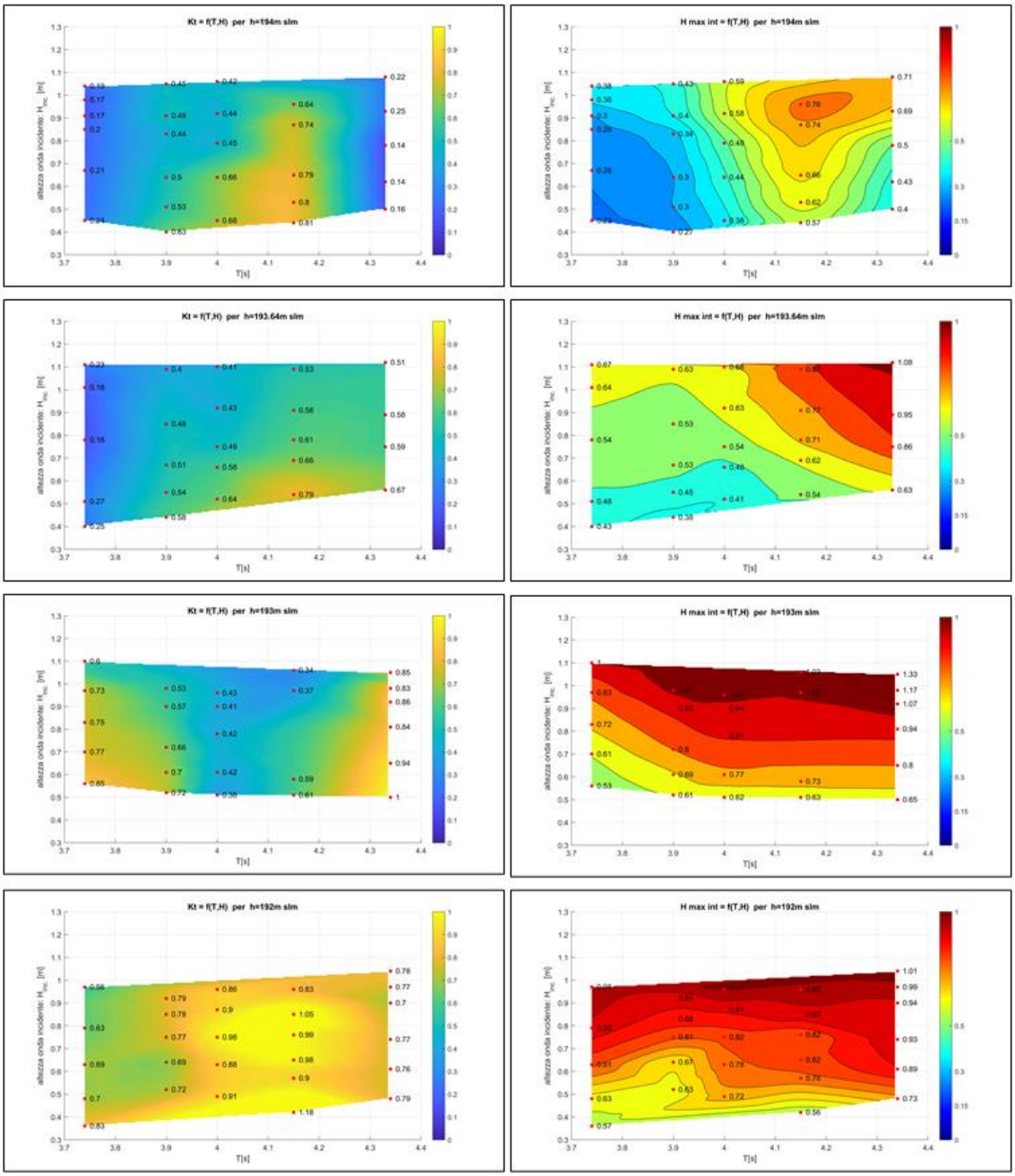

*Figura 4.27 Confronto tra le mappe (T, Hinc) del coefficiente di trasmissione **Kt** e dell'altezza d'onda massima nel bacino portuale **H max interna***

4.5.2 Osservazioni riguardo al caso del 25 marzo 2019

Il moto ondoso del 25 marzo 2019 può essere individuato nella mappa h=193m slm considerando che:

- era caratterizzato da un livello del lago pari a circa 192.7 m slm.
- l'altezza d'onda incidente era di circa 60 cm
- il periodo T = 4s è il massimo raggiunto dalle serie storiche.

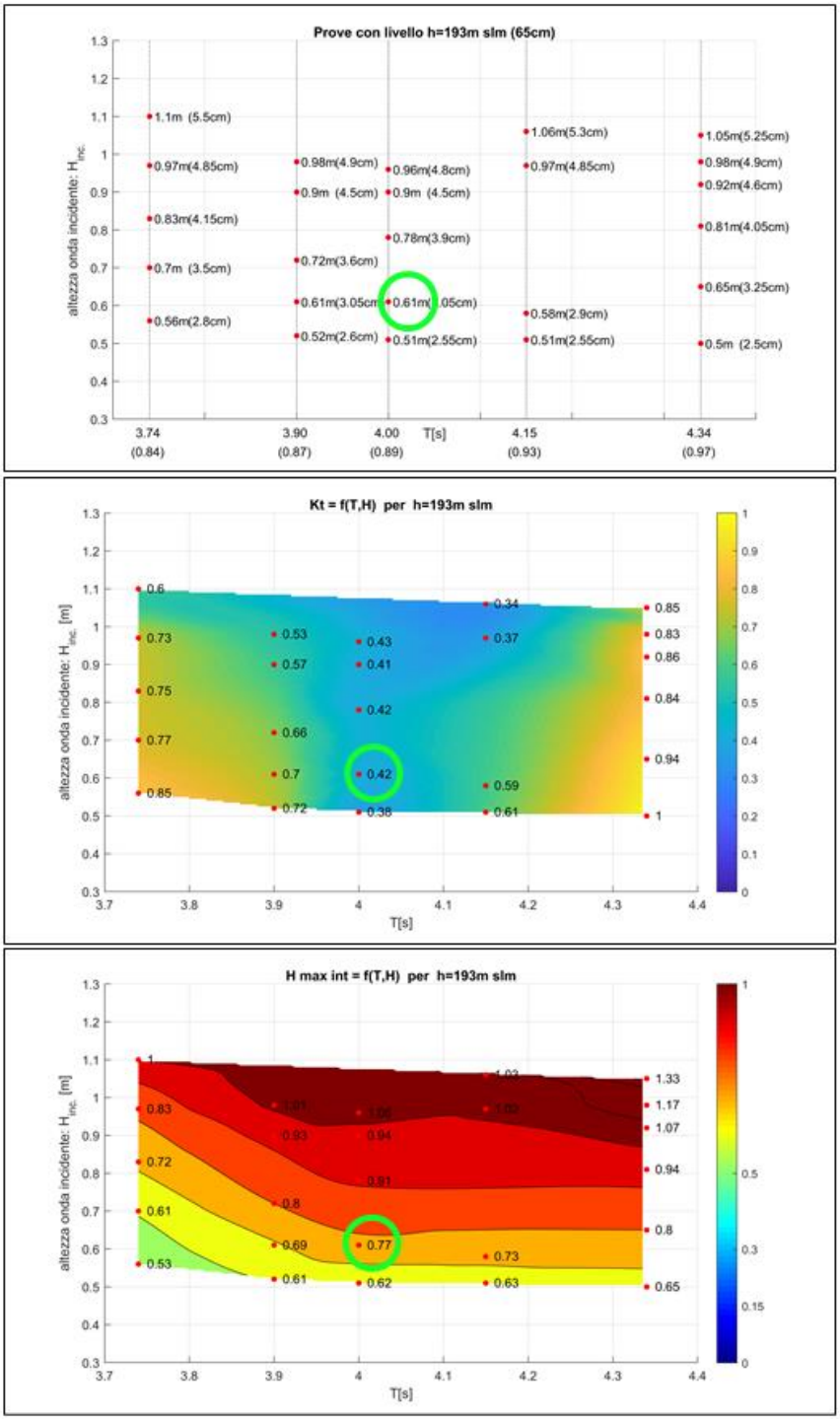

Figura 4.28 individuazione del caso più vicino all'evento del 25 marzo 2019

Per tale condizione si illustrano anche gli andamenti di H nel tempo e gli andamenti delle PSD per i sensori 1,4,9,10 e 11.

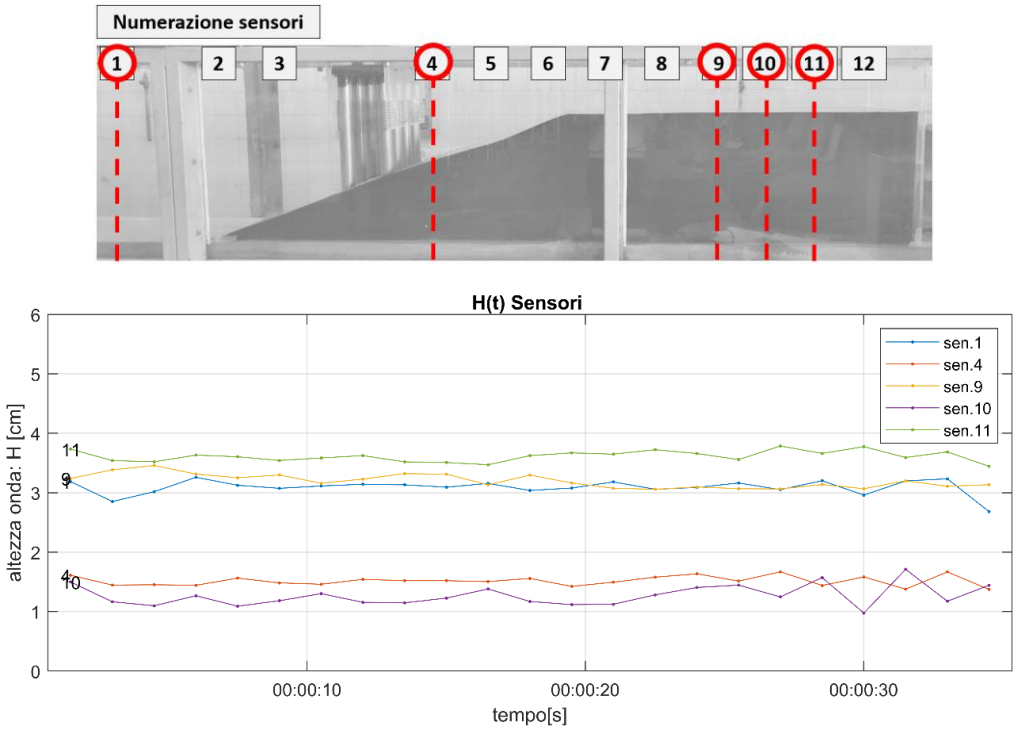

Figura 4.29 confronto dell'altezza d'onda nel tempo tra sensore 1, 4, 9 10e 11 per la prova con h=60 cm, T=0.97s, abatt. =1.4

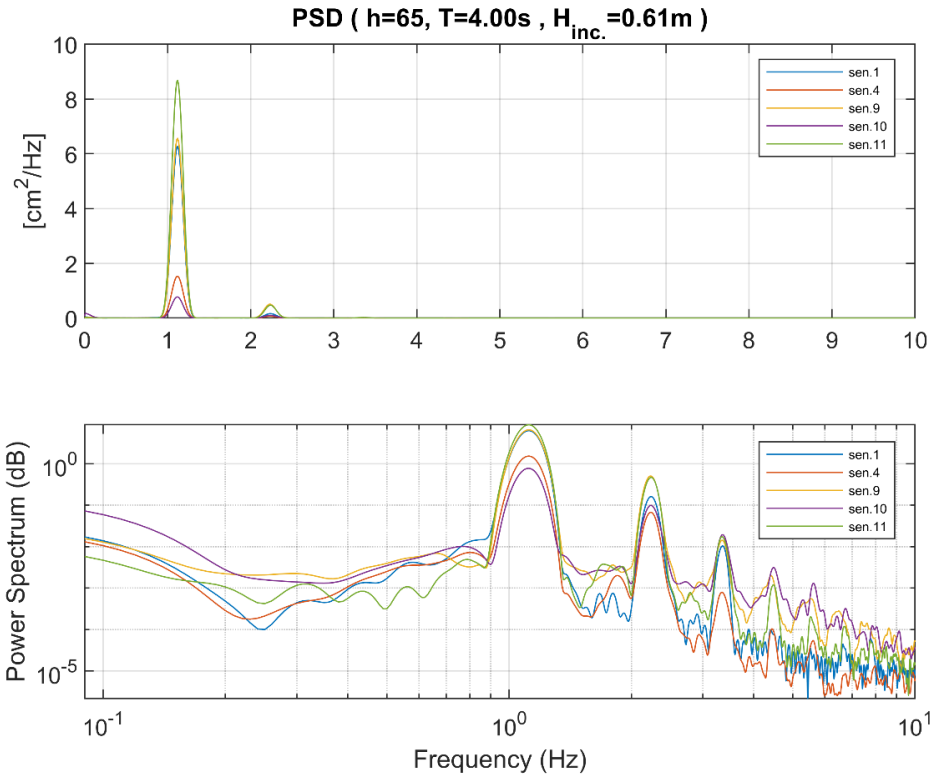

Figura 4.30 confronto delle PSD tra sensore 1, 4, 7 e 10 per la prova con h=60 cm, T=0.97s, abatt. =1.4

Si nota che sebbene tra il sensore 1 e 4 ci sia una riduzione dell'altezza d'onda e dell'energia dovuta all'azione del frangiflutti (Kt= 0.42), nella parte più interna del porto si innesca un'onda stazionaria con valori massimi di oscillazione in corrispondenza del sensore 9 e del sensore 11.

Le prove, inoltre, sembrano confermare il valore di Kt stimato con l'applicazione di formule empiriche tra 0.4-0.45 e, in più, mostrano come il modello riesca a dare indicazioni sui fenomeni che si innescano all'interno del molo: difatti il valore raggiunto dall'altezza d'onda supera l'altezza d'onda incidente proprio come è successo il 25 marzo per il nuovo porto turistico di Stresa.

Conclusioni

Il lavoro svolto fornisce uno strumento capace di ricreare e studiare la contemporanea presenza all'interno del bacino portuale di fenomeni, come la trasmissione dell'onda attraverso la barriera frangiflutti, la riflessione contro le banchine rigide, l'irripidimento dell'onda nel passaggio tra acque profonde ad acque basse e l'instaurarsi di onde stazionarie; fenomeni questi, che presenti simultaneamente, rendono complessa l'analisi quantitativa attraverso un sistema di equazioni capace di descriverli.

La valenza del modello fisico creato per il porto di Stresa è quella di poter scalare le dimensioni fisiche del prototipo sperimentando diversi parametri dell'onda incidente. Quindi, si possono riportare i risultati ottenuti dal modello alla realtà.

Le misure svolte in quest' analisi sperimentale hanno riguardato quattro livelli idrici e, per ognuno di essi, si sono indagati 3 periodi differenti nell'intorno di T = 4 s, che è risultato essere il periodo di eventi più gravosi osservati dall'analisi delle serie storiche; per ogni periodo, quindi, si è fatta variare l'ampiezza del battitore per ottenere onde incidenti il molo, con diverse altezze.

I risultati delle analisi eseguite sono stati rappresentati tramite grafici degli andamenti dell'altezza d'onda nel tempo H(t) e delle PSD (Power Spectral Density) e con la realizzazione di mappe che mostrano come varia il coefficiente di trasmissione Kt (parametro indicativo dell'efficacia del frangiflutto) e l'altezza d'onda massima interna al porto, al variare del periodo T e dell'altezza dell'onda incidente. Questo per i quattro livelli esaminati.

Dai risultati è emerso che il caso più gravoso è quello corrispondente al livello idrico minimo del lago, come ipotizzato inizialmente: ciò sia da un punto di vista dell'efficienza del molo, in quanto il coefficiente di trasmissione Kt è alto sia da un punto di vista delle altezze massime raggiunte all'interno del molo, che superano i valori raccomandati come soglia di pericolo. In aggiunta, nonostante per il livello idrico compreso tra il minimo e il medio del lago, si hanno dei Kt inferiori e, pertanto, un'efficienza del frangiflutti migliore, per i valori sperimentati, le altezze d'onda nel porto risultano superiori alla soglia di pericolo. Infine, individuata la condizione che maggiormente si avvicina all'evento del 25 marzo 2019, i risultati confermano il Kt precedentemente studiato e l'altezza d'onda interna si avvicina a quella stimata, ciò confermando la validità del modello.

Bibliografia

A.Montanari. Modelli idraulici in scala ridotta. [Online] https://www.albertomontanari.it/?q=node/98.

AIPCN_PIANC Associazione internazionale di navigazione Sezione Italiana. 2002. *Raccomandazioni tecniche per la progettazione dei porti turistici.* 2002.

APAT. 2007. *Atlante delle opere di sistemazione costiera.* Roma : Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici, 2007.

BPS s.r.l. *Cosa è la PSD.* Pero (MI) : s.n.

Caterina Massarotti. 2015. Venti del Lago Maggiore: dove e come soffiano. [Online] 2015. https://ilvergante.com/venti-del-lago-maggiore/.

E.C.B. srl. *www.ecbsrl.it.* [Online] https://www.ecbsrl.it/schede-inputoutput-per-la-gestione-di-dati/.

E.Pugliese Carratelli, F.Dantale. *Modellistica del moto ondoso.*

G.Trossarelli. 2014. *Metereologia marittima.* 2014.

Gestione navigazione laghi Italia. 2015. *Il Lago Maggiore percorsi sull'acqua.* 2015.

Guido Cattaneo. 2005. Portolano del Lago Maggiore. 2005.

Koraim. 2005. *Suggested Model for the Protection of Shores and Marina.* Zagazig, Egypt : Ph. D. Thesis, Civil Engineering, 2005.

Brossard, J., Jarno-Druaux, A., Marin, F., Tabet-Aoul, E.H., 2003. Fixed absorbing semi-immersed breakwater. Coastal Engineering 49, 25–41. https://doi.org/10.1016/S0378-3839(03)00044-9

Goda, Y., 2003. Revisiting Wilson's Formulas for Simplified Wind-Wave Prediction. J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng. 129, 93–95. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2003)129:2(93)

Horikawa, K., 1978. Coastal Engineering: An Introduction to Ocean Engineering. University of Tokyo Press.

Li, Y., Dong, G., Liu, H., Sun, D., 2003. The reflection of oblique incident waves by breakwaters with double-layered perforated wall. Coastal Engineering 50, 47–60. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2003.08.001

Madsen, P.A., 1983. Wave reflection from a vertical permeable wave absorber. Coastal Engineering 7, 381–396. https://doi.org/10.1016/0378-3839(83)90005-4

Marks, W., Jarlan, G., 1968. EXPERIMENTAL STUDIES ON A FIXED PERFORATED BREAKWATER. Coastal Engineering Proceedings 1, 71. https://doi.org/10.9753/icce.v11.71

Postma, G.M., 1989. Wave reflection from rock slopes under random wave attack.

Suh, K.-D., Park, J., Park, W.-S., 2006. Wave reflection from partially perforated-wall caisson breakwater. Ocean Engineering 33, 264–280. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2004.11.015

Sverdrup, K., Duxbury, Alyn, Duxbury, Alison, 2005. Fundamentals of Oceanography, 5 edition. ed. McGraw-Hill Science/Engineering/Math, Boston.

Zhu, S., Chwang, A., 2002. Experimental studies on caisson-type porous seawalls. Exp Fluids 33, 512–515. https://doi.org/10.1007/s00348-002-0444-5

L.Gemelli. 2019. www.lastampa.it. [Online] La Stampa, 2019. https://www.lastampa.it/verbano-cusio-ossola/2019/05/22/news/stresa-si-affida-al-politecnico-di-torino-dopo-i-danni-al-porto-in-costruzione-1.33703317.

—. 2019. www.lastampa.it. [Online] La Stampa, 2019. https://www.lastampa.it/verbano-cusio-ossola/2019/03/29/news/porto-di-stresa-danneggiato-dal-vento-si-cercano-le-cause-nelle-modifiche-del-progetto-1.33691137.

—. 2019. www.lastampa.it. [Online] La Stampa, 2019. https://www.lastampa.it/verbano-cusio-ossola/2019/03/29/news/porto-di-stresa-danneggiato-dal-vento-si-cercano-le-cause-nelle-modifiche-del-progetto-1.33691137.

—. 2019. www.lastampa.it. [Online] La Stampa, 2019. https://www.lastampa.it/verbano-cusio-ossola/2019/05/22/news/stresa-si-affida-al-politecnico-di-torino-dopo-i-danni-al-porto-in-costruzione-1.33703317.

M.Morganti. 2013. Università degli Studi Roma Tre - Dipartimento di Ingegneria Idraulica . [Online] 2013. https://host.uniroma3.it/docenti/morganti/didattica.asp.

Net2Web.srl. 2015. www.tuttobarche.it. [Online] 2015. https://www.tuttobarche.it/porti-piemonte/vecchio-porto-comunale-stresa-golfo-borromeo.

—. 2015. www.tuttobarche.it. [Online] 2015. https://www.tuttobarche.it/porti-piemonte/vecchio-porto-comunale-stresa-golfo-borromeo.

Onorio, Francesco Salvatore. 2010. *www.strutturisti.wordpress.com.* [Online] 2010.

Problemi di qualità nelle acque lacustri italiane. de Bernardi, R., A. Calderoni. 2005. Roma : Accademia dei lincei, 2005.

R.Bertoni. 2018. *Laghi e scienza.* s.l. : ARACNE, 2018.

Rageh, O. S. Koraim, A. S. Salem, T. N. 2009. Hydrodynamic efficiency of partially immersed caissons supported on piles. Ocean Engineering. [Online] 2009. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2009.06.009.

Sport Club Renese. 2013. www.sportclubrenese.it. [Online] 2013. http://www.sportclubrenese.it/Sommario/Verbano.html.

Suh K.-D., Park J., Park W.-S. 2006. Wave reflection from partially perforated-wall caisson breakwater. *Ocean Engineering.* [Online] 2006. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2004.11.015.

Treccani. www.treccani.it. [Online] http://www.treccani.it/enciclopedia/porto/.

V.Roella, F.Elvio. 2008. *Ecomorfologia rive delle acque comuni.* Varese : Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente, 2008.

Wikipedia. 2020. www.wikipedia.it. [Online] 2020. https://it.wikipedia.org/wiki/Stresa.

www.portolago.com. 2020. [Online] 2020. http://www.portolago.com/SpondaPiemontese/Stresa/Porti/NuovoPorto.htm.