



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale (DICEA)

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea

*Studio sperimentale della risalita ondosa su una spiaggia in
presenza di una barra sommersa*

Experimental study of the wave runup on a with a submerged bar

Relatore:

Prof. Ing. Corvaro Sara

Correlatori:

Prof. Ing. Lorenzoni Carlo

Ing. Marini Francesco

Studente:

Kamberaj Altin

A.A. 2020/2021

Indice

Introduzione	1	
Capitolo I	<i>Introduzione all'evoluzione e morfologia delle coste</i>	3
1.1 Evoluzione delle coste.....	4	
1.2 La Costa	6	
1.3 La Spiaggia.....	9	
Capitolo II	<i>Teoria dell'idrodinamica costiera</i>	12
2.1 Il processo di generazione delle onde.....	13	
2.2 Le onde regolari	17	
2.3 Le onde irregolari.....	21	
2.4 Analisi statica a breve termine.....	29	
2.5 Frangimento	33	
2.6 Swash.....	38	
2.6.1 Caratteristiche della <i>Swash Zone</i> e meccanismi forzanti.....	40	
2.7 Run Up	42	
Capitolo III	<i>Configurazione Sperimentale</i>	50
3.1 Strumenti e materiali	51	
3.2 Descrizione della Canaletta ad onde.....	51	
3.3 Generatore d'onda	53	
3.4 Sonde di livello elettro-resistive	55	
3.5 Paramento piano inclinato	58	
3.6 La geometria della barra sommersa	60	
3.7 Posizionamento delle sonde e metodo di separazione utilizzato.....	62	
Capitolo IV	<i>Analisi dei dati sperimentali</i>	66
4.2 Caratteristiche delle onde	67	
4.3 Determinazione delle altezze d'onda incidente e trasmessa per le onde regolari.....	71	
4.3.1 Determinazione del run up per le onde regolari.....	74	
4.3.2 Runup, swash e setup per onde regolari	77	
4.4 Determinazione delle altezze d'onda trasmesse e le lunghezze per le onde irregolari.....	85	

4.4.1 Determinazione del runup per le onde irregolari	87
4.4.2 Runup, swash e setup per onde irregolari.....	89
4.5 Correlazione dell'energia coinvolta nello spettro con l'altezza d'onda trasmessa ed incidente...	96
Conclusioni	99
Ringraziamenti	102
Bibliografia	103

Introduzione

La presente tesi si focalizza sullo studio della idrodinamica costiera ed in particolare sulla risalita dell'onda su una spiaggia in presenza di una barra sommersa. Nella propagazione dell'onda su una barra sommersa si osserva una forte trasformazione della forma della superficie libera e dello spettro dovuto alle interazioni non-lineari che si verificano soprattutto sulla berma della barra.

La spiaggia è quella parte di costa che risente dell'azione delle onde. La zona di risacca è caratterizzata dalla risalita e ridiscesa dell'onda che rendono la spiaggia alternativamente emersa o sommersa dalle acque. I litorali sono soggetti ad erosioni sia a causa di interventi antropici che hanno limitato l'apporto sedimentario dai fiumi o che hanno alterato le dinamiche di trasporto solido longitudinale che, soprattutto negli ultimi anni, dai cambiamenti climatici che hanno reso le mareggiate più intense e hanno portato ad un innalzamento del livello marino.

In passato gli interventi di protezione dei litorali venivano realizzati, nella quasi totalità dei casi, tenendo conto esclusivamente dell'aspetto funzionale dell'opera, legato alla necessità di sottrarre la costa all'azione diretta del moto ondoso. Questo tipo di approccio ha condotto alla realizzazione di strutture con quota di coronamento ben al di sopra del livello medio marino, allo scopo di impedire o di limitare il più possibile la tracimazione delle onde.

Negli ultimi anni, la crescente consapevolezza, da parte della cittadinanza e delle Amministrazioni, di dovere tener conto, accanto agli aspetti funzionali, anche gli aspetti paesaggistici ed ambientali, ha orientato i progettisti verso soluzioni a minore impatto, ovvero le strutture completamente al di sotto della superficie marina.

In particolare, le barriere sommerse rappresentano una soluzione di compromesso tra la necessità di mitigare l'azione del moto ondoso sul litorale e di garantire la salvaguardia del paesaggio e la qualità dell'acqua nella zona protetta attraverso un sufficiente ricambio idrico.

La diffusa adozione di tale tipologia di opere di difesa ha, tuttavia, evidenziato la necessità di approfondire le conoscenze relative all'interazione onda-barriera, che rappresenta il processo fondamentale al quale sono legate le condizioni di agitazione a tergo dell'opera, e, in ultima analisi, l'efficacia stessa dell'intervento di protezione. L'interazione tra il

moto ondoso e la barriera è un fenomeno complesso caratterizzato da due aspetti principali. Il primo è rappresentato dalla riduzione di energia del moto ondoso nella zona protetta dalla barriera sommersa, che è di grande entità quando si verifica il frangimento dell'onda. Molti studi hanno permesso di approfondire le principali caratteristiche della trasmissione del moto ondoso e di ottenere relazioni empiriche tra le caratteristiche del moto ondoso e quelle della struttura. Il secondo aspetto è rappresentato dalle modifiche indotte nel moto ondoso dall'interazione con la barriera sommersa, che si traducono in una alterazione del profilo e della distribuzione in frequenza dell'energia ondosa, a cui è associata una significativa variazione dei principali periodi caratteristici. Per la sicurezza delle spiagge è utile sapere la massima risalita ondosa e quindi, una variazione del campo di moto dovuta alla presenza di opere foranee, indurrà anche una variazione in termini di *runup*.

In presenza di onde regolari, il processo è caratterizzato dallo sviluppo, nel passaggio al di sopra della barriera, di armoniche di frequenza multipla rispetto all'armonica principale. Nel caso di onde irregolari, il fenomeno si manifesta con un cambiamento della forma dello spettro, ed un trasferimento di energia sia verso le frequenze più elevate sia verso le frequenze associate alle componenti di onda lunga.

Il campo di moto, dovuto ad onde regolari e irregolari in presenza di un ostacolo sommerso, è stato ottenuto tramite una campagna sperimentale condotta presso il Laboratorio di Idraulica e Costruzioni Marittime del dipartimento DICEA dell'Università Politecnica delle Marche.

È stata inoltre misurata anche la risalita dell'onda su una spiaggia a pendenza costante dietro l'ostacolo. Tali dati sono stati confrontati con quelli derivanti dall'applicazione delle principali equazioni empiriche disponibili in letteratura. Tali relazioni sono state ricavate in condizioni di spiaggia libera, il presente studio ha come obiettivo la stima della risalita dell'onda (*runup*) su una spiaggia protetta da una barra sommersa. Lo studio della trasformazione dello spettro di energia ad opera dell'ostacolo sommerso permetterà di correlare le caratteristiche delle onde trasmesse con il *runup*.

L'obiettivo del lavoro è lo studio del processo di interazione tra il moto ondoso ed una barriera sommersa, e, in particolare, la definizione della risalita dell'onda (*runup*) sulla spiaggia.

Capitolo I
Introduzione all'evoluzione e morfologia delle coste

1.1 Evoluzione delle coste

Le coste rappresentano uno degli ambienti naturali più delicati sui quali si concentra un elevato numero di fattori che ne condizionano l'evoluzione. Il loro naturale equilibrio è fortemente influenzato dai processi naturali, i cui trend evolutivi hanno scale temporali di lungo o medio periodo, e quelli antropici, la cui evoluzione nel tempo può anche essere monitorata su base annuale. Il problema maggiore rilevanza nei tempi d'oggi è senz'altro l'erosione delle spiagge, sia come trend naturale, riconosciuto ormai su scala globale, sia come fenomeno indotto dalla pressione d'uso della fascia costiera. In Italia il 60% della popolazione vive sulla fascia costiera e le grandi città costiere rappresentano a loro volta circa il 24% della popolazione.

È soprattutto negli ultimi cento anni che la progressiva urbanizzazione della fascia costiera ha prodotto le maggiori modificazioni degli equilibri. La realizzazione delle vie di comunicazione costiere, la crescente necessità di inerti da costruzione spesso ricavati tramite la coltivazione di cave negli alvei fluviali, la sistemazione dei versanti, la creazione di invasi per uso potabile, irriguo o per la produzione di energia elettrica, l'estrazione di fluidi dal sottosuolo (acqua/gas) e la costruzione di opere marittime portuali o per la difesa degli abitati hanno prodotto un notevole deficit sedimentario che, sommato alle cause naturali climatiche di variazione del livello del mare o della subsidenza, hanno progressivamente aggravato il fenomeno dell'erosione dei litorali.

All'erosione crescente delle spiagge si cercò anche in passato di porre rimedio attraverso diverse strategie e tipi di intervento; la legge sulla difesa degli abitati emanata nel 1907 fu una prima risposta organica all'erosione dei litorali, ma si rivelò insufficiente in quanto presentava alcune lacune. La legge infatti rendeva disponibili risorse pubbliche per difendere gli

insediamenti, tuttavia non prevedeva la ricostruzione delle spiagge o la salvaguardia delle aree sensibili e di rilevante pregio naturalistico. Fu così necessario porre in opera una serie di tipologie di manufatti come le scogliere emerse/sommerse, costruite ad una certa distanza dalla linea di riva e parallele ad essa, sono progettate per ridurre l'energia del moto ondoso, innescando la deposizione del sedimento lungo la riva. Solo negli ultimi decenni si è teso alla difesa dei litorali attraverso interventi di ripascimento o, dove necessario, di ricostruzione della spiaggia per mezzo di versamenti di materiali idonei con caratteristiche sedimentologiche equilibrate alle mutate condizioni morfodinamiche del litorale. La rilevanza della produzione scientifica e l'elevato grado di conoscenze raggiunto dalle ricerche nel settore furono lo stimolo per la stesura, nel 1985, di una prima edizione dell'"Atlante delle Spiagge Italiane" (CNR) nella quale furono sintetizzate le ricerche coordinate fino a quel momento prodotte, che rappresentavano circa il 40% del territorio costiero italiano. L'Atlante, costituito da 108 fogli a scala 1:100.000, fu il primo esempio del genere nel panorama mediterraneo, volto principalmente ai fruitori del territorio costiero e ai Pianificatori territoriali, soprattutto delle Pubbliche Amministrazioni. Dall'analisi dei dati dell'Atlante (1999), risulta che il 27% delle spiagge italiane è soggetto ad erosione, mentre solo il 3% è costituito da spiagge in avanzamento. L'alto valore relativo alla stabilità delle spiagge (70%), al momento della redazione dei fogli dell'Atlante, risente significativamente delle opere di difesa o dei ripascimenti posti in opera per contrastare l'erosione. Se da un lato la tendenza evolutiva indicata dall'Atlante presentava un alto valore di spiagge stabili o stabilizzate da opere di difesa, dall'altro, l'esaurirsi dell'effetto degli interventi effettuati nel tempo ha determinato, in alcuni casi, la ripresa dei fenomeni erosivi.

La zona costiera è definita convenzionalmente come la fascia di transizione in cui la terra ferma incontra il mare e dove le caratteristiche ambientali sono strettamente influenzate dai processi di idrodinamica marina.

Tale zona si estende verso mare fino al limite della piattaforma continentale e verso terra fino alla massima quota raggiunta dalle onde. La zona costiera può essere suddivisa, da terra verso mare, in tre aree:

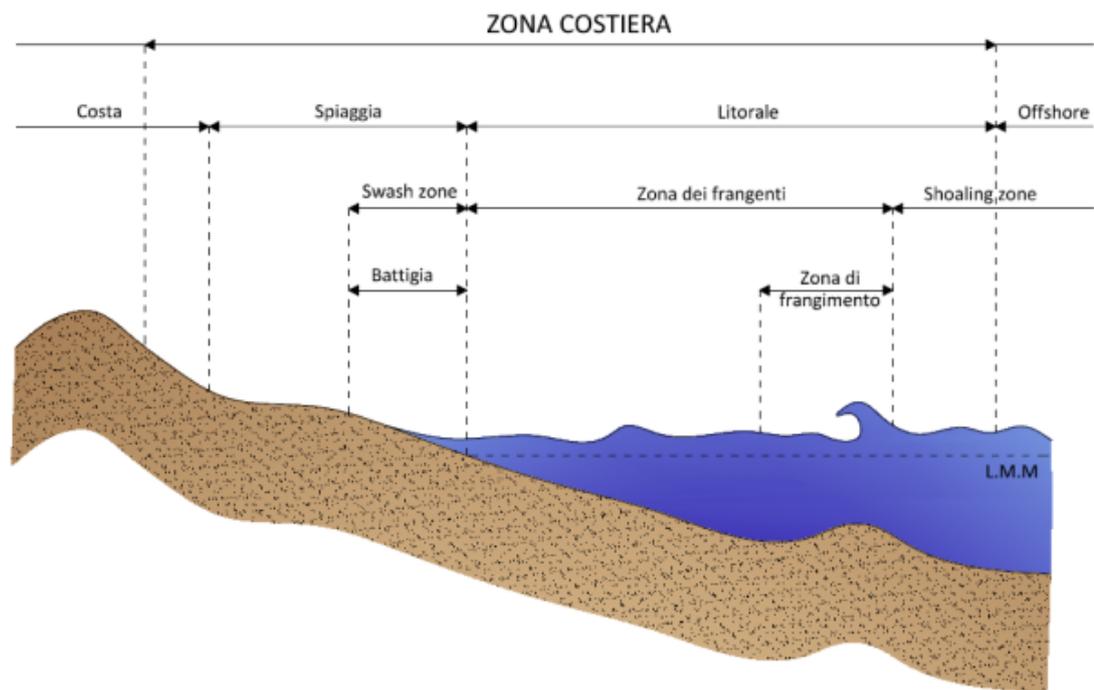


Figura 1.1.1 - Schema della costa

1.2 La Costa

Convenzionalmente il limite tra terra ferma e mare è indicato dalla linea di costa intesa come regione di separazione tra area emersa e area sommersa la cui posizione mutua a causa dell'azione del moto ondoso e delle maree. In realtà, la grande varietà di coste esistenti in natura indica che si tratta di zone molto complesse la cui genesi dipenda da molti fattori come il tipo di roccia, la dimensione e direzione prevalente delle onde, il numero delle tempeste,

l'ampiezza della marea, il profilo della parte di costa sommersa. Sono inoltre rilevanti altri fattori a lungo termine, di cui è necessario tener conto, come i fenomeni tettonici e il cambiamento del livello del mare.

Le caratteristiche morfologiche della costa sono molto variabili nello spazio e nel tempo e possono dipendere da processi endogeni ed esogeni. È tuttavia possibile suddividere le tipologie di costa in base ad alcuni parametri predominanti (ad es. la pendenza).

Le coste possono essere perciò suddivise in coste alte in cui incontriamo un massimo verticale di pendenza e in coste basse in cui osserviamo una pendenza minima orizzontale. Ovviamente tale suddivisione è piuttosto generica perché in natura possiamo incontrare una grande varietà di coste il cui profilo e le cui caratteristiche planimetriche sono molto variabili in funzione della tipologia di roccia che le costituisce. Un criterio generale adottato per classificare le coste si basa sui cambiamenti avvenuti nel livello del mare e divide le coste in due categorie:

- *le coste in emersione*, che si sviluppa sia per un abbassamento del livello marino, sia per apporto di sedimenti;
- *le coste di sommersione*, che si originano quando il livello marino aumenta o la costa subisce un fenomeno di subsidenza.

Esistono diversi punti di vista da cui poter partire per effettuare una classificazione delle coste. Ad esempio, l'oceanografo americano Shepard suddivise le coste in primarie e secondarie. Secondo Shepard (1976), le coste primarie sono quelle in cui il mare si trova a contatto con una superficie modellata da fenomeni erosivi avvenuti in ambiente continentale e non, mentre le coste secondarie sono quelle in cui la morfologia è stata influenzata completamente dall'azione del mare.

Nell'ambito delle coste primarie possiamo individuare:

- coste in via di sommersione soggette a fenomeni erosivi;

- coste legate a fenomeni deposizionali avvenuti in ambiente sub-aereo;
- coste di origine vulcanica;
- coste di origine tettonica.

Mentre, le coste secondarie generate dall'azione diretta del mare e modellate da processi erosivi e/o deposizionali possono essere suddivise in:

- coste dovute all'azione erosiva delle onde, generalmente derivanti da altri tipi di coste;
- coste a falesia che si presentano spesso come scarpate prive di vegetazione caratterizzate da una forte pendenza verticale che termina direttamente sul mare. Tali coste vengono classificate in vive o morte in base alla loro esposizione al moto ondoso. La falesia morta in genere è protetta da una zona di accumulo di detriti dove il moto ondoso può dissipare l'energia. Al contrario, la falesia si definisce viva quando si presenta come parete quasi verticale per cui l'incidenza delle onde su di essa è diretta;
- coste di deposizione marina generate da fenomeni di accumulo di sedimenti trasportati dalle onde e dai corsi d'acqua che si presentano comunemente come litorali sabbiosi;
- coste organogene il cui tipo prevalente è dato dalla scogliera corallina formata dagli organismi biocostruttori.

1.3 La Spiaggia

Come si può osservare nello schema di figura 1.3.1 la spiaggia si suddivide in una zona più arretrata (*rettoriva*), esposta all'azione del mare solo durante le mareggiate o quando la marea è insolitamente elevata, ed una zona più avanzata (*battigia*), esposta alla continua oscillazione della superficie libera dell'acqua. La *rettoriva* è definita anche come spiaggia emersa, la *battigia* come spiaggia intertidale essendo compresa tra il livello medio delle alte e delle basse maree.

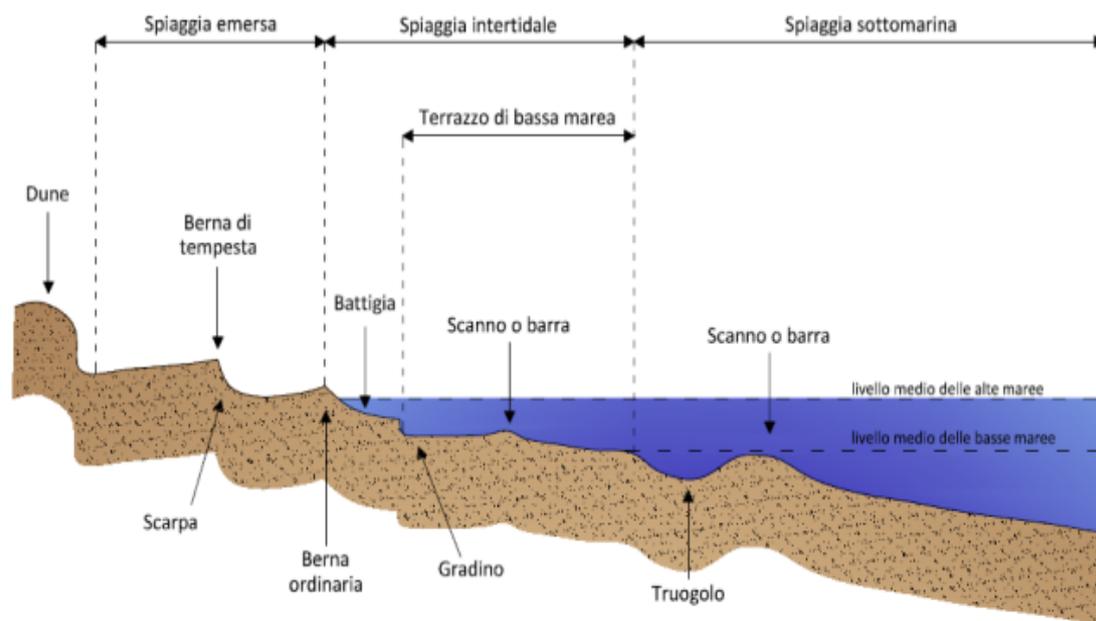


Figura 1.3.1 - *Suddivisione della spiaggia*

Le onde che avanzano verso la riva aumentano d'altezza interagendo col fondo al diminuire della sua profondità fino ad un punto in cui giungono a frangimento a causa della loro eccessiva ripidità; le zone in cui le onde frangono sono definite come zone dei frangenti (*breaker zone*). La fascia di terra e di mare che si estende dal limite entroterra della costa fino al limite più esterno dei frangenti prende il nome di fascia costiera (*coastal area*).

In generale il profilo è regolare o ondulato da una o più barre o scanni, separati da solchi allungati paralleli alla linea di riva, che si formano a causa delle correnti locali *cross-shore* e *long-shore*.

Le barre lungo un profilo sono strutture molto dinamiche che reagiscono al clima meteo-marino cambiando forma e spostandosi in direzione trasversale a riva; esse a loro volta influenzano la propagazione delle onde cambiando le profondità locali e quindi le posizioni dei frangenti.

Dal momento in cui le onde frangono e si propagano verso riva, in presenza di particolari conformazioni del profilo, può accadere che avvenga una riformazione dell'onda ovvero che essa da traslatoria riacquisti un andamento oscillatorio. L'onda riformata si propagherà verso riva e, non appena raggiungerà acque sufficientemente basse, frangerà nuovamente con un'ulteriore dissipazione di energia (seconda linea dei frangenti). La zona in cui ciò accade è definita zona di riformazione e il punto in cui si innesta il fenomeno punto di riformazione. A seconda della regolarità delle onde incidenti e della forma del profilo della spiaggia, il fenomeno del frangimento e quello della riformazione dell'onda possono accadere più volte.

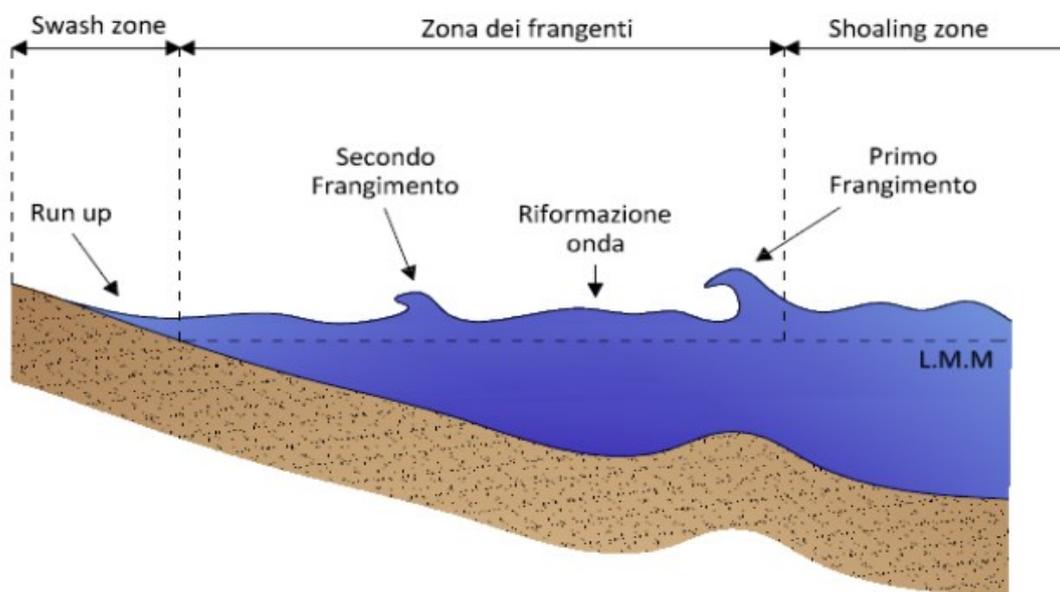


Fig. 1.3.2 - Evoluzione dell'onda

La zona di battigia, meglio definita come *swash zone* è la porzione di spiaggia alternativamente sommersa dall'acqua durante la massima fase di risalita dell'onda (*runup*) ed esposta all'aria dalla successiva massima ridiscesa (*rundown*).

Tale zona è caratterizzata da flussi intensi ed instabili, alta turbolenza, elevato tasso di trasporto dei sedimenti e rapido cambiamento morfologico: senz'altro può definirsi la regione più dinamica della costa (Masselink & Puleo, 2006).

Capitolo II
Teoria dell'idrodinamica costiera

2.1 Il processo di generazione delle onde

La comprensione dei complessi processi fisici responsabili della formazione e dello sviluppo delle onde di mare per effetto del vento è maturata solo negli ultimi 70 anni. Tuttavia, essa ha consentito la recente affermazione di affidabili modelli spettrali ed oggi è una disciplina fondamentale per affrontare qualsiasi studio di tipo costiero. Per un'analisi dettagliata e completa di questo affascinante tema dell'oceanografia fisica si rimanda ai testi specialistici di Phillips (1957), Miles (1957), Kinsman (1965), Longuet-Higgins (1969), Boccotti (2000), Coastal Engineering Manual (2008), Scarsi (2009).

L'esperienza comune ci porta ad affermare che è pressoché impossibile osservare uno specchio liquido senza che esso sia interessato da onde. Queste onde sono la manifestazione di forze che, agendo sull'acqua, tendono a deformarne la superficie contro l'azione della gravità e della tensione superficiale che, come forze stabilizzanti, tendono invece a ricostituire l'equilibrio preesistente.

Ovviamente, una volta che le onde sono generate, le forze di gravità e di tensione superficiale operano in maniera tale da farle propagare. Le onde si realizzano in una grandissima varietà di dimensioni e forme, soprattutto in funzione dell'entità delle forze che le hanno generate.

In tutti i meccanismi di generazione del moto ondoso, è fondamentale l'azione normale esercitata dal vento sulla superficie idrica, piuttosto che l'azione tangenziale. Il meccanismo della risonanza (Phillips, 1957) è basato sull'azione irregolare degli impulsi di pressione esercitata dal vento nelle fasi iniziali di nascita e crescita del moto ondoso.

Questi impulsi trasferiscono energia alle neonate ondulazioni che si propagano con direzione diversa rispetto a quella degli impulsi, ma tanto più prossima ad essa quanto maggiore è il periodo delle ondulazioni stesse. L'accrescimento di energia delle onde che si formano con l'accennato meccanismo è lineare nel tempo.

Lo sviluppo successivo delle onde ormai formate, soprattutto di quelle più corte, per effetto delle pressioni differenziali che si creano lungo il profilo sotto l'azione del flusso d'aria aderente, viene spiegato dalla teoria del flusso tangenziale (Miles, 1957).

È stato dimostrato che il trasferimento dell'energia dal mezzo aria al mezzo acqua avviene fondamentalmente in corrispondenza della cosiddetta altezza critica, nella quale la velocità relativa aria-acqua si annulla. Le onde più lunghe viaggiano più rapidamente e con direzione più prossima a quella del vento, ma quando la loro celerità si avvicina a quella del vento, la capacità di ricevere energia dal vento si riduce. Le onde corte e ripide si accrescono più rapidamente, ma finiscono spesso per frangersi sulla cresta di quelle con lunghezza maggiore più veloci nel momento in cui queste le sorpassano a seguito dell'aumento di curvatura del profilo e dell'azione del vento. All'atto del frangimento viene trasferita quantità di moto alle particelle che orbitano in superficie sulla cresta dell'onda lunga.

Il fenomeno non è quindi solo dissipativo ma produce un trasferimento energetico alle componenti di più bassa frequenza. Il frangimento avviene prevalentemente secondo la direzione del vento. Pertanto, a causa di questo meccanismo, si ha la tendenza all'allineamento fra la direzione delle onde e del vento.

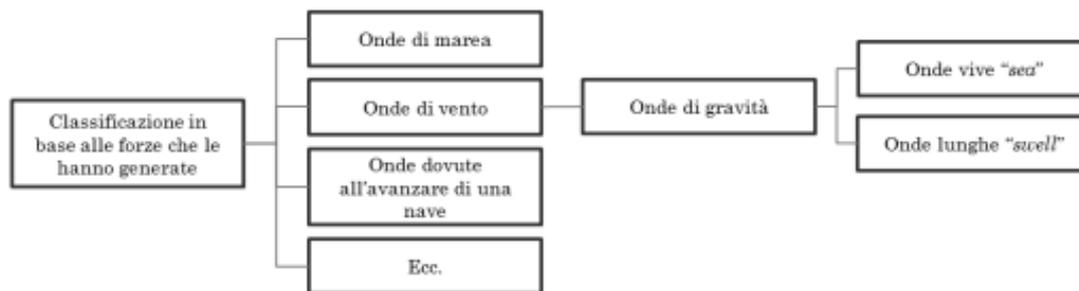


Fig. 2.1.1 - *Classificazione delle onde in base alle forze che le hanno generate*

I meccanismi di formazione sommariamente illustrati spiegano i motivi per cui fin dall'inizio il moto ondoso è caratterizzato da componenti di diversa frequenza e con diversa direzione di propagazione. Spiegano anche la diversa rapidità di crescita delle componenti di periodo più piccolo rispetto a quelle di periodo maggiore e la progressiva tendenza all'allineamento fra la direzione delle onde e la direzione del vento trasmessa alle onde nel tempo è esponenziale e favorisce le onde più corte rispetto a quelle più lunghe, esistenti fin dalle fasi iniziali.

Come accennato in precedenza nel caso della *generazione del moto ondoso* si verifica anche un trasferimento d'energia fra le diverse componenti collegato alla non linearità del moto. Tale trasferimento consente un incremento del periodo medio anche prescindendo dall'azione del vento. In definitiva, lo spettro di energia del moto ondoso si evolve nel *fetch* con un bilancio di vari contributi, raggiungendo condizioni di saturazione quando le perdite eguagliano gli apporti. Si deve comunque osservare che lo spettro di energia del moto ondoso nella sua evoluzione oltrepassa per un breve tempo le condizioni di equilibrio. La saturazione dello spettro presenta una legge costante sulle alte frequenze e ulteriori apporti energetici che incrementano l'area dello spettro possono solo aggiungersi sulle frequenze più basse.

La classificazione delle onde di mare può essere effettuata secondo diversi criteri. Una prima classificazione, che si basa sulle forze che le hanno

generate (figura 2.1.1), le distingue in: onde di marea, di vento, dovute all'avanzare di una nave ecc. Un'altra classificazione, spesso adottata, si riferisce alla forma dell'onda, ossia al suo profilo (figura 2.1.2), dividendole in: *sinusoidali*, *cnoidali*, *solitarie* e *random*. Comunque, la classificazione più diffusa si riferisce al periodo dell'onda T [s] o, il che è lo stesso, alla frequenza f (misurata in Hertz) che, come si ricorderà, rappresenta l'inverso del periodo (figura 2.1.3). Con questo tipo di classificazione, si può ottenere un'analogia con le bande di uno spettro di onde elettromagnetiche.

Nella figura 2.1.4 è infatti riportato una schematizzazione del contenuto energetico posseduto dalle onde caratterizzate da varie frequenze. Questa figura, sebbene si riferisca a dati mai misurati, consente di mostrare che la maggior parte del contenuto energetico sia attribuibile alla banda delle onde generate dal vento cui nel prosieguo si farà quasi esclusivamente riferimento. Le onde di vento, come detto in precedenza, sono anche ulteriormente distinguibili in “onde di mare vivo”, o “onde corte” e in “onde di mare morto”, o “onde lunghe”.

Le onde di vento, come detto in precedenza, sono anche ulteriormente distinguibili in “*onde di mare vivo*”, o “*onde corte*” e in “*onde di mare morto*”, o “*onde lunghe*”. Le prime si riferiscono a onde, piuttosto irregolari caratterizzate da un periodo più piccolo, che si vengono a formare nell'area di generazione. Le seconde, invece, si riferiscono a quelle onde regolari che, uscite dall'area di generazione, si propagano anche per distanze notevolissime.

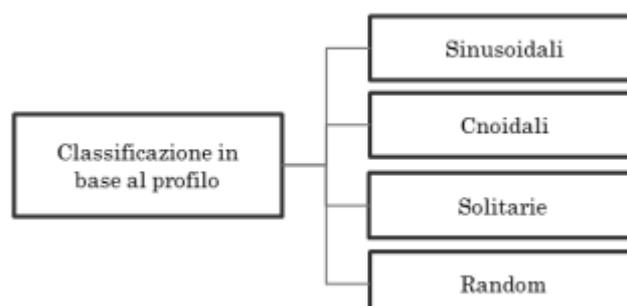


Fig. 2.1.2 - *Classificazione delle onde in base al profilo*

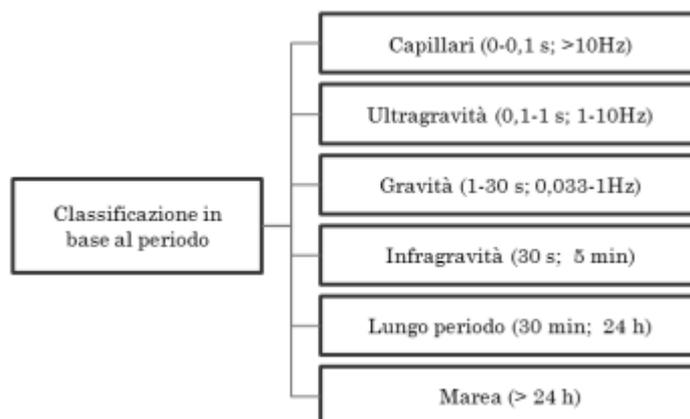


Fig. 2.1.3 - *Classificazione delle onde in base al periodo*

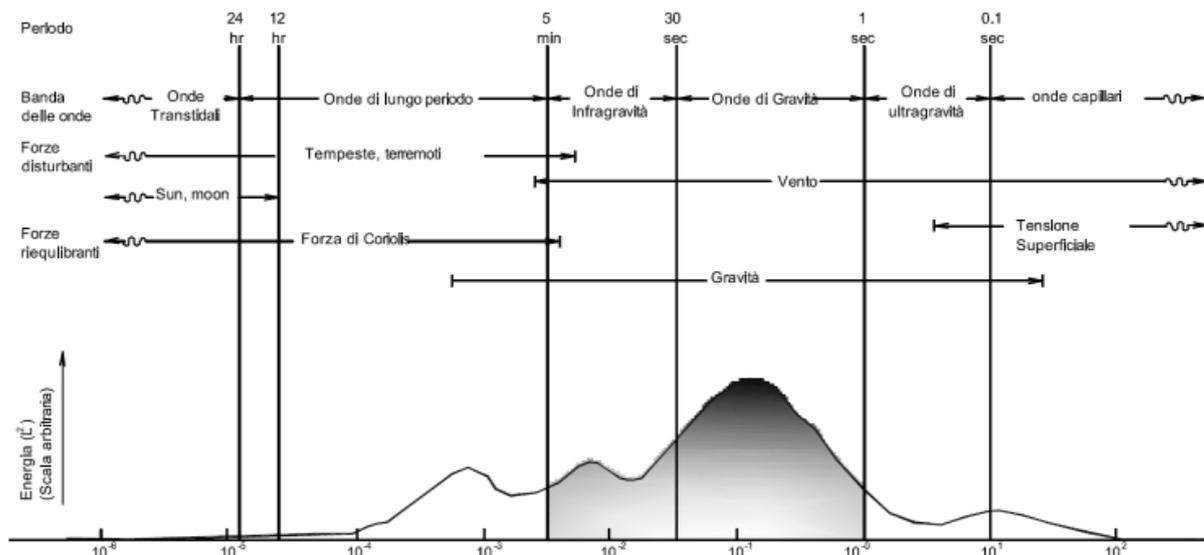


Fig. 2.1.4 - *Rappresentazione schematica dell'energia contenuta alle diverse frequenze dalle onde di mare (Kinsman, 1984)*

2.2 Le onde regolari

Le onde regolari sono la più semplice rappresentazione matematica per spiegare, in due dimensioni, le onde del mare. Esse sono piccole in ampiezza, sinusoidali, e progressivamente definibili dalla loro altezza (H) e dal loro periodo (T) a profondità d'acqua note. Con questa semplice rappresentazione

delle onde marine si potrà facilmente determinare: lo spostamento e il movimento delle onde, la loro cinematica (velocità e accelerazione), e la loro dinamica (pressioni, momenti e forze risultanti). Tuttavia, questa semplice trattazione delle onde non potrà più essere utilizzata nel momento in cui l'altezza d'onda comincia ad assumere valori elevati.

Un'onda progressiva può essere rappresentata per mezzo di variabili spaziali (x) e temporali (t) o grazie alla loro combinazione (fase), definita come $\varphi = kx - \omega t$, dove i valori di k e ω sono rispettivamente il numero d'onda $k = 2\pi/L$ (dove L è lunghezza d'onda) e la frequenza angolare $\omega = 2\pi/T$. I valori di φ oscillano tra 0 e 2π . Un'onda semplice che si propaga su un fondale orizzontale e che ha forma di propagazione costante potrà essere caratterizzata dall'altezza d'onda H dalla lunghezza d'onda L e dalla profondità h . La velocità con la quale un'onda si propaga è definita come velocità di fase o celerità dell'onda C . Dal momento che la distanza percorsa da un'onda durante un periodo d'onda è uguale a una lunghezza d'onda, la celerità d'onda può essere collegata al periodo d'onda dalla seguente relazione:

$$C = \frac{L}{T} \quad (2.2.1)$$

La relazione che collega la celerità d'onda con la profondità dell'acqua e la sua lunghezza è data da:

$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)} \quad (2.2.2)$$

L'equazione 2.2.2 è chiamata relazione di dispersione in quanto indica che onde con periodi diversi viaggiano a velocità diverse. Nelle situazioni in cui è presente più di un'onda, quella con più grande periodo viaggerà più velocemente. Dalla equazione 2.2.1, si vede che l'equazione 2.2.2 può essere scritta come:

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad (2.2.3)$$

Dalle equazioni 2.2.2 e 2.2.3 si può ottenere un'espressione per la lunghezza d'onda come funzione della profondità e del periodo dell'onda:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) = \frac{gT}{\omega} \tanh(kh) \quad (2.2.4)$$

<i>Classificazione</i>	<i>hL</i>	<i>kh</i>	<i>tanh(kh)</i>
Acqua basse	da 0 a 1/20	Da 0 a $\pi/10$	$\approx (kh)$
Acque intermedie	da 1/20 a 1/2	da $\pi/10$ a π	$\tanh(kh)$
Acque profonde	da 1/2 a ∞	da π a ∞	≈ 1

Tab. 2.2.1 - Classificazione delle onde in funzione della profondità dell'acqua

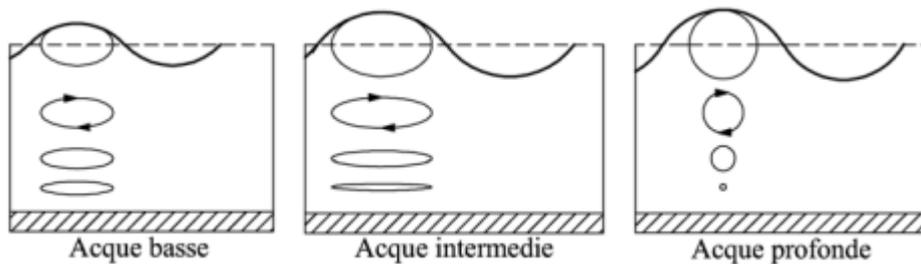


Fig. 2.2.1 - Moto delle particelle d'acqua in acque basse, intermedie e profonde

Tale equazione deve essere risolta per via iterativa poiché non è esplicitabile in L . I valori tabellati di h/L e h/L_0 (SPM 1984) dove L_0 è la lunghezza d'onda, in acque profonde, possono essere utilizzati per semplificare l'utilizzo di questa equazione. Le onde di gravità possono anche essere classificate in base alla profondità dell'acqua in cui si propagano.

La seguente classificazione viene fatta in base alla grandezza di h/L e i valori limite risultanti dalla funzione $\tanh(2\pi h/L)$. Bisogna notare che appena l'argomento della tangente iperbolica $kh = 2\pi h/L$ diventa grande la $\tanh(kh)$

tende a 1, e per piccoli valori di kh la $\tanh(kh) \approx kh$. Le onde sono quindi classificate in base al rapporto h/L come mostrato nella tabella 2.2.1. In figura 2.2.1 è mostrato la tipologia di moto delle particelle d'acqua al variare della profondità. Nelle acque profonde, $\tanh(kh)$ si approssima all'unità, l'equazione 2.2.1 e 2.2.4 si riducono a:

$$C_0 = \sqrt{\frac{gL_0}{2\pi}} = \frac{L_0}{T} \quad (2.2.5)$$

così l'equazione 2.2.3 diventa:

$$C_0 = \frac{gT}{2\pi} \quad (2.2.6)$$

Anche se l'acqua profonda si verifica effettivamente ad una profondità infinita, $\tanh(kh)$, per scopi più pratici, si approssima matematicamente all'una unità già in acque più basse. Infatti, alla profondità relativa di $1/2$, $\tanh(2\pi h/L) = 0,9964$. Quando la profondità relativa h/L è più grande di $1/2$, la caratteristica d'onda sono virtualmente indipendenti dalla profondità. Le condizioni di acque profonde sono indicate quasi sempre dal pedice 0 come L_0 e C_0 ad eccezione del periodo T che rimane costante e indipendente dalla profondità delle onde. Nel sistema SI (Sistema Internazionale), la costante $g/2\pi$ è pari a $1,56 \text{ m/s}^2$, è:

$$C_0 = \frac{gT}{2\pi} = \frac{9,8}{2\pi} T = 1,56 \cdot T \quad [m/s^2] \quad (2.2.7)$$

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} = \frac{9,8}{2\pi} T^2 = 1,56 \cdot T^2 \quad [m] \quad (2.2.8)$$

Le equazioni 2.2.7 e 2.2.8 sono utilizzate per calcolare la celerità delle onde quando la profondità relativa è $h/L = 0,25$; l'errore risultante sarà circa del 9%.

È evidente che una profondità relativa di $0,5$ è un confine soddisfacente per separare le onde in acque profonde dalle onde in acque di profondità di transizione.

Quando siamo in presenza di onde in acque di transizione, le equazioni 2.2.1 e la 2.2.2 potranno essere usate senza nessuna semplificazione. Come regola le equazioni 2.2.1 e 2.2.2 possono essere utilizzate quando la profondità relativa è tra 0,5 e 0,05. Quando la profondità relativa incomincia ad essere corrispondente alle acque basse (per esempio: $2\pi h/L < 1/4$ o $h/L < 1/25$) l'equazione 2.2.2 può scriversi:

$$C = \sqrt{gh} \quad (2.2.9)$$

Onde sufficientemente lunghe tali che sia applicabile l'equazione 2.2.9 vengono chiamate onde lunghe (questa relazione è attribuita a Lagrange). Così, quando un'onda viaggia in acque poco profonde, la celerità d'onda dipende solo dalla profondità dell'acqua.

In conclusione, appena un'onda (di vento) si propaga da acque profonde verso la spiaggia la sua celerità e la sua lunghezza d'onda sono funzione del periodo (o frequenza). Quando la profondità dell'acqua diventa bassa relativamente alla lunghezza delle onde, la lunghezza e la celerità delle onde dipendono dalla profondità e dal periodo. Infine, le onde raggiungeranno un punto dove la loro lunghezza e la loro celerità dipenderanno solo dalla profondità (e non dalla frequenza).

2.3 Le onde irregolari

Le onde generate dal vento sono irregolari (non periodiche) e per questo motivo il termine di onde irregolari viene utilizzato per indicare i reali stati di mare. Questo termine è usato, laddove le onde hanno variabilità statistica e non sono monocromatiche, cioè non mantengono costanti le loro proprietà fisiche. Infatti, le onde monocromatiche, generate in laboratorio, sono molto

rare in natura. Lo stato del mare durante una mareggiata è sempre caratterizzato da onde con creste corte e irregolari.

Come detto nel paragrafo 2.2 quando il vento soffia sul mare, genera tensioni tangenziali che, associate alle variazioni di pressione dovute alla turbolenza del movimento dell'aria, sono all'origine della formazione delle onde. In questa fase il mare ha diversi tipi di onde con diverse altezze d'onda e periodi. Queste onde vengono chiamate onde di mare vivo oppure con i termini inglesi *wind waves* e *short crested*.

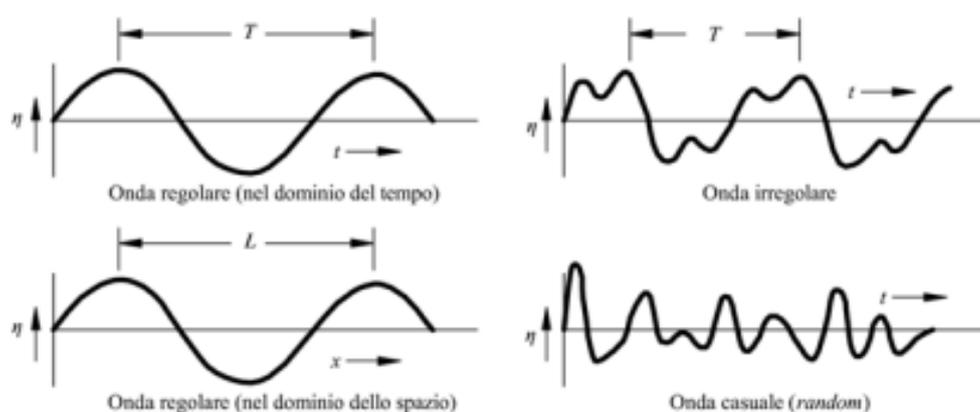


Figura 2.3.1 - Rappresentazione delle onde di mare

Le onde di mare vivo sono generate da un campo di vento che sollecita direttamente il bacino marino mentre le onde di mare lungo sono dovute soprattutto a un campo di vento che ha agito in precedenza al di fuori di tale bacino e che ha dato luogo a onde le quali, propagandosi poi in una zona di calma, pervengono infine al bacino stesso, sottoposto eventualmente a un nuovo campo di vento.

In particolare, le onde di vento, indicate anche come onde *random*, esibiscono un profilo irregolare sia nel dominio del tempo che nel dominio dello spazio (figura 2.3.1) e possono essere considerate come dovute alla sovrapposizione di onde regolari elementari (onde componenti) che hanno diversa altezza, diverso periodo, diversa direzione e che sono sfasate tra loro in modo aleatorio, dove la notazione di onda elementare indica un'onda

caratterizzata da un'altezza molto piccola rispetto alla deviazione standard costruita con gli spostamenti verticali del profilo d'onda misurati a partire dal livello di quiete.

Le onde di mare morto (in inglese indicate con i termini *swell* e *long crested*), con alti periodi, che hanno viaggiato a lungo e provengono da molto lontano tendono ad essere molto più uniformi in termini di altezza d'onda e periodo. Uno stato di mare può essere costituito da onde di vento, onde lunghe oppure dalla loro combinazione.

La superficie dei mari è spesso il risultato della combinazione di molte componenti. Queste componenti sono generalmente prodotte dal vento che soffia nelle diverse regioni e si propagano fino al punto di osservazione. Se si potessero misurare le onde, attraverso una boa posta ad una posizione fissa nel mare, si vedrebbe che la superficie del mare sarebbe piuttosto casuale e irregolare.

Anche se le onde individuali possono essere facilmente identificate, c'è sempre una variabilità significativa nell'altezza e nel periodo in ogni onda. Come conseguenza a quanto detto, le definizioni di altezza d'onda, di periodo e di durata, devono essere espressi in termini statistici.

Ci sono due approcci analitici per simulare le onde irregolari: il metodo spettrale (*spectral wave*) e a treno d'onda (*wave-by-wave*). Con l'approccio del treno d'onda, si utilizza la serie temporale della superficie libera in un punto.

Le ondulazioni del mare sono identificate come onde e vengono analizzati i dati acquisiti secondo metodologie statistiche. La descrizione del fenomeno del moto ondoso attraverso uno spettro ha lo scopo di descrivere la superficie del mare come un fenomeno stocastico, per caratterizzare tutte le possibili osservazioni che possono essere fatte sotto le medesime condizioni dell'attuale osservazione. L'analisi ha sempre come punto di partenza una

funzione $\eta(t)$, che rappresenta l'oscillazione della superficie del mare nel tempo, registrata da uno strumento ondometrico (Figura 2.3.1). Tale registrazione ha una durata temporale pari a T_r .

È possibile riprodurre esattamente questa registrazione come una somma di i -esime componenti armoniche, attraverso l'analisi in serie di Fourier (Figura 2.3.2).

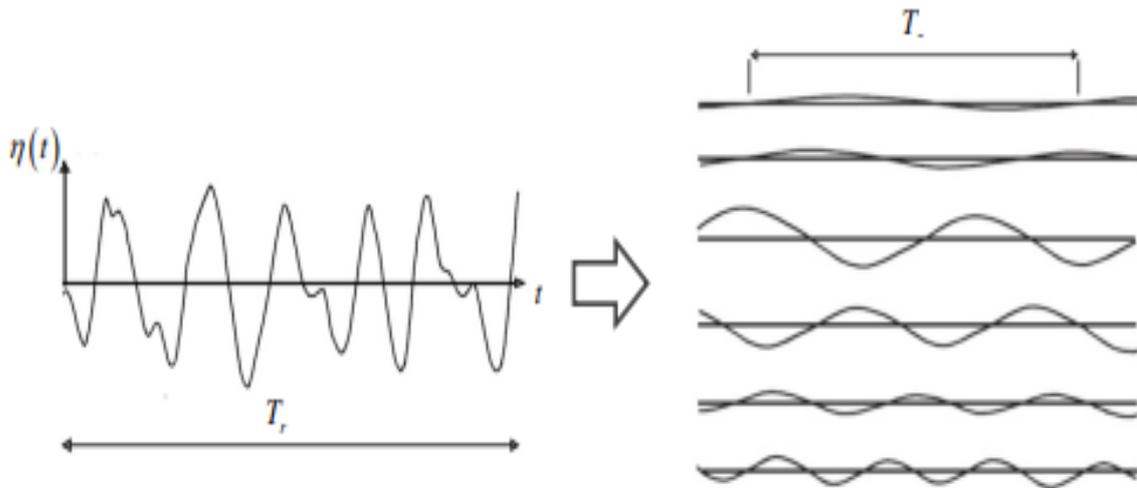


Figura 2.3.2 – Scomposizione della superficie libera in una somma di armoniche

Ognuna delle componenti è caratterizzata da una frequenza f_i , un'ampiezza a_i ed una fase φ_i ; pertanto, la funzione $\eta(t)$ può essere espressa attraverso l'equazione 2.3.1.

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad (2.3.1)$$

L'intervallo di frequenza è dato da $\Delta f = 1/D$. Attraverso l'analisi di Fourier si possono determinare i valori dell'ampiezza e della fase per ogni frequenza (Equazione 2.3.2).

$$FFT(\eta(t)) \rightarrow A(f_i) + B(f_i)j \quad (2.3.2)$$

Dove:

$A(f_i)$ e la parte reale;

$B(f_i)$ e la parte immaginaria; $j^2 = -1$

$A(f_i)$ e $B(f_i)$ sono due funzioni di f_i .

Si definiscono inoltre:

$$a_i = \sqrt{A_i^2 + B_i^2} \quad (2.3.3)$$

$$\varphi_i = \arctan\left(\frac{B_i}{A_i}\right) \quad (2.3.4)$$

Sostituendo questi valori nell'Equazione 2.3.1 e sommando tutte le equazioni acquisite si ottiene il segnale della registrazione iniziale $\eta(t)$. Da questi valori si può comporre lo spettro per la fase e per l'ampiezza per questa registrazione.

La frequenza di picco (f_p) è un parametro caratteristico che viene definito come la frequenza del picco di energia in uno spettro d'onda. Il periodo di picco T_p è l'inverso di (f_p). Se lo spettro è stretto significa che la maggior parte delle onde hanno una frequenza vicina a (f_p). Quando si ha un *narrow band*, $H_{1/3}$ e H_{m0} sono molto vicini. Quando si ha uno spettro largo significa che il moto ondoso ha diverse componenti per cui è fortemente irregolare, si ha la sovrapposizione di numerose componenti armoniche.

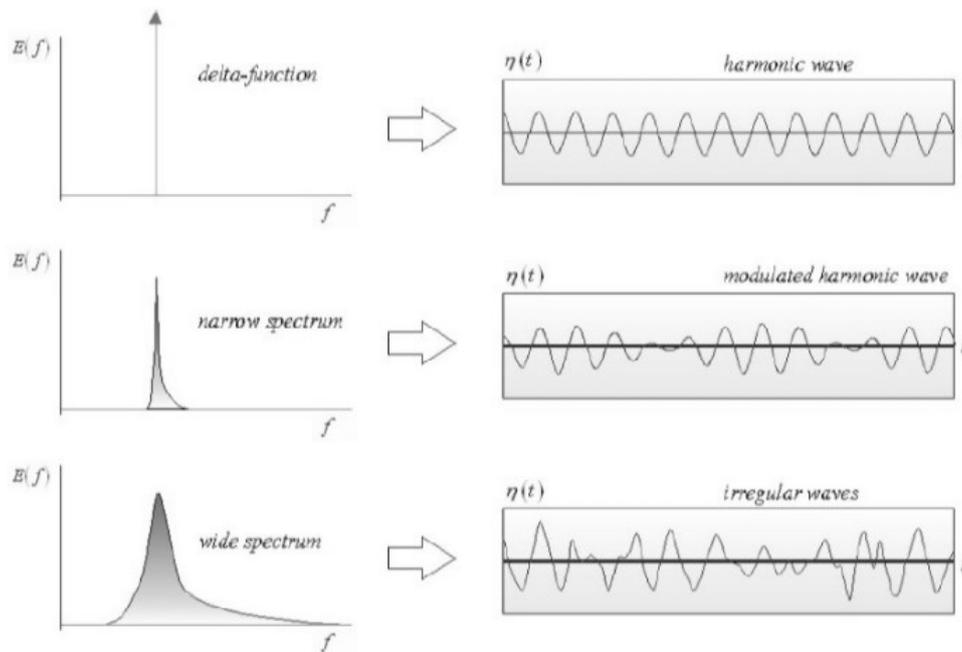


Figura 2.3.3 - Correlazione tra le caratteristiche dello spettro e le caratteristiche del segnale di moto ondoso (Holthuijsen 2007)

La distribuzione dell'energia d'onda come funzione della frequenza è comunemente rappresentata dalla media della densità di energia dello spettro monodimensionale, indicato come $S(f)$. Due dei più usati spettri d'onda semi-empirici utilizzati sono lo spettro descritto da Pierson (1964) e quello denominato JONSWAP (Hasselmann, 1973) entrambi mostrati nella figura 2.3.4.

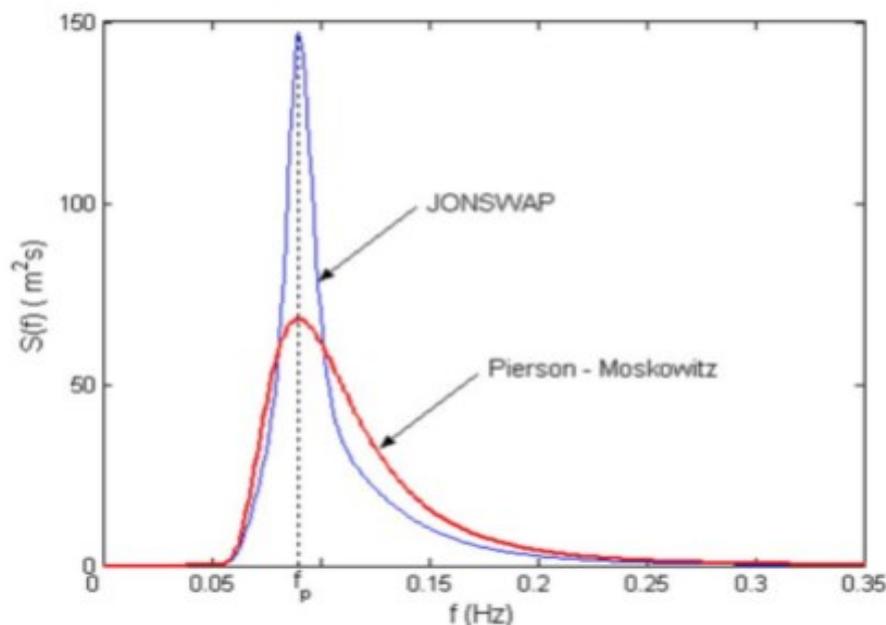


Figura 2.3.4 - Spettri JONSWAP e P-M a confronto

Lo spettro Pierson e Moskowitz (P-M) rappresenta un mare completamente sviluppato, in acque profonde ed assume la seguente forma:

$$S(f)_{P-M} = \alpha' \cdot g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_m} \right)^{-4} \right] \quad (2.3.5)$$

in cui:

$$\alpha' = 0,0081;$$

$f_m \approx 0,14 g/U_w$ e U_w = velocità del vento all'altezza z .

Lo spettro JONSWAP (J) rappresenta lo stato di mare limitato per *fetch* e si esprime nel modo seguente:

$$S(f) = \alpha' \cdot g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_m} \right)^{-4} \right] \cdot \gamma \exp \left[-\left(\frac{f}{f_m} - 1 \right)^2 \cdot 2\omega^2 \right] \quad (2.3.6)$$

in cui:

$$\alpha' = 0,0062 \cdot \left(\frac{gF}{U_w^2}\right)^{-0,2}, f_m \approx 0,14 \text{ g/ } U_w 19,5.$$

$\gamma \approx 3,3$; rappresenta il parametro di elevazione che varia tra 1 e 7 ed è uguale a 1 nello spettro P-M;

$$\omega \approx 0,07 \text{ per } f < f_m \text{ e } \omega \approx 0,09 \text{ per } f \geq f_m$$

$U_w =$ velocità del vento all'altezza z .

L'energia totale relativa al moto ondoso in esame, m_0 , si calcola tramite la seguente risoluzione spettrale.

$$m_0 = \sum_i E_j \Delta f = \sum_i \frac{H_i^2}{8} \quad (2.3.7)$$

L'altezza significativa calcolata con l'analisi nel dominio della frequenza, Hm_0 , è data da:

$$Hm_0 = 4\sqrt{m_0} \quad (2.3.8)$$

Si noti che dal punto di vista matematico m_0 è il momento di ordine zero della funzione (2.3.9) ed è dato da:

$$m_i = \int_0^\infty S(f) f^i df \quad (2.3.9)$$

$$m_0 = \int_0^\infty S(f) df \quad (2.3.10)$$

$$m_1 = \int_0^\infty f S(f) df \quad (2.3.11)$$

$$m_{-2} = \int_0^\infty f^{-2} S(f) df \quad (2.3.12)$$

Il periodo medio può invece essere calcolato in diversi modi:

$$T_{m-10} = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (2.3.13)$$

$$T_{m01} = \frac{m_0}{m_1} \quad (2.3.14)$$

$$T_{m-20} = \sqrt{\frac{m_{-2}}{m_0}} \quad (2.3.15)$$

2.4 Analisi statica a breve termine

L'analisi a breve termine si riferisce allo studio di eventi di moto ondoso che si limitano ad analizzare un breve periodo temporale (solitamente 15-30 minuti). Viene considerato questo arco temporale perché il fenomeno del moto ondoso in questo intervallo ha caratteristiche sostanzialmente stazionarie dal punto di vista statistico.

Le operazioni statistiche, considerando intervalli più ampi, annullerebbero la variabilità del fenomeno e darebbero risultati sempre simili; tuttavia, non deve essere nemmeno considerato un intervallo troppo ristretto perché perderebbe credibilità statistica. 15-30 minuti è l'unità di tempo ritenuta adeguata secondo i criteri messi in evidenza, pertanto è l'intervallo temporale su cui viene eseguita l'analisi, ma ovviamente essa viene ripetuta costantemente nel tempo. Esistono due diversi tipi di analisi statistiche a breve termine: l'analisi zero-crossing e l'analisi spettrale

Una registrazione di moto ondoso si presenta come in Figura 2.4.1, dove si osserva l'andamento della funzione η , ovvero dell'elevazione della superficie del mare nel tempo. Un'onda è definita come la porzione della funzione compresa tra due successivi attraversamenti dello SWL (zero) nella stessa direzione. Quando lo SWL viene attraversato passando da valori negativi a valori positivi si parla di punti *upcrossing*, viceversa, se si passa

da valori positivi a valori negativi si hanno punti *downcrossing*. Considerare i *downcrossing* o gli *upcrossing* è indifferente, perché le caratteristiche statistiche sono simmetriche, purché si utilizzi sempre lo stesso criterio per tutta la durata dell'analisi.

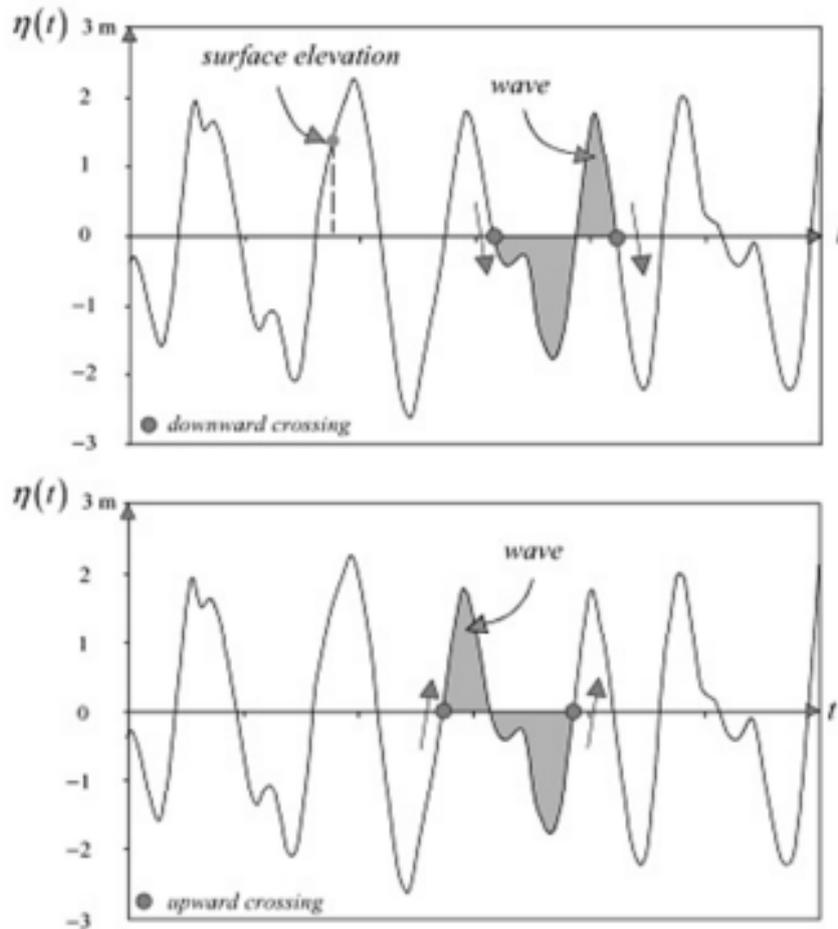


Figura 2.4.1 – Rappresentazione del *downcrossing* e *upcrossing*

Una volta che sono state individuate le onde all'interno della registrazione, nel periodo temporale di riferimento, si rilevano i periodi e le altezze d'onda di ciascuna di esse.

A questo punto si possono definire le grandezze statistiche fondamentali. In una registrazione con N onde l'altezza d'onda media H_m è definita dalla 2.4.1.

$$H_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i \quad (2.4.1)$$

Un importante parametro correlato al contenuto energetico del segnale, come si apprezzerà nel seguito, è l'altezza d'onda quadratica media:

$$H_{rms} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2 \right)^{1/2} \quad (2.4.2)$$

Questo valore è rilevante per i progetti relativi all'energia dell'onda perché l'energia d'onda è proporzionale al quadrato dell'altezza d'onda. Tuttavia, le grandezze descritte, per quanto semplici, non sono utilizzate molto spesso, perché sono molto differenti rispetto al valore dell'altezza d'onda significativa stimata a vista, che è tradizionalmente utilizzata.

Per tale motivo, si usa frequentemente il valore dell'altezza significativa $H_{1/3}$ che viene definita come la media delle altezze di un terzo delle onde più alte registrate, come indicato dalla (2.4.3).

$$H_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_{j=1}^{N/3} H_j \quad (2.4.3)$$

Dove:

j è l'indice delle onde ordinate per altezza decrescente. Studi sperimentali hanno dimostrato che l'altezza d'onda significativa misurata con tale metodo è simile a quella misurata a vista.

Talvolta viene utilizzata $H_{1/10}$, la media delle altezze di un decimo delle onde più alte registrate, nella (2.4.4).

$$H_{1/10} = \frac{1}{N/10} \sum_{j=1}^{N/10} H_j \quad (2.4.4)$$

La stima dell'altezza d'onda massima della registrazione non è a priori definibile statisticamente; tuttavia, mediante opportune considerazioni sulla durata della registrazione tale da garantire una stazionarietà del processo, si può stimare:

$$H_{max} = (1,8 \div 2)H_{1/3} \quad (2.4.5)$$

Allo stesso modo possono essere definiti diversi valori di periodo. Nell'Equazione (2.4.6) è riportato il periodo medio.

$$T_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad (2.4.6)$$

Il periodo d'onda significativo $T_{1/3}$, analogamente a quanto accade per l'altezza d'onda, viene definito come il periodo medio di un terzo delle onde più alte, è espresso nell'equazione (2.4.7).

$$T_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_{j=1}^{N/3} T_j \quad (2.4.7)$$

Così come per l'altezza d'onda, talvolta viene utilizzato il periodo medio di un decimo delle onde più alte, $T_{1/10}$, definito dall'equazione (2.4.8).

$$T_{1/10} = \frac{1}{N/10} \sum_{j=1}^{N/10} T_j \quad (2.4.8)$$

<i>Altezze -H</i>		H / H_{rms}	$H / \sqrt{m_0}$	H / H_s
Deviazione standard della superficie libera	$\sigma_n = \sqrt{m_0}$	$1/2\sqrt{2}$	1,0	0,25
Altezza quadratica media	H_{rms}	1,0	$2\sqrt{2}$	0,70
Altezza media	H_m	$\sqrt{\pi}/2$	$\sqrt{2\pi}$	0,62
Altezza significativa	$H_s = H_{1/3}$	$\sqrt{2}$	4,0	1,0
Altezza media del decimo più alto	$H_{1/10}$	1,80	5,09	1,27
Altezza media del centesimo più alto	$H_{1/100}$	2,35	6,67	1,66
<i>Periodi</i>		<i>Stime relative ai momenti spettrali</i>		

Periodo medio spettrale	T_{m01}	m_0/m_1
Periodo medio energetico	T_{m-10}	m_{-1}/m_0
Periodo medio energetico	T_{m-20}	$\sqrt{m_{-2}/m_0}$
Periodo di picco dello spettro	T_p	$1/f_p$

Tab. 2.4.1 – Descrizione spettrale e dei parametri d’onda

La descrizione spettrale dei parametri d’onda risulta di grande utilità per la valutazione delle cosiddette onde caratteristiche, ed è stata necessaria in questo lavoro di tesi per propagare le onde da largo sotto costa (tabella 2.4.1)

2.5 Frangimento

Se le onde in acque alte non sono in grado di esercitare un’azione morfodinamica, in acque basse la situazione è ben diversa, e il trasferimento di massa con la necessità di flussi opposti per ristabilire gli equilibri, le forti velocità orbitali al fondo e il loro andamento asimmetrico possono spostare ingenti quantità di sedimenti da e verso la riva, nonché, con onde oblique, anche lungo la costa.

Anche la forma dell’onda si modifica con il procedere verso riva, la sua altezza (H) aumenta e le creste divengono più appuntite, mentre i cavi si fanno sempre più piatti. In definitiva l’onda subisce un incremento di ripidità (H/L) fino a che si raggiunge la ripidità limite.

Inoltre, dato che le particelle si muovono nello strato superficiale sono meno soggette ad attrito rispetto a quelle che si muovono in prossimità del fondo, l’onda avanza più velocemente nella parte alta, le creste diventano quindi asimmetriche fino a che l’onda non cade in avanti su sé stessa: è il fenomeno del frangimento che comporta una dissipazione dell’energia trasportata dal moto ondoso. Esistono diversi criteri per la determinazione della ripidità limite:

- Criterio di Mitchell, massima ripidità dell'onda in acque profonde:

$$\left(\frac{H}{L}\right)_{max} = 0,142 \quad (2.5.1)$$

- Criterio di Miche, massima ripidità dell'onda in acque intermedie:

$$\left(\frac{H}{L}\right)_{max} = 0,142 \tan(kh) \quad (2.5.2)$$

- Criterio di McCowan che definisce l'indice di frangimento γ_b in acque basse:

$$\frac{H_f}{h_f} = \gamma_b = 0,78 \quad (2.5.3)$$

Il punto esatto dove avviene il frangimento non è facilmente stimabile o prevedibile, e per la sua determinazione esistono vari criteri empirici più o meno complessi (Madsen et al. 1997, D'Alessandro et al. 2008).

È importante comunque comprendere che il fenomeno del frangimento avviene in maniera ripetuta per una considerevole lunghezza, specialmente nel caso del frangimento “*spilling*”; una volta rotta l'onda, e dissipata una parte dell'energia, il moto ondoso riprende con altezza ridotta per poi rompersi ulteriormente, e così via.

Un criterio di frangimento semplice e molto usato è il seguente:

$$H_f = 0,8h \quad (2.5.4)$$

con H_b altezza d'onda al frangimento, e h profondità d'acqua corrispondente.

Le onde di gravità progressive possono raggiungere forme limite caratterizzate da altezze H_f indicate come altezze di frangimento, le quali dipendono dalla lunghezza d'onda L (quindi dal periodo T) e in aggiunta:

- dalla profondità h in condizioni di acque intermedie ($0,05 < h/L < 0,5$);
- dalla profondità del fondo e dalla sua pendenza β in condizioni di acque basse ($h/L \leq 0,05$) e con fondo non orizzontale.

Le condizioni di frangimento possono dunque essere descritte come segue:

$$\frac{H_f}{L} = F\left(\frac{h}{L}\right); \quad \frac{H_f}{gT^2} = F\left(\frac{h}{gT^2}\right) \quad (2.5.5)$$

$$\frac{H_f}{h} = F\left(\frac{h}{gT^2}\right); \quad \frac{H_f}{h} = F\left(\frac{h}{gT^2}, \beta\right) \quad (2.5.6)$$

$$\frac{H_f}{h} = \cos t; \quad \frac{H_f}{h} = F(\beta) \quad (2.5.7)$$

In particolare: le equazioni 2.5.5 il frangimento su profondità finita con fondo orizzontale e su profondità finita intermedia con fondo anche non orizzontale purché di pendenza β modesta tale cioè da non influenzare il frangimento stesso, come avviene molto frequentemente; le equazioni 2.5.6 riguardano il frangimento sulle basse profondità con fondo orizzontale la prima e con fondo non orizzontale la seconda, dove la pendenza deve essere messa in conto anche se modesta.

Le equazioni 2.5.7 identificano il frangimento sulle profondità relative che tendono a zero. Tutte le formule sopra descritte forniscono il valore dell'altezza d'onda in funzione del fondale, quindi il valore con cui decresce l'energia man a mano che ci sia avvicina alla costa.

È importante tenere presente che seguendo Svendsen e Jonsson (1976), la pendenza può essere ritenuta modesta se è verificata la condizione:

$$\frac{\beta L}{h} < 1 \quad (2.5.8)$$

Le onde frangenti possono essere classificate in quattro tipologie principali: Spilling, Plunging, Surging e Collapsing. Il tipo di frangimento è definito in funzione del numero di Iribaren:

$$\xi_b = \frac{\tan\beta}{\sqrt{H_0/L_0}} \quad (2.5.9)$$

Sono state riconosciute quattro (principali) modalità/tipologie o figure di frangimento (in acque basse), in funzione della pendenza del fondale.

Tali forme vengono descritte a partire da quelle relative alle spiagge meno perpendi e più dolci, verso quelle che avvengono nelle spiagge caratterizzate da pendenze man mano più ripide e pendenti.

- **Surging** sono caratterizzati da $\xi_b > 5$, si manifestano su spiagge molto scoscese ed è caratterizzato da una cresta non simmetrica rispetto alla verticale che passa per il punto più alto della cresta stessa, senza la presenza di un “getto” ma con schiuma dalla parte del verso di propagazione del mondo ondoso.

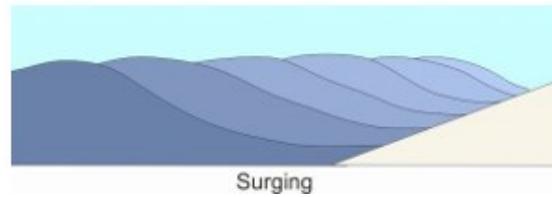


Figura 2.5.1 – Frangimento di tipo surging

- **Collapsing**, caratterizzati da $3,3 < \xi_b < 5$, si manifestano su spiagge di media pendenza e presentano da un frangimento poco evidente.

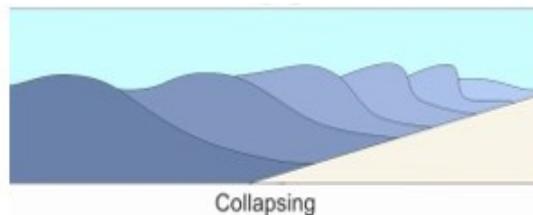


Figura 2.5.2 - Frangimento di tipo collapsing.

- **Plunging**, caratterizzati da $0,5 < \xi_b < 3,3$ sono i più vistosi poiché è caratterizzato da una cresta non simmetrica rispetto alla verticale che passa per il punto più alto della cresta stessa, con la presenza di un “getto” e di successiva “caduta” dalla parte del verso della propagazione del moto ondoso.

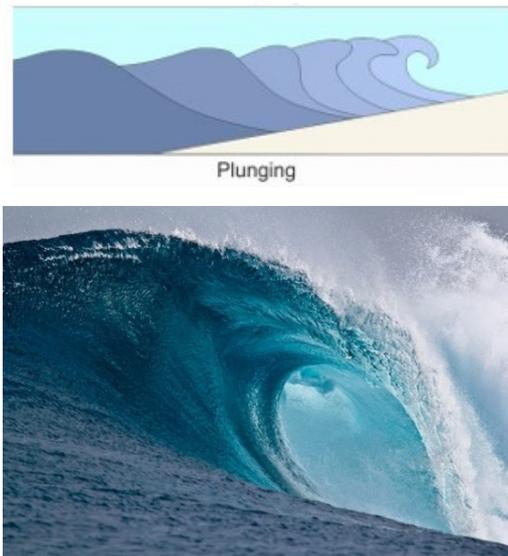


Figura 2.5.3 - Frangimento di tipo plunging

- **Spilling**, caratterizzati da $\xi_b < 0,5$ sono caratterizzati da una cresta simmetrica rispetto alla verticale che passa per il punto più alto della cresta stessa; associato a fondali orizzontali, o a pendenza modesta, e a onde con elevata ripidità al largo.

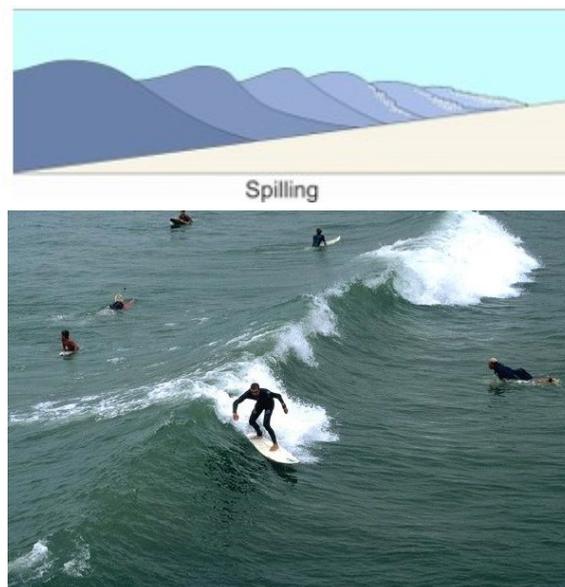


Figura 2.5.4 – Frangimento di tipo spilling

2.6 Swash

La dissipazione dell'energia del moto ondoso termina nel momento in cui le onde s'infrangono sulla spiaggia e risalgono la riva attraverso lo *swash*. Quando l'energia cinetica si trasforma completamente in energia potenziale,

le onde ridiscendono con il *backswash*, delimitando sulla riva una fascia detta *swash zone*.

Lo *swash* è inoltre un movimento estremamente asimmetrico, dove l'entità della risalita (*uprush*) è determinata dall'altezza e dalla velocità delle bore (onde frangenti corte) con cui giungono a riva, mentre la discesa (*backwash*) dipende dalla gravità. La sabbia, sulla quale avviene il movimento oscillante, può essere sia satura che insatura e ciò dipende dalla fase di marea e dai precedenti eventi di risalita.

Se il materiale che compone la spiaggia è molto grossolano ($d_{50} > 1 \text{ mm}$), lo *swash* potrebbe anche essere asimmetrico rispetto al volume liquido, cioè la quantità d'acqua che scorre verso il basso è minore di quella che sale perché una parte sostanziale del volume di risalita penetra nella spiaggia.

La zona di battigia può essere suddivisa in una parte esterna, dove il movimento oscillante e le onde isolate possono accavallarsi ed interagire le une con le altre, e una parte interna priva di interferenze.

L'idrodinamica della *swash zone* è in gran parte regolata dalle condizioni al contorno imposte dalla *surf zone* e dalla spiaggia sottostante (Fig. 1.3), dove per *surf zone* si intende la zona dei frangenti, compresa tra la *breaking zone* e la riva e può essere suddivisa in tre parti principali: *outer surf zone*, *inner surf zone* e *swash zone*.

Queste condizioni al contorno includono altezza d'onda, frequenza, forma d'onda, larghezza di banda spettrale, velocità orbitali, correnti, turbolenze, pendenza e composizione della spiaggia (granulometria, permeabilità, grado di saturazione).



Figura 2.6.1 – Rappresentazione dello swash e backwash

Di conseguenza, poiché la pendenza globale della spiaggia influenza le condizioni della *surf zone*, la *swash zone* può essere descritta considerando l'idrodinamica di tale zona che è caratterizzata da una vasta gamma di scale e tipi di moto dei fluidi che governano le oscillazioni sulla linea di costa. Questi possono includere onde corte (ad alta frequenza), onde lunghe, onde di bordo, onde di taglio, correnti lungo costa (*longshore*), turbolenza, vortici.

In prima approssimazione, la scala del moto ondoso dominante nella *inner surf zone* è determinato dal fatto che la zona di surf è satura (altezze d'onda e profondità limitate) o insatura (altezza d'onda locale indipendente dalla profondità). Nel primo caso, per le spiagge leggermente pendenti si può pensare che l'idrodinamica nella zona di surf sia dominata da onde non frangenti a bassa frequenza (spesso chiamate onde di infragravità). Per contro, le condizioni insature della zona di surf spesso mostrano una dominanza di onde a bassa energia, con *bore* che raggiungono il litorale. La transizione tra una zona di surf satura e zona di surf insatura può essere approssimativamente definita utilizzando il *parametro somiglianza di surf* o il *numero Iribarren*.

2.6.1 Caratteristiche della *Swash Zone* e meccanismi forzanti

Sebbene la zona oscillante si sposti lungo tutta la zona intertidale (ovvero quella interessata dalla marea), la zona di *swash* locale può essere definita

come la regione compresa tra il *runup* e il *rundown* dell'onda intorno al livello medio dell'acqua, escludendo il *setup* (Holman, 1986). Per le onde monocromatiche questa regione è ben definita, mentre nei casi reali marini i valori massimi di *runup*, *rundown* e *setup* variano con il tempo. Pertanto, la zona di *Swash* è genericamente definita come la regione in cui la spiaggia è periodicamente esposta all'atmosfera, possibilmente sia a lunghe (minuti) che a brevi (secondi) scale di tempo.

Forse va notato che in base a questa definizione, molti dati sperimentali attribuiti alla zona di *swash*, in particolare quelli cinematici, in realtà riguardano la zona di *surf* interna.

La ricerca scientifica si è prevalentemente focalizzata sulla caratterizzazione del comportamento del movimento diretto verso la riva, vale a dire sulle oscillazioni della battigia (*cross-shore*). Studi teorici, di campo e di laboratorio hanno portato all'identificazione di due diversi tipi di oscillazione in linea con le forzanti al largo del confine della zona *swash*. In genere, i movimenti oscillanti possono derivare dalle onde stazionarie non frangenti (onde di bordo) o dalle onde frangenti corte (*bores*). Oscillazioni di *swash* generate da onde stazionarie trasversali sono di solito osservate alle frequenze che caratterizzano le onde infragravitazionali. Le grandezze di questi due tipi di movimento della zona di *swash* sembrano essere ancora una funzione di ξ_b (numero di *Iribarren*).

Tuttavia, questa dipendenza è complicata dal fatto che le ampiezze delle onde infragravitazionali (sia nella *swash zone* che ancor più nella zona *offshore*) non sono necessariamente correlate a ξ_b , ma sono generalmente legate linearmente all'altezza delle onde in mare aperto.

Di conseguenza, la relazione tra l'ampiezza delle oscillazioni dovute a tali onde e il numero ξ_b può essere specifica del sito poiché è relativa alla pendenza della spiaggia e alla larghezza della piattaforma continentale.

Per stati casuali del mare, il movimento oscillante sia a basse che ad alte frequenze dipende anche dall'interazione tra gli eventi successivi di *swash* e dall'interazione tra onde stazionarie e *bore* incidenti.

Lo *swash* generato da onde incidenti più grandi può inglobare quello causato da precedenti onde più piccole, la ridiscesa (*backwash*) derivante da un evento di risalita (*uprush*) di grandi dimensioni può impedire la risalita di ondate più piccole, portando così ad una fusione di cicli di *swash* caratterizzata da un progressivo aumento del periodo oscillante ed alla diminuzione del numero di Iribarren.

Questo processo di interazione *swash-swash* comporta ulteriori difficoltà nel determinare la variazione con il numero di Iribarren del meccanismo che forza lo *swash*. Ad esempio, sia Mase (1988) che Elfrink e Baldock (1999) hanno dimostrato che, a causa del raggruppamento delle onde nella *Inner Surf Zone*, le *bore* prodotte dalle stesse onde corte potrebbero indurre oscillazioni di bassa frequenza, anche in assenza di onde di bassa frequenza nella zona di surf.

Inoltre, i dati di campo e di laboratorio indicano che il movimento oscillante può essere dovuto sia a onde infragravitazionali, sia a *bore* di onde corte, con la prevalenza di una forma di movimento sull'altra in relazione alle condizioni della zona di surf, che possono essere distinte, almeno qualitativamente, dal numero ξ_b . Tuttavia, tipicamente, sono i movimenti di bassa frequenza che dominano gli spettri del *runup*.

2.7 Run Up

Il fenomeno della massima risalita del moto ondoso su strutture marittime e su spiagge, noto nella letteratura anglosassone come *runup*, è stato estesamente studiato soprattutto ai fini della corretta progettazione di strutture costiere per la difesa del moto ondoso. Per fornire delle linee guida per la progettazione, infatti, sono stati condotti numerosi studi sperimentali che si sono poi tradotti in formule elaborate in funzione di opportuni parametri adimensionali come il numero di Iribaren.

Queste formulazioni empiriche, principalmente costruite sui risultati di esperimenti condotti adottando onde regolari o irregolari associate a spettri di frequenza a banda stretta, consentivano un'utile applicazione ingegneristica, ossia la determinazione della massima risalita misurata verticalmente a partire dal livello di quiete, senza tuttavia fornire indicazioni sulla dinamica del *runup*.

L'interesse per lo studio del *runup* va ben oltre gli aspetti sopra brevemente richiamati, basti pensare infatti che detto fenomeno è considerato dagli oceanografi come il meccanismo base per determinare l'impatto sulle coste degli tsunami, ossia di quelle onde particolarmente gravose, che, essendo caratterizzate da un a lunghezza d'onda rilevante, possono essere studiate attraverso il modello di onda solitaria. Ulteriore interesse nei confronti del processo di risalita del moto ondoso nasce nel momento in cui si considera la presenza di un fondo sabbioso erodibile.

Lo studio della propagazione del moto ondoso su fondali erodibili, anche se diffusamente trattato, è stato comunque inquadrato focalizzando principalmente l'attenzione sul processo di formazione delle barre costiere, problema questo che appare ancora non risolto in maniera soddisfacente a causa dei numerosi limiti inerenti alla modellazione dei fenomeni idrodinamici e di trasporto dei sedimenti.

È riconosciuto che il campo idrodinamico e i meccanismi di trasporto dei sedimenti che contraddistinguono l'area di battigia (*swash zone*) sono fondamentali per l'evoluzione costiera poiché, a causa dell'alta concentrazione del materiale sedimentario, una parte consistente del trasporto solido litoraneo avviene proprio nella regione vicino costa.

Tuttavia, fino a qualche anno fa, lo studio delle dinamiche della *swash zone* non ha ricevuto grande attenzione; non pari, almeno, a quella dedicata alla *surf zone*, ovvero la fascia di mare compresa tra la linea dei frangenti e la spiaggia.

Tale disparità è imputabile, in parte, alle difficoltà oggettive che si incontrano nell'eseguire misure specifiche nella *swash zone* e, in parte, alla complessità dei processi che la caratterizzano. Soltanto negli ultimi anni si è osservata un'inversione di tendenza e la *swash zone* è stata oggetto di un interessamento crescente, sia in termini di studi idrodinamici che di analisi dei meccanismi di trasporto solido.

La conoscenza degli aspetti cinematici legati ai flussi, di origine turbolenta, che si generano nella *surf zone* e si propagano attraverso di essa, fino a raggiungere la *swash zone*, è un requisito essenziale per un'adeguata modellazione dei processi idrodinamici che avvengono in quest'ultima.

Un modello per l'analisi dei processi della *swash zone* deve, perciò, rappresentare adeguatamente anche il campo idrodinamico della *surf zone* e l'evoluzione della linea di costa.

Quando le onde oceaniche si avvicinano alla costa, la maggior parte dell'energia dell'onda si dissipa attraverso la *surf zone*, a causa del frangimento, mentre una parte viene convertita in energia potenziale sotto forma di *runup* sulla battigia della spiaggia.

È bene precisare che il *runup* dell'onda, ed il conseguente *rundown*, sono fra i principali fattori che influenzano la stabilità delle spiagge naturali e delle strutture sulla costa. In particolare, la morfologia della spiaggia dipende fortemente dalla natura della *swash zone*, sia per periodi brevi (tempeste) che lunghi. Per comprendere il comportamento della spiaggia e le forze agenti sulle strutture nella zona costiera è quindi necessario modellare e cercare di prevedere i processi che coinvolgono la *swash zone*. Inoltre, il *runup* dell'onda è importante sia per oceanografi che per ingegneri costieri e progettisti, perché tali movimenti di risalita generano la maggior parte dell'energia responsabile dell'erosione della spiaggia. Per comprendere quindi la grandezza e la variabilità lungo costa dei valori estremi di *runup* è fondamentale per una previsione accurata degli impatti sulle zone di battigia e sulle strutture adiacenti.

Lo scopo di questa tesi è quello di valutare i risultati di *runup* dell'onda ottenuti mediante delle prove sperimentali eseguite nel laboratorio di Idraulica e Costruzioni Marittime del Dipartimento DICEA dell'Università Politecnica delle Marche, relativi sia ad onde regolari che irregolari. Un ulteriore obiettivo è stato quello di confrontare tali risultati con alcune relazioni teoriche presenti in letteratura al fine di correlare le grandezze derivanti dall'analisi delle onde con il *runup* corrispondente.

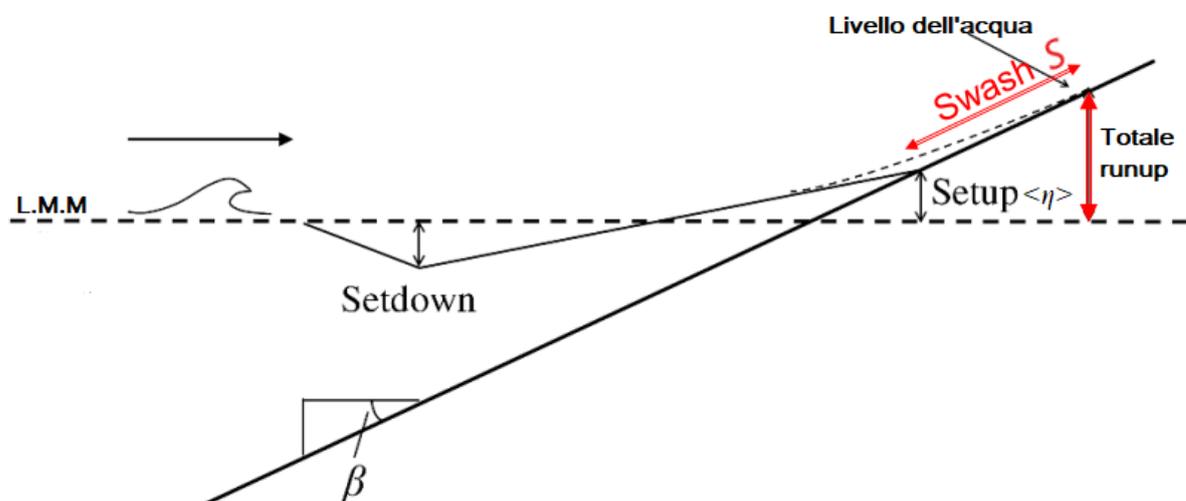


Figura 2.7.1 – Rappresentazione grafica del runup

Il *runup* è il risultato di due processi dinamicamente diversi:

- 1) $\langle \eta \rangle$, l'elevazione media del livello d'acqua nel tempo, sulla costa;
- 2) S , swash, fluttuazioni verticali variabili nel tempo intorno alla media temporale.

Secondo Miche (1951), le onde monocromatiche sono composte da due parti, una componente progressiva la cui energia viene dissipata durante il frangimento dell'onda e una componente verticale riflessa, che ha la sua massima sulla battigia.

I primi studi su *swash* e *runup* sono stati condotti in laboratori al fine di determinare l'impatto delle onde sulle strutture, Basandosi sulle idee di Miche, Hunt (1959) ha affermato che esiste una pendenza critica delle onde al di sotto della quale l'energia delle onde sarà totalmente riflessa da una spiaggia con pendenza verticale.

In condizioni di *surging*, c'è poca dissipazione dell'energia delle onde attraverso la pendenza della spiaggia e la maggior parte dell'energia si riflette sulla ripida pendenza della spiaggia. Per le situazioni più comuni di onde frangenti, l'energia viene dissipata nella surf zone.

Il comportamento dello swash su una spiaggia altamente dissipativa ($\xi_0 < 0,25$, $\beta < 0,02$) è stato studiato da Ruessink e al. (1998) ed hanno scoperto che il segnale dello *swash* era dominato dall'energia dello *swash* infragravitazionale ($f < 0,05\text{Hz}$).

Guza e Thornton (1982) hanno mostrato che l'altezza dell'oscillazione dell'infragravità aumenta linearmente con l'altezza dell'onda significativa in mare aperto, mentre per l'energia nella banda incidente diventa satura a causa della dissipazione attraverso la surf zone.

Sulla base degli studi precedentemente descritti sopra, si riporta la seguente relazione generale per il *runup* 2%, $Ru_{2\%}$, per qualsiasi dato:

$$Ru_{2\%} = \langle \eta \rangle + \frac{S}{2} \quad \text{dove;} \quad 2.7.1$$

$$S = \sqrt{(S_{inc})^2 + (S_{IG})^2}, \quad e \quad 2.7.2$$

$$\langle \eta \rangle, S_{inc}, S_{IG} = f(H_0, T_0, \beta_f) \quad 2.7.3$$

L'ipotesi che il livello di superamento del 2% per il *runup* ($Ru_{2\%}$) equivale alla 2.7.1 è stata prima validata. Di conseguenza, il valore effettivo del valore di superamento del 98% sarebbe definito come la media (setup) meno la metà di 2σ o $S/2$, invece il valore di superamento del 2% sarebbe definito come la media (setup) più la metà di 2σ o $S/2$. La correlazione quadrata tra i valori misurati di 2.7.1 ed $Ru_{2\%}$ è 94% che è significativa (figura 2.7.2)

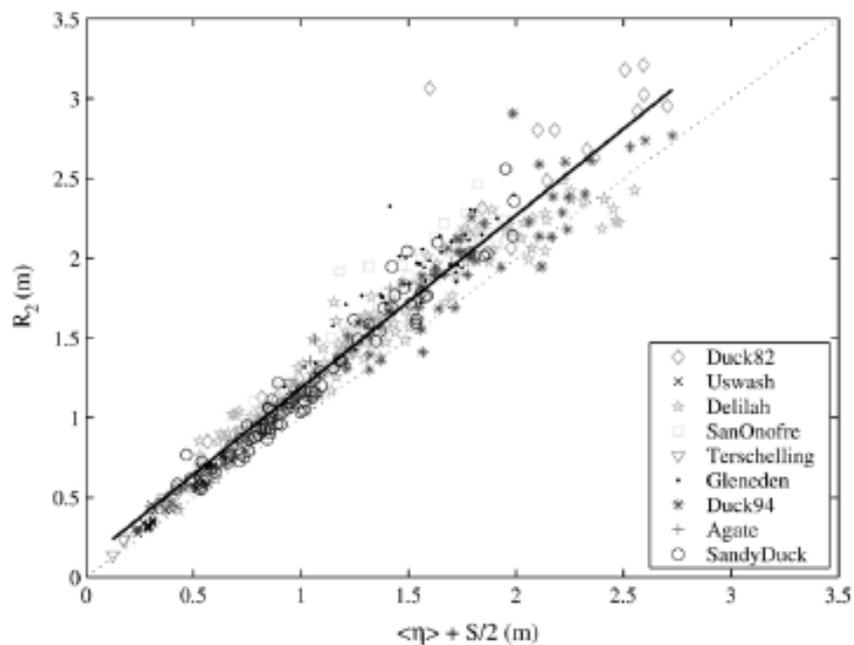


Figura 2.7.2- Correlazione tra $Ru_{2\%}$ e $\langle \eta \rangle + \frac{s}{2}$

L'inclinazione della regressione è 1,1 che riflette leggermente la natura non-Gaussiana dello swash naturale. Per tener conto di questa pendenza della regressione (fig. 2.7.2) l'equazione 2.7.1 è stata modificata diventando più completa:

$$Ru_{2\%} = 1,1 \left[\langle \eta \rangle + \frac{s}{2} \right] \quad 2.7.4$$

Per il setup non è stata trovata nessuna costante di proporzionalità tra $\langle \eta \rangle$ e H_0 , ma è stata migliorata includendo L_0 e β_f :

$$\langle \eta \rangle = 0,35\beta_f(H_0L_0)^{1/2} \quad 2.7.5$$

Su spiagge dinamicamente differenti, l'energia dello swash incidente e infragravitazionale contribuirà in modo differente allo swash totale (Guza e Thornton, 1982).

Lo *swash incidente* è meglio parametrizzato da una relazione che, come per la precedente, dipende dalla pendenza della spiaggia, dall'altezza e dalla lunghezza d'onda al largo;

$$S_{inc} = 0,75\beta(H_0L_0)^{1/2} \quad 2.7.6$$

Lo *swash infragravitazionale* è linearmente indipendente da β ed è parametrizzato come:

$$S_{IG} = 0,06(H_0L_0)^{1/2} \quad 2.7.7$$

È interessante notare che quando β_f viene rimosso dalla parametrizzazione del setup per spiagge dissipative non vi è nessuna diminuzione della correlazione del modello. Quindi β_f non è necessaria perché su spiagge dissipative non è linearmente dipendente alla pendenza della spiaggia (Hanslow e Nielsens, 1993). La parametrizzazione proposta per le spiagge dissipative è:

$$\langle \eta \rangle_d = 0,016(H_0L_0)^{1/2} \quad 2.7.8$$

Sulle spiagge dissipative, la grandezza dello *swash infragravitazionale* cresce con l'aumentare di H_0 , mentre lo *swash incidente* è completamente saturo.

Le spiagge dissipative ($\xi < 0,3$) sono dominate dall'energia dell'infragravità. L'energia sulle spiagge intermedie è strettamente suddivisa tra *swash incidente* e *infragravitazionale*.

Sulle spiagge riflettenti ($\xi > 1,25$) lo *swash* è dominato dall'energia incidente. Le spiagge dissipative sono dominate dall'energia dell'infragravità e lo *swash totale* (S), è composto principalmente dall'energia dello *swash infragravitazionale* ed è descritto come:

$$S = 0,046(H_0 L_0)^{1/2} \quad 2.7.9$$

Sulla base di questa parametrizzazione per le spiagge dissipative il *run up* può essere calcolato come:

$$Ru_{2\%} = 0,043(H_0 L_0)^{1/2} \quad 2.7.10$$

Sulle spiagge riflettenti ($\xi > 1,25$), dove lo *swash* è dominato dall'energia incidente, l'espressione del $Ru_{2\%}$ è descritta come:

$$Ru_{2\%} = 0,73\beta_f(H_0 L_0)^{1/2} \quad 2.7.11$$

Capitolo III
Configurazione Sperimentale

3.1 Strumenti e materiali

Nel presente capitolo vengono indicate dettagliatamente tutte le attività sperimentali che sono state eseguite e che costituiscono il punto di riferimento per lo studio dei fenomeni oggetto del presente lavoro di tesi. I test sono stati eseguiti presso il laboratorio di Idraulica e Costruzioni Marittime del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (DICEA) dell'Università Politecnica delle Marche. Nel seguito si riporta una descrizione dell'apparato sperimentale e strumentale, dei modelli di barriera utilizzati, delle condizioni ondose prese in esame e degli strumenti e modalità di acquisizione dei dati.

3.2 Descrizione della Canaletta ad onde

Le attività sperimentali sono state condotte utilizzando il canale per onde in piccola scala, l'impianto è una vasca idraulica con lunghezza utile di $50,0\text{ m}$ a partire dal generatore d'onda fino alla parete terminale che è situato sul lato opposto all'ondogeno, ha una larghezza di $1,0\text{ m}$ che si mantiene costante per tutto il suo sviluppo, ed un'altezza, anch'essa uniforme per tutto l'apparato pari ad $1,3\text{ m}$. La struttura della canaletta è costituita da un fondo metallico con spessore di 6 mm il quale è appoggiato su dei profilati in acciaio fissati su una serie di basamenti di cemento armato a costituire la struttura portante e da montanti che si sviluppano verticalmente con interasse di $2,0\text{ m}$ a partire dal fondo metallico verso l'alto. Tra i due montanti con interasse di $2,0\text{ m}$ è intraposta una parete in vetro temperato la quale è stata incollata ai montanti con del silicone, per impedire la fuoriuscita dell'acqua e garantendo una migliore aderenza.

Le pareti laterali sono costituite nei $36,0\text{ m}$ centrali da vetrate, così da permettere l'osservazione e lo studio del fenomeno fisico che si intende riprodurre, mentre le estremità sono ricoperte da pannelli metallici.

Il riempimento del suddetto canale avviene mediante l'uso di un impianto idraulico costituito da un'alimentazione (tre serbatoi di capacità complessiva pari a circa $25m^3$) alla quale è collegato un sistema di condotte in pvc che confluiscono la portata nel canale e che permettono lo svuotamento in caso di necessità. Il sistema può operare in due diverse modalità:

- a gravità (fin tanto che il livello all'interno dei serbatoi non raggiunge, ovviamente, il livello all'interno del canale)
- per pompaggio, mediante l'uso di un'apposita pompa governata elettricamente che permette il trasferimento del fluido dai serbatoi al canale e viceversa, facendo opportuna attenzione al controllo dell'assenza di aria in corrispondenza della pompa prima dell'avvio e durante la fase di lavoro.

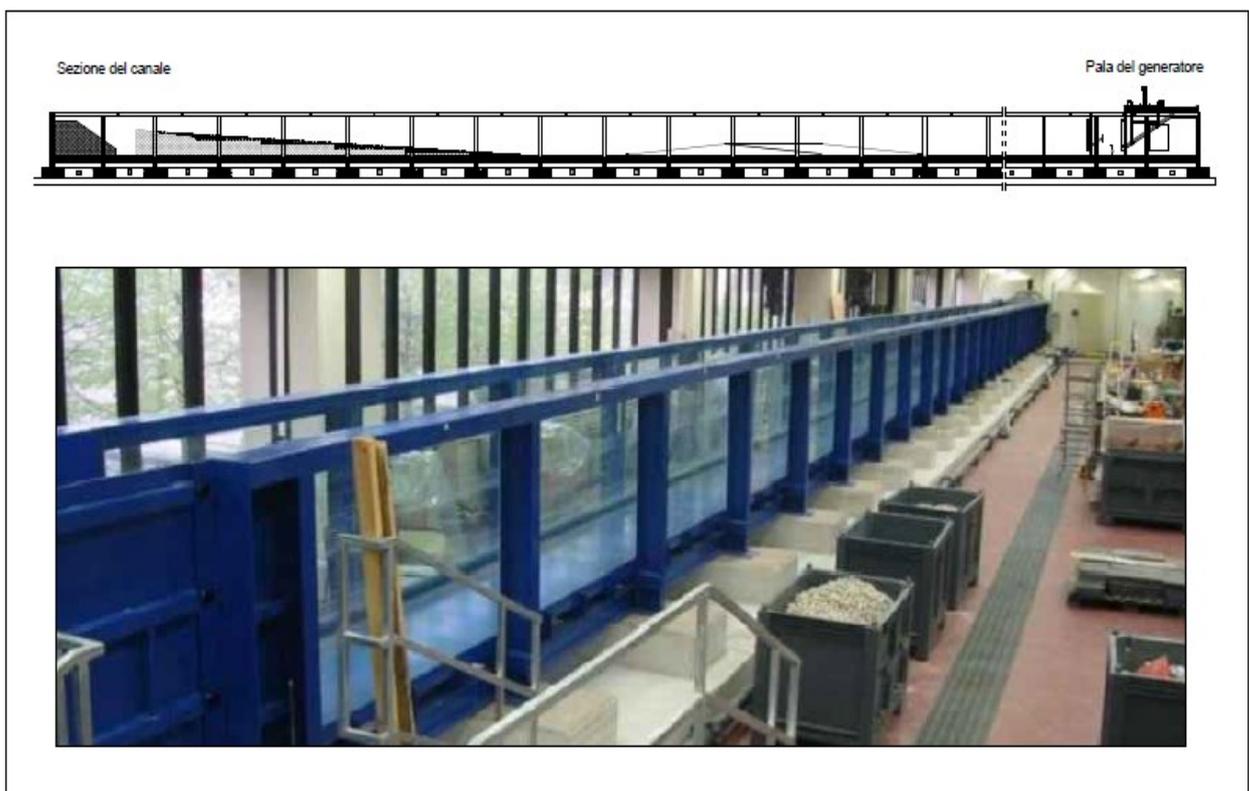


Figura 3.2.1 – Sezione e fotografia del canale

3.3 Generatore d'onda

Nella prima parte del canale per onde è posizionato un sistema di generazione prodotto dalla ditta HR Wallingford Ltd di Oxon (UK), costituito da una pala collegata elettricamente ad una centralina. Il tutto comprende:

Esso comprende:

- un elaboratore di generazione del segnale, per la gestione del programma di generazione ondosa HR WaveMaker;
- un generatore ondoso che produce le onde per mezzo del movimento di una pala;
- una cabina elettrica di controllo, che gestisce tutta la parte elettrica del motore (elettrico) che muove la pala e assicura che quest'ultima segua il segnale inviato del computer;
- un'unità di controllo che include l'assorbitore di onda dinamico, che ha la funzione di avvio e arresto remoto della cabina di controllo del motore, la scelta dell'assorbitore di onda dinamico ed il monitoraggio del segnale richiesto dal computer, del livello d'acqua di fronte alla pala e degli altri parametri per il set up del sistema di assorbimento delle onde.

Il generatore d'onda è di tipo a pistone e ha una corsa massima della pala pari ad 1 metro, una velocità massima di $0,80 \text{ m/s}$ e una forza massima di $4,80 \text{ kN}$. È costituito da una pala battionde montata verticalmente al di sotto di un attuatore di trasmissione elettrica che si muove traslando orizzontalmente, con movimento a pistone.

L'attuatore, sorretto da una struttura di sostegno montata sulla canaletta, è composto da una trave estrusa che scorre tra quattro guide lineari ed è spostata in avanti e indietro da un motore elettrico servoassistito AC, tramite un sistema pignone -cremagliera ed una scatola di trasformazione.

Il motore ha una bassa inerzia, necessaria al funzionamento alle alte frequenze, la cremagliera e il pignone consentono di raggiungere velocità che non sarebbero possibili con altri tipi di comando elettrico, e questo metodo di funzionamento per la pala è semplice e richiede scarsa manutenzione, in quanto non è necessario un sistema di lubrificazione interno, ma soltanto una pulizia ed una lubrificazione occasionale per mantenerlo in buone condizioni.

La scatola di trasformazione ha un elemento eccentrico che permette alla cremagliera e al pignone di ingranare con un trascurabile "passo morto". Sia la cremagliera che le guide di supporto sono in acciaio inossidabile.

Il motore servoassistito AC ha la propria unità di controllo e il sistema di generazione del segnale produce il comando di posizione richiesto. La posizione reale della pala è rilevata da un codificatore montato sul motore e la differenza tra questi due segnali è amplificata e usata per controllare il motore elettrico.

Il sistema di controllo è alloggiato nella cabina montata esternamente alla canaletta vicino al generatore, mentre il trasformatore, i fusibili e la linea di alimentazione sono alloggiati nell'unità di controllo del motore.



Figura 3.3.1 – *Generatore d'onda e sistema di controllo*

3.4 Sonde di livello elettro-resistive

La misura del profilo d'onda è stata effettuata attraverso le sonde di livello elettro-resistive disposte lungo la canaletta, quattro prima della barra sommersa, tre lungo il piano di risalita della barra, quattro sulla parte centrale, tre sul piano inclinato di discesa e una tra la spiaggia e la barra sommersa. Le sonde sono formate da una coppia di elettrodi paralleli situati ad una distanza fissa l'uno dall'altro e allineati perpendicolarmente alla direzione di propagazione dell'onda. Quando la sonda è in funzione una tensione alternata ad alta frequenza attraversa le due barre e viene misurata la relativa conduttanza elettrica.

La conduttanza è proporzionale alla lunghezza del conduttore al di sotto della superficie liquida e alla conducibilità elettrica dell'acqua. La variazione del livello al passaggio dell'onda è registrata come variazione della conduttanza.



Figura 3.4.1 – Posizione delle sonde elettro-resistive di livello

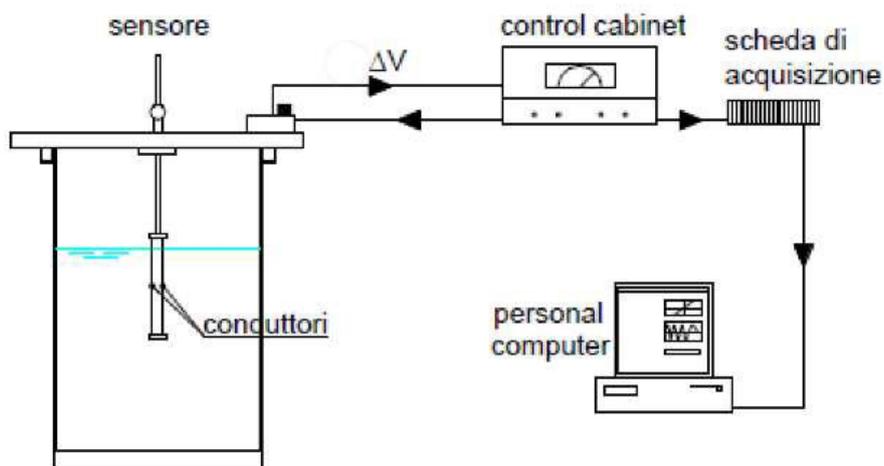


Figura 3.4.2 – Schema del sistema d'acquisizione

La sonda resistiva ha una buona risposta e può raggiungere un'approssimazione di circa $\pm 0,1 \text{ mm}$. Esse sono posizionate come mostrato in Fig. 3.7.1.

Per la misura del *runup* è stata appositamente sistemata una sonda elettro-resistiva, analoga nel funzionamento alle precedenti, lunga $3,45 \text{ m}$, sostenuta parallelamente al piano inclinato. La sonda è disposta nella *swash zone*.

Per consentire il fissaggio al fondale delle sonde si è dovuto procedere, per tutto il tratto in cui era posizionata la sonda, al fissaggio di spessori in pvc con della colla resistente all'acqua. Gli spessori erano posizionati ad una distanza di $0,75\text{ m}$ uno dall'altro, permettendo alle sonde di rimanere sospese rispetto alla superficie di fondo e impedendo quindi che la conduttività del piano inclinato, realizzato delle piastre in acciaio, potesse disturbare il segnale.

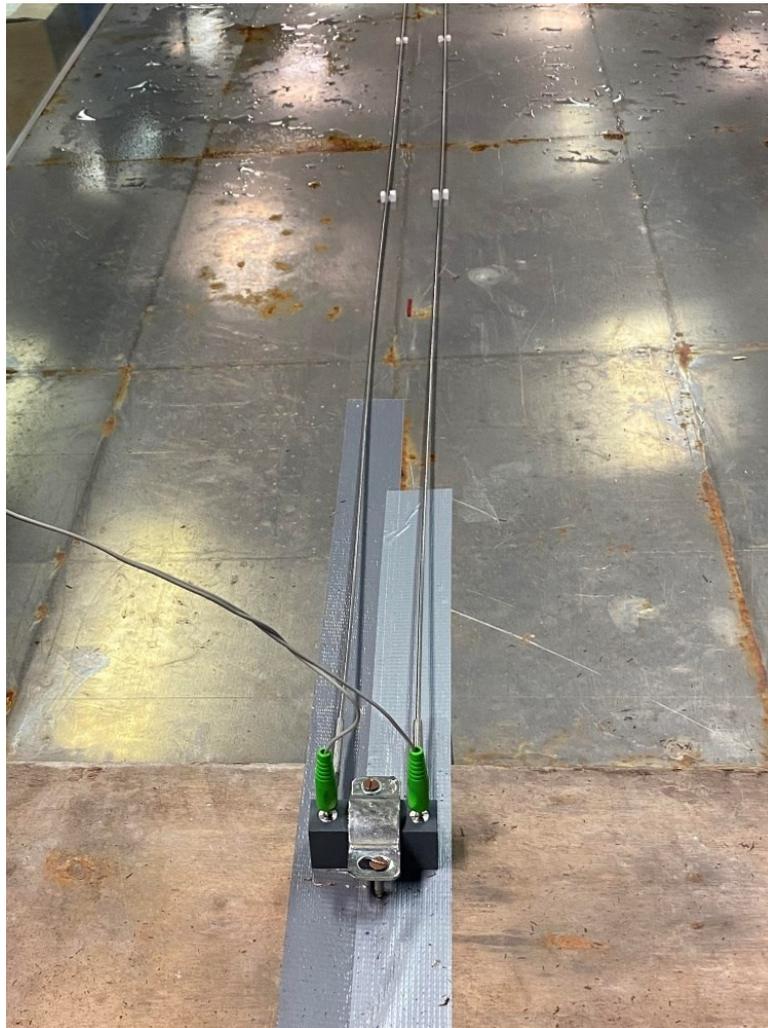


Figura 3.4.3 – Posizione della sonda elettro-resistive del run-up

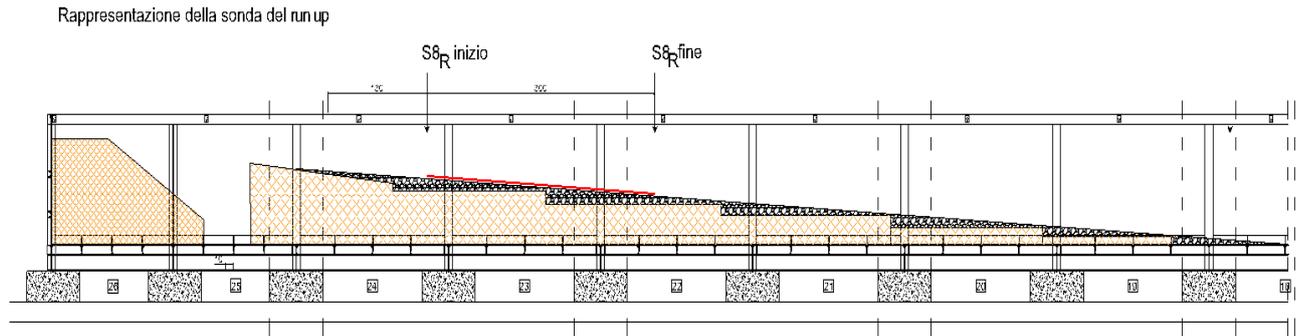


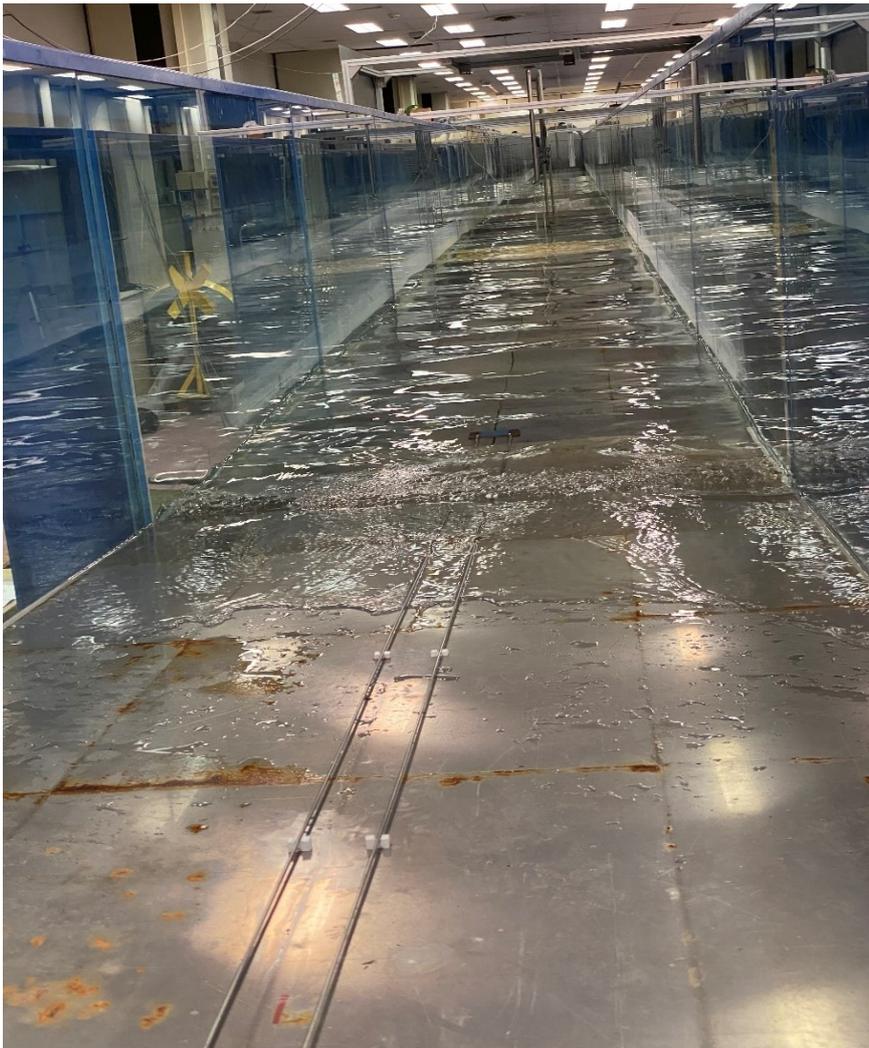
Figura 3.4.4 – Rappresentazione della sonda del run up ($S8_R$)

3.5 Paramento piano inclinato

Come simulazione della spiaggia, all'interno della canaletta, è stato realizzato un paramento piano, liscio, impermeabile, con inclinazione di 1:20. Esso è stato ottenuto mediante rocce poste sulla parte iniziale, sul tratto intermedio e finale. A causa dell'altezza della struttura inclinata sono stati impiegati dei sacchi di sabbia appoggiati ed avvolti su un materasso di gomma, infine sono stati ricoperti con delle rocce. Al di sopra delle rocce sono state disposte delle lastre in pvc per creare un piano il più uniforme possibile sul quale saranno appoggiate le lastre in acciaio. Le piastre d'acciaio hanno diversi scopi; garantire che il paramento fosse impermeabile e liscio ed impedire un sollevamento della sottostante lastra in alluminio a causa della sottospinta dell'acqua dovuta all'azione ondosa. La filtrazione attraverso il piano, che avviene quasi esclusivamente lateralmente, attraverso la zona di contatto tra compensato marino e vetro delle pareti, può essere considerata trascurabile in quanto sono state inserite delle guarnizioni in gomma tra la lastra in alluminio e i vetri laterali. Nelle Fig. 3.5.1 e 3.5.2 si possono vedere le rappresentazioni del paramento inclinato.



Figura 3.5.1 – Rappresentazione del paramento inclinato 1:20



3.6 La geometria della barra sommersa

Al fine di poter simulare al meglio l'effetto di una barra in mare, all'interno del canale per onde è stata realizzata una struttura costituita da un primo paramento inclinato (lato mare), una “soglia” orizzontale sul quale si stabilisce un tirante costante e poi un nuovo paramento inclinato con conseguente aumento del tirante (lato spiaggia):

- i paramenti hanno pendenza costante pari a $1:10$ (fig. 3.6.1) e sono lunghi $4,00\text{ m}$;
- il tratto centrale (a) assume una lunghezza netta di $3,00\text{ m}$ (fig. 3.6.1);
- il piano di riferimento (b) ha una quota dal fondo del canale pari a $0,41\text{ m}$;
- Il livello idrico (c) è pari a $0,51\text{ m}$ e $0,56\text{ m}$, corrispondenti, rispettivamente, a sommergenze della struttura pari a $R_c = -0,10\text{ m}$ e $R_c = -0,15\text{ m}$.

I paramenti sono stati realizzati in materiale metallico opportunamente saldato su una struttura che appunto raccorda la quota di quello centrale alla quota lato mare e lato spiaggia; tali pedane hanno lunghezza di $3,00\text{ m}$.

Al fine di garantire la pendenza costante $1:10$ fino al fondo del canale sono state quindi realizzate altre due pedane di collegamento della lunghezza di $1,00\text{ m}$.

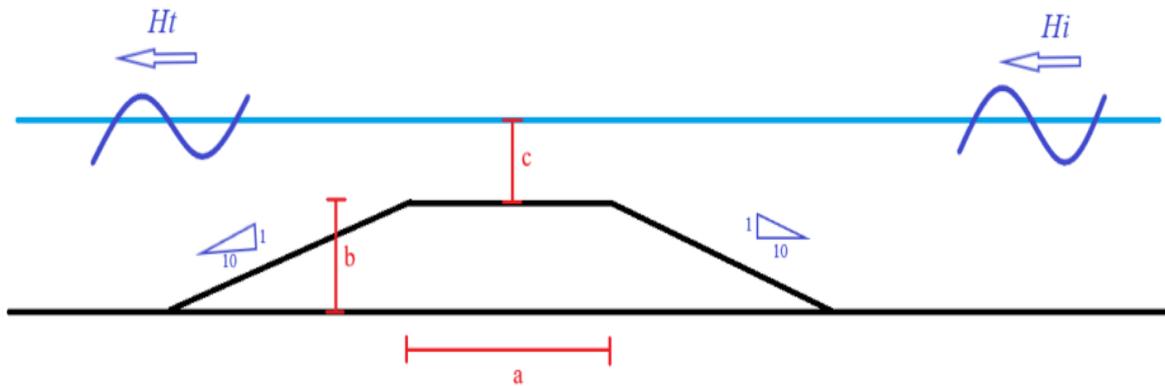


Figura 3.6.1 – Schema della barra sommersa

Tutta la struttura è stata opportunamente appesantita grazie all'uso di piastre e masse metalliche di vario tipo, questo per evitare spostamenti traslativi e di sollevamento dovuti all'effetto di pressioni e sottopressioni sviluppate dal moto ondoso, che avrebbero certamente compromesso le misurazioni e quindi i risultati. Inoltre, sono state poste sui bordi delle pedane delle guarnizioni sagomate in gomma che non hanno in alcun modo interferito nella sperimentazione ma che hanno contribuito ad eliminare l'effetto parete dovuto ai pochi millimetri rimasti tra la pedana e la vetratura del canale.



Figura 3.6.2 – Sistema di appesantimento della barra al passaggio di un'onda frangente



Figura 3.6.3 – Configurazione della barra sommersa

3.7 Posizionamento delle sonde e metodo di separazione utilizzato

Al fine di poter applicare i metodi proposti in letteratura per separare le componenti incidente e riflessa del moto ondoso a partire dalle registrazioni

delle sonde elettro-resistive, esse devono essere posizionate in maniera opportuna, in funzione del metodo che viene applicato. Nel caso in analisi si è fatto riferimento ad un gruppo di sonde, il primo, costituito da quattro sonde, ha consentito l'analisi delle onde regolari con il metodo proposto da Lin e Huang per permettere il calcolo dell'altezza incidente (H_i).

Occorre ricordare che, per quanto riguarda il metodo a quattro sonde, al fine di ottenere risultati ottimali debbono verificarsi contemporaneamente le seguenti condizioni:

$$\Delta x_2 = n \frac{\lambda}{2}, \Delta x_3 = p \Delta x_2; \Delta x_4 = q \Delta x_2; \Delta x_4 = r \Delta x_3 \text{ con } n, p, q, r = 1, 2, \dots$$

Tali condizioni di spaziatura risultano essere quelle che hanno portato alla definizione dei vari Δx e diventano meno restrittive con l'aumento del numero di sonde, ciò significa che rispetto al metodo delle due sonde oltre ad esser più preciso, risulta anche più versatile da applicare.

A dimostrazione di quanto appena descritto si è deciso di posizionare la prima sonda ad una distanza rispetto alla generazione pari a $11,65 \text{ m}$, e le successive 7 sonde a interassi rispettivamente di $4,50 \text{ m}$, $1,00 \text{ m}$, $0,70 \text{ m}$, $0,80 \text{ m}$, $1,50 \text{ m}$, $1,25 \text{ m}$, $1,25 \text{ m}$ e $1,25 \text{ m}$, come riportato in Figura 3.7.1 per le sonde dalla 1 alla 8. Le quattro sonde di riferimento per l'applicazione dei metodi di separazione delle componenti sono state quelle dalla seconda alla quinta e con esse è stato possibile fare delle valutazioni relativamente alla riflessione dovuta alla presenza della barra.

Ciascuna prova è stata poi ripetuta spostando sette sonde (dalla 2 alla 8) sopra e a valle dell'ostacolo (sonde nella posizione dalla 9 alla 15 di Figura 3.7.1) per studiare anche la propagazione e la trasmissione dell'onda

incidente e mantenendo la prima sonda “fissa” come riferimento utile alla sincronizzazione dei segnali tra diverse ripetizioni.

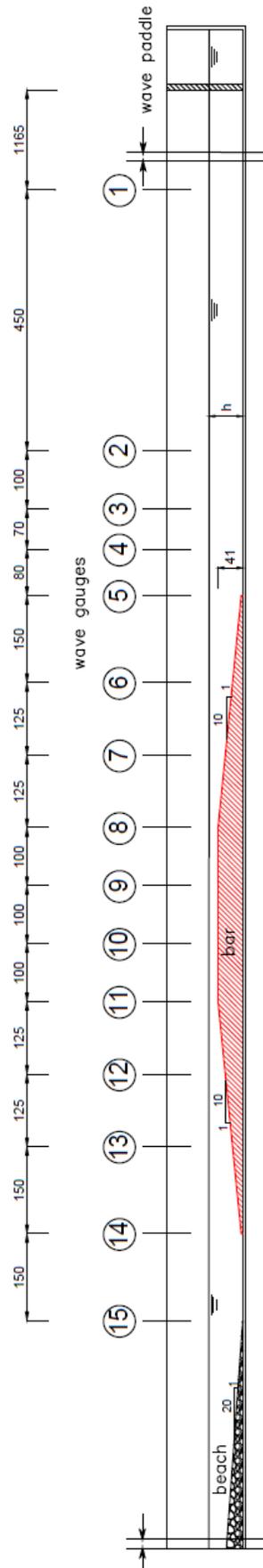


Figura 3.7.1 – Schema dell'apparato di sperimentazione e del posizionamento delle sonde

Capitolo IV
Analisi dei dati sperimentali

I test sono stati eseguiti presso il laboratorio di idraulica e costruzioni marittime del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (DICEA) dell'Università Politecnica delle Marche. Nel seguito si riporta una descrizione delle condizioni ondose prese in esame per i vari livelli di tirante idrico all'interno del canale (e quindi di sommergenza della barra), nonché importanti considerazioni relativamente alla riflessione e alla trasmissione rispetto all'onda incidente. Occorre infatti premettere che la sperimentazione è stata condotta con un livello d'acqua nel canale pari a:

- $0,51\text{ m}$, al quale corrisponde una sommergenza della barra pari a $0,10\text{ m}$,
- $0,56\text{ m}$, al quale corrisponde una sommergenza della barra pari a $0,15\text{ m}$.

4.2 Caratteristiche delle onde

Nelle seguenti tabelle vengono riportate le caratteristiche principali delle onde incidenti generate per mezzo del generatore d'onda che sono state protagoniste nello sviluppo di tali sperimentazioni, in termini di altezza H , periodo T , lunghezza L , sia per quanto riguarda le *onde regolari monocromatiche* sia per quanto riguarda le *onde irregolari*. Entrambe le due tipologie di onde, come già descritto sopra, sono state testate per le due condizioni di livello idrico. Le Tabelle 4.2.1 e 4.2.2 si riferiscono alle onde monocromatiche. Qui l'altezza d'onda e il periodo riportati nelle tabelle si riferiscono ai valori imposti alla generazione mentre la lunghezza d'onda è quella calcolata con la teoria lineare alla profondità della generazione.

Le Tabelle 4.2.3 e 4.2.4 si riferiscono invece alle onde irregolari. In analogia alle tabelle precedenti i valori di altezza d'onda significativa e periodo di picco sono quelli impostati alla pala e la lunghezza d'onda è calcolata col periodo di picco alla profondità corrispondente.

Onde regolari			
h = 0,51 [m]			
Nome	H [m]	T [s]	L [m]
H2_T100	0,02	1,00	1,515
H2_T150	0,02	1,50	2,841
H2_T200	0,02	2,00	4,088
H2_T250	0,02	2,50	5,283
H3_T100	0,03	1,00	1,516
H3_T150	0,03	1,50	2,842
H3_T200	0,03	2,00	4,089
H3_T250	0,03	2,50	5,283
H4_T100	0,04	1,00	1,516
H4_T150	0,04	1,50	2,842
H4_T200	0,04	2,00	4,088
H4_T250	0,04	2,50	5,284
H5_T100	0,05	1,00	1,516
H5_T150	0,05	1,50	2,842
H5_T200	0,05	2,00	4,088
H5_T250	0,05	2,50	5,283
H6_T100	0,06	1,00	1,516
H6_T150	0,06	1,50	2,842
H6_T200	0,06	2,00	4,088
H6_T250	0,06	2,50	5,283
H8_T100	0,08	1,00	1,516
H8_T150	0,08	1,50	2,842
H8_T200	0,08	2,00	4,088
H8_T250	0,08	2,50	5,284
H10_T100	0,10	1,00	1,516
H10_T150	0,10	1,50	2,842
H10_T200	0,10	2,00	4,088
H10_T250	0,10	2,50	5,283
H12_T100	0,12	1,00	1,516
H12_T150	0,12	1,50	2,842
H12_T200	0,12	2,00	4,088
H12_T250	0,12	2,50	5,284
H15_T100	0,15	1,00	1,516
H15_T150	0,15	1,50	2,842

H15_T200	0,15	2,00	4,088
H15_T250	0,15	2,50	5,284

Tab. 4.2.1 – Caratteristiche delle onde riprodotte per le onde regolari

Onde regolari			
h = 0,56 [m]			
Nome	H [m]	T [s]	L [m]
H2_T100	0,02	1,00	1,530
H2_T150	0,02	1,50	2,927
H2_T200	0,02	2,00	4,244
H2_T250	0,02	2,50	5,504
H3_T100	0,03	1,00	1,530
H3_T150	0,03	1,50	2,927
H3_T200	0,03	2,00	4,244
H3_T250	0,03	2,50	5,505
H4_T100	0,04	1,00	1,529
H4_T150	0,04	1,50	2,9267
H4_T200	0,04	2,00	4,244
H4_T250	0,04	2,50	5,505
H5_T100	0,05	1,00	1,529
H5_T150	0,05	1,50	2,927
H5_T200	0,05	2,00	4,244
H5_T250	0,05	2,50	5,505
H6_T100	0,06	1,00	1,530
H6_T150	0,06	1,50	2,927
H6_T200	0,06	2,00	4,244
H6_T250	0,06	2,50	5,505
H8_T100	0,08	1,00	1,529
H8_T150	0,08	1,50	2,927
H8_T200	0,08	2,00	4,244
H8_T250	0,08	2,50	5,504
H10_T100	0,10	1,00	1,530
H10_T150	0,10	1,50	2,927
H10_T200	0,10	2,00	4,244
H10_T250	0,10	2,50	5,505
H12_T100	0,12	1,00	1,530
H12_T150	0,12	1,50	2,927
H12_T200	0,12	2,00	4,244
H12_T250	0,12	2,50	5,504
H15_T100	0,15	1,00	1,530
H15_T150	0,15	1,50	2,927

H15_T200	0,15	2,00	4,244
H15_T250	0,15	2,50	5,504

Tab. 4.2.2 – Caratteristiche delle onde riprodotte per le onde regolari

Onde Irregolari			
h = 0,51 [m]			
Nome	Hs [m]	Tp [s]	L [m]
H3_T200	0,03	2,00	3,5203
H3_T250	0,03	2,50	4,9573
H4_T150	0,04	1,50	2,6351
H4_T100	0,05	1,00	1,3121
H5_T200	0,05	2,00	3,5349
H5_T250	0,05	2,50	4,9851
H6_T150	0,06	1,50	2,6595
H8_T100	0,08	1,00	1,3811
H8_T200	0,08	2,00	3,5906
H8_T250	0,08	2,50	5,0045
H10_T150	0,10	1,50	2,6912
H12_T100	0,12	1,00	1,4823

Tab 4.2.3 – Caratteristiche delle onde riprodotte per le onde irregolari

Onde Irregolari			
h = 0,56 [m]			
Nome	Hs [m]	Tp [s]	L [m]
H3_T200	0,03	2,00	3,6678
H3_T250	0,03	2,50	5,1034
H4_T150	0,04	1,50	2,7202
H4_T100	0,05	1,00	1,3058
H5_T200	0,05	2,00	3,7043
H5_T250	0,05	2,50	5,1417
H6_T150	0,06	1,50	2,7305
H8_T100	0,08	1,00	1,3632
H8_T200	0,08	2,00	3,6967
H8_T250	0,08	2,50	5,1519

H10_T150	0,10	1,50	2,7162
H12_T100	0,12	1,00	1,4823

Tab 4.2.4 – *Caratteristiche delle onde riprodotte per le onde irregolari*

4.3 Determinazione delle altezze d'onda incidente e trasmessa per le onde regolari

Come già precedentemente affermato l'analisi delle onde regolari in termini di altezze d'onda incidenti è stata eseguita utilizzando l'approccio a quattro sonde illustrato in Lin e Huang (2004) è descritto nella sezione 3.7. I risultati sono stati elaborati attraverso lo sviluppo di un codice di calcolo con l'ausilio del software MATLAB.

L'altezza dell'onda trasmessa, invece, è stata misurata direttamente dai sensori di livello posti a valle della barra. In particolare, sono state prese in considerazione le acquisizioni effettuate in corrispondenza della sonda *n.15*.

L'altezza d'onda trasmessa misurata alla sonda *n.15* è stata denominata Hm_{0t} , essa è stata calcolata in funzione dello spettro di densità di energia alla sonda *n.15* ($Hm_0 = 4\sqrt{m_0}$ in cui m_0 è il momento di ordine zero dello spettro). Di seguito sono riportate le tabelle con i valori ottenuti.

Onde regolari				
h = 0,51 [m]				
Nome	H [m]	T [s]	Hi [m]	H_{mot} [m]
H2_T100	0,02	1,00	0,0160	0,0185
H2_T150	0,02	1,50	0,0180	0,0238
H2_T200	0,02	2,00	0,0160	0,0223
H2_T250	0,02	2,50	0,0158	0,0225
H3_T100	0,03	1,00	0,0246	0,0286
H3_T150	0,03	1,50	0,0272	0,0352
H3_T200	0,03	2,00	0,0242	0,0357
H3_T250	0,03	2,50	0,0245	0,0400
H4_T100	0,04	1,00	0,0326	0,0395
H4_T150	0,04	1,50	0,0362	0,0429
H4_T200	0,04	2,00	0,0324	0,0473
H4_T250	0,04	2,50	0,0337	0,0360
H5_T100	0,05	1,00	0,0400	0,0493
H5_T150	0,05	1,50	0,0452	0,0349
H5_T200	0,05	2,00	0,0411	0,0382
H5_T250	0,05	2,50	0,0416	0,0367
H6_T100	0,06	1,00	0,0468	0,0591
H6_T150	0,06	1,50	0,0539	0,0336
H6_T200	0,06	2,00	0,0490	0,0363
H6_T250	0,06	2,50	0,0500	0,0370
H8_T100	0,08	1,00	0,0626	0,0472
H8_T150	0,08	1,50	0,0711	0,0403
H8_T200	0,08	2,00	0,0669	0,0366
H8_T250	0,08	2,50	0,0684	0,0407
H10_T100	0,10	1,00	0,0798	0,0423
H10_T150	0,10	1,50	0,0902	0,0449
H10_T200	0,10	2,00	0,0833	0,0408
H10_T250	0,10	2,50	0,0896	0,0448
H12_T100	0,12	1,00	0,0942	0,0408
H12_T150	0,12	1,50	0,1085	0,0429
H12_T200	0,12	2,00	0,0982	0,0372
H12_T250	0,12	2,50	0,1071	0,0484
H15_T100	0,15	1,00	0,1184	0,0401
H15_T150	0,15	1,50	0,1332	0,0530

H15_T200	0,15	2,00	0,1218	0,0390
H15_T250	0,15	2,50	0,1367	0,0536

Tab. 4.3.1 – Altezze d'onda incidente calcolata e altezza d'onda trasmessa misurata a valle della barra sommersa

Onde regolari				
h = 0,56 [m]				
Nome	H [m]	T [s]	Hi [m]	Hm_{ot} [m]
H2_T100	0,02	1,00	0,0163	0,0201
H2_T150	0,02	1,50	0,0169	0,0206
H2_T200	0,02	2,00	0,0172	0,0208
H2_T250	0,02	2,50	0,0150	0,0186
H3_T100	0,03	1,00	0,0247	0,0304
H3_T150	0,03	1,50	0,0249	0,0315
H3_T200	0,03	2,00	0,0258	0,0339
H3_T250	0,03	2,50	0,0230	0,0311
H4_T100	0,04	1,00	0,0322	0,0404
H4_T150	0,04	1,50	0,0334	0,0425
H4_T200	0,04	2,00	0,0345	0,0484
H4_T250	0,04	2,50	0,0311	0,0460
H5_T100	0,05	1,00	0,0403	0,0509
H5_T150	0,05	1,50	0,0429	0,0532
H5_T200	0,05	2,00	0,0431	0,0626
H5_T250	0,05	2,50	0,0394	0,0617
H6_T100	0,06	1,00	0,0481	0,0614
H6_T150	0,06	1,50	0,0502	0,0642
H6_T200	0,06	2,00	0,0520	0,0765
H6_T250	0,06	2,50	0,0478	0,0751
H8_T100	0,08	1,00	0,0632	0,0834
H8_T150	0,08	1,50	0,0675	0,0888
H8_T200	0,08	2,00	0,0685	0,0558
H8_T250	0,08	2,50	0,0645	0,0569
H10_T100	0,10	1,00	0,0780	0,0994
H10_T150	0,10	1,50	0,0846	0,0671
H10_T200	0,10	2,00	0,0880	0,0572
H10_T250	0,10	2,50	0,0820	0,0604
H12_T100	0,12	1,00	0,0942	0,0784
H12_T150	0,12	1,50	0,1014	0,0747
H12_T200	0,12	2,00	0,1049	0,0614
H12_T250	0,12	2,50	0,0987	0,0650
H15_T100	0,15	1,00	0,1169	0,0703
H15_T150	0,15	1,50	0,1261	0,0768

H15_T200	0,15	2,00	0,1308	0,0648
H15_T250	0,15	2,50	0,1224	0,0684

Tab. 4.3.2 – Altezze d'onda incidente calcolata e altezza d'onda trasmessa misurata a valle della barra sommersa

4.3.1 Determinazione del run up per le onde regolari

Per la determinazione del *runup*, ovvero l'entità della risalita ondosa sulla spiaggia, sono state utilizzate due metodologie. La prima metodologia fa riferimento al *Ru2%*, ovvero, il valore di *runup* superato solamente dal 2% delle onde in arrivo sulla spiaggia. Invece la seconda metodologia rappresenta il *runup* calcolato dallo spettro valutato dal segnale misurato sulla sonda del *runup* ed è stato calcolato come la somma del contributo del *setup* e dello *swash* come riportato nella 2.7.1.

Onde Regolari				
h = 0,51 [m]				
Nome	H [m]	T [s]	Ru2% [m]	1,1 (<math>\langle \eta \rangle + S/2</math>) [m]
H2_T100	0,02	1,00	0,0039	0,0040
H2_T150	0,02	1,50	0,0072	0,0076
H2_T200	0,02	2,00	0,0091	0,0098
H2_T250	0,02	2,50	0,0110	0,0123
H3_T100	0,03	1,00	0,0050	0,0052
H3_T150	0,03	1,50	0,0102	0,0111
H3_T200	0,03	2,00	0,0117	0,0129
H3_T250	0,03	2,50	0,0128	0,0141
H4_T100	0,04	1,00	0,0055	0,0052
H4_T150	0,04	1,50	0,0123	0,0133
H4_T200	0,04	2,00	0,0125	0,0133
H4_T250	0,04	2,50	0,0132	0,0149
H5_T100	0,05	1,00	0,0082	0,0087
H5_T150	0,05	1,50	0,0104	0,0111
H5_T200	0,05	2,00	0,0103	0,0109
H5_T250	0,05	2,50	0,0161	0,0174
H6_T100	0,06	1,00	0,0112	0,0116
H6_T150	0,06	1,50	0,0116	0,0121
H6_T200	0,06	2,00	0,0114	0,0120
H6_T250	0,06	2,50	0,0185	0,0191
H8_T100	0,08	1,00	0,0097	0,0103
H8_T150	0,08	1,50	0,0140	0,0139
H8_T200	0,08	2,00	0,0156	0,0137
H8_T250	0,08	2,50	0,0210	0,0215
H10_T100	0,10	1,00	0,0108	0,0111
H10_T150	0,10	1,50	0,0158	0,0154
H10_T200	0,10	2,00	0,0153	0,0149
H10_T250	0,10	2,50	0,0226	0,0243
H12_T100	0,12	1,00	0,0129	0,0136
H12_T150	0,12	1,50	0,0199	0,0194
H12_T200	0,12	2,00	0,0186	0,0180
H12_T250	0,12	2,50	0,0275	0,0299
H15_T100	0,15	1,00	0,0147	0,0156
H15_T150	0,15	1,50	0,0266	0,0251
H15_T200	0,15	2,00	0,0269	0,0251

H15_T250	0,15	2,50	0,0371	0,0391
----------	------	------	--------	--------

Tab. 4.3.3 – Runup 2% e Runup calcolato dallo spettro

Onde Regolari				
h = 0,56 [m]				
Nome	H [m]	T [s]	Ru2% [m]	1,1 (<η> + S/2) [m]
H2_T100	0,02	1,00	0,0026	0,0027
H2_T150	0,02	1,50	0,0036	0,0039
H2_T200	0,02	2,00	0,0033	0,0034
H2_T250	0,02	2,50	0,0050	0,0056
H3_T100	0,03	1,00	0,0043	0,0045
H3_T150	0,03	1,50	0,0053	0,0057
H3_T200	0,03	2,00	0,0050	0,0055
H3_T250	0,03	2,50	0,0054	0,0061
H4_T100	0,04	1,00	0,0060	0,0062
H4_T150	0,04	1,50	0,0071	0,0077
H4_T200	0,04	2,00	0,0083	0,0088
H4_T250	0,04	2,50	0,0079	0,0087
H5_T100	0,05	1,00	0,0070	0,0075
H5_T150	0,05	1,50	0,0093	0,0099
H5_T200	0,05	2,00	0,0125	0,0130
H5_T250	0,05	2,50	0,0152	0,0132
H6_T100	0,06	1,00	0,0084	0,0092
H6_T150	0,06	1,50	0,0127	0,0137
H6_T200	0,06	2,00	0,0159	0,0164
H6_T250	0,06	2,50	0,0202	0,0200
H8_T100	0,08	1,00	0,0125	0,0128
H8_T150	0,08	1,50	0,0188	0,0199
H8_T200	0,08	2,00	0,0161	0,0174
H8_T250	0,08	2,50	0,0147	0,0156
H10_T100	0,10	1,00	0,0151	0,0158
H10_T150	0,10	1,50	0,0189	0,0203
H10_T200	0,10	2,00	0,0192	0,0200
H10_T250	0,10	2,50	0,0187	0,0203
H12_T100	0,12	1,00	0,0132	0,0129
H12_T150	0,12	1,50	0,0207	0,0220
H12_T200	0,12	2,00	0,0231	0,0230
H12_T250	0,12	2,50	0,0219	0,0232
H15_T100	0,15	1,00	0,0121	0,0120
H15_T150	0,15	1,50	0,0234	0,0243

H15_T200	0,15	2,00	0,0277	0,0283
H15_T250	0,15	2,50	0,0255	0,0273

Tab. 4.3.4 – Runup 2% e Runup calcolato dallo spettro

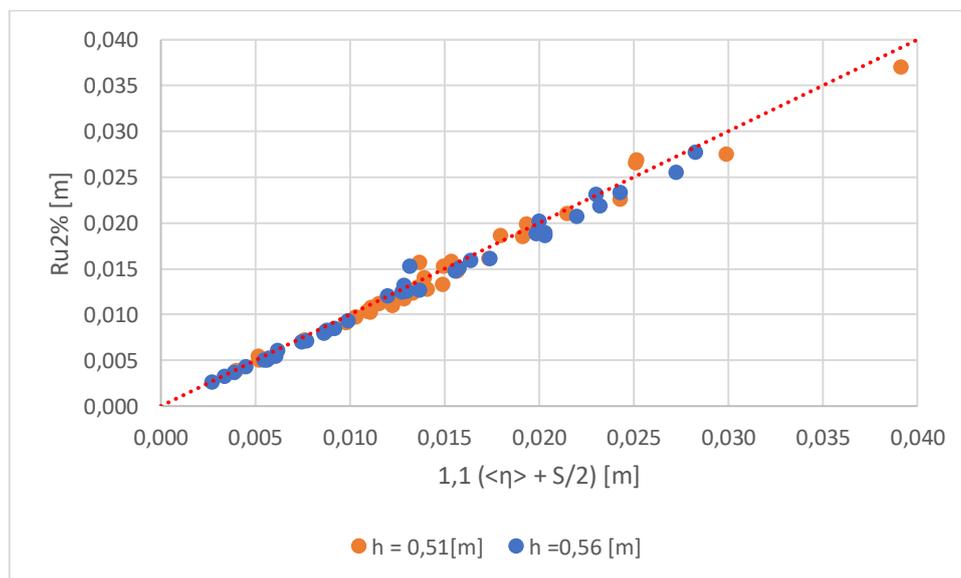


Grafico 4.3.1. – Correlazione del $Ru2\%$ ottenuto dalla serie temporale e $1,1 (\langle \eta \rangle + S/2)$ calcolato dallo spettro

I risultati del runup calcolato in entrambi i modi sono riportati nelle tabelle 4.3.3 e 4.3.4. Nel grafico 4.3.1 sono stati riportati i valori di $Ru2\%$ in ordinata e i valori di $1,1 (\langle \eta \rangle + S/2)$ sull'ascissa calcolati alle differenti profondità $h=0,51m$ e $h=0,56m$. Come si può notare dal grafico i punti si trovano molto vicini alla linea bisettrice del primo quadrante. Ciò significa che le due metodologie di calcolo permettono di ottenere risultati caratterizzati da piccoli scostamenti l'uno dall'altro. Di conseguenza, per le successive elaborazioni il runup è stato valutato solamente come $Ru2\%$, tralasciando $1,1 (\langle \eta \rangle + S/2)$.

4.3.2 Runup, swash e setup per onde regolari

Nella zona di frangimento in prossimità della battigia, una parte del moto oscillatorio delle onde incidenti è convertita, in una traslazione in avanti della

massa d'acqua. Ciò spesso comporta la formazione di un'onda con fronte verticale che avanza verso la spiaggia. Questo fenomeno è conosciuto con il termine *runup*.

Il *runup* è spesso espresso in termini di escursione verticale ed è costituito da due componenti:

- la massima elevazione del livello medio dell'acqua, $\langle \eta \rangle$, *setup*;
- le fluttuazioni attorno al valore medio, S , *swash*.

Lo *swash* è composto dallo *swash infragravitazionale* ($f < 0,05$ Hz) e dallo *swash incidente* ($f > 0,05$ Hz).

Al fine di valutare tali grandezze in funzione delle caratteristiche ondose con le formule empiriche più diffuse in letteratura (Equazione 2.7.1 e 2.7.2) sono stati presi in esame diversi periodi spettrali ($T_{100}=1,0s$, $T_{150}=1,5s$, $T_{200}=2,0s$ e $T_{250}=2,5s$). Tra questi, si riportano nelle seguenti tabelle solamente i parametri calcolati con la lunghezza e l'altezza d'onda incidente e con l'altezza d'onda trasmessa e la lunghezza d'onda associata al periodo T_{m-20} .

Onde Regolari							
h = 0,51 [m]							
Nome	H [m]	T [s]	Ru2% [m]	$\beta v(Hm_{ot}\cdot L-20)$ [m]	$\beta v(Hi\cdot L)$ [m]	Sinc [m]	SIG [m]
H2_T100	0,02	1,00	0,0039	0,010836631	0,007790438	0,0013	0,0001
H2_T150	0,02	1,50	0,0072	0,012611152	0,011314083	0,0015	0,0002
H2_T200	0,02	2,00	0,0091	0,012394897	0,012798046	0,0036	0,0002
H2_T250	0,02	2,50	0,0110	0,012273881	0,014425378	0,0111	0,0006
H3_T100	0,03	1,00	0,0050	0,011554221	0,009653811	0,0011	0,0004
H3_T150	0,03	1,50	0,0102	0,015895502	0,013891647	0,0022	0,0005
H3_T200	0,03	2,00	0,0117	0,01466957	0,015731061	0,0047	0,0003
H3_T250	0,03	2,50	0,0128	0,014779343	0,0179707	0,0071	0,0006
H4_T100	0,04	1,00	0,0055	0,013974806	0,011118757	0,0012	0,0007
H4_T150	0,04	1,50	0,0123	0,018548749	0,016036866	0,0021	0,0020
H4_T200	0,04	2,00	0,0125	0,018202112	0,018188041	0,0029	0,0008
H4_T250	0,04	2,50	0,0132	0,016862632	0,021086446	0,0100	0,0019
H5_T100	0,05	1,00	0,0082	0,015208316	0,012310739	0,0014	0,0005
H5_T150	0,05	1,50	0,0104	0,017250336	0,017921343	0,0023	0,0021
H5_T200	0,05	2,00	0,0103	0,017536894	0,020498767	0,0035	0,0012
H5_T250	0,05	2,50	0,0161	0,020297849	0,023426207	0,0110	0,0026
H6_T100	0,06	1,00	0,0112	0,016460074	0,013310697	0,0023	0,0017
H6_T150	0,06	1,50	0,0116	0,016730616	0,019564267	0,0020	0,0027
H6_T200	0,06	2,00	0,0114	0,020529092	0,022389899	0,0035	0,0008
H6_T250	0,06	2,50	0,0185	0,022033102	0,025706148	0,0114	0,0034
H8_T100	0,08	1,00	0,0097	0,017941323	0,015396511	0,0018	0,0017
H8_T150	0,08	1,50	0,0140	0,024660962	0,022478487	0,0023	0,0031
H8_T200	0,08	2,00	0,0156	0,02638006	0,026137294	0,0035	0,0019
H8_T250	0,08	2,50	0,0210	0,027288581	0,030058521	0,0098	0,0031
H10_T100	0,10	1,00	0,0108	0,022627803	0,017389382	0,0019	0,0017
H10_T150	0,10	1,50	0,0158	0,026944856	0,0253182	0,0023	0,0021
H10_T200	0,10	2,00	0,0153	0,032725078	0,02918031	0,0040	0,0014
H10_T250	0,10	2,50	0,0226	0,029500339	0,034399189	0,0068	0,0024
H12_T100	0,12	1,00	0,0129	0,026933317	0,018898209	0,0037	0,0026
H12_T150	0,12	1,50	0,0199	0,030642142	0,027770965	0,0031	0,0039
H12_T200	0,12	2,00	0,0186	0,041363858	0,03167319	0,0033	0,0026
H12_T250	0,12	2,50	0,0275	0,036255436	0,037620741	0,0058	0,0023
H15_T100	0,15	1,00	0,0147	0,032224896	0,021184895	0,0045	0,0022
H15_T150	0,15	1,50	0,0266	0,041414444	0,030768164	0,0037	0,0053
H15_T200	0,15	2,00	0,0269	0,050008297	0,035281827	0,0063	0,0035
H15_T250	0,15	2,50	0,0371	0,050173172	0,042493119	0,0042	0,0043

Tab. 4.3.5 – Correlazioni tra runup, swash e setup con le altezze e le lunghezze d'onda per $h=0,51m$
per le onde regolari

Onde Regolari							
h = 0,56 [m]							
Nome	H [m]	T [s]	Ru2% [m]	$\beta v(H_{m0t}-L-20)$ [m]	$\beta v(H_i-L)$ [m]	S _{inc} [m]	S _{IG} [m]
H2_T100	0,02	1,00	0,0026	0,011810161	0,007900848	0,0006	0,0001
H2_T150	0,02	1,50	0,0036	0,01296685	0,01110479	0,0006	0,0003
H2_T200	0,02	2,00	0,0033	0,013940528	0,01348974	0,0008	0,0001
H2_T250	0,02	2,50	0,0050	0,015263605	0,014381006	0,0032	0,0001
H3_T100	0,03	1,00	0,0043	0,011128969	0,009715685	0,0005	0,0002
H3_T150	0,03	1,50	0,0053	0,016938071	0,013497278	0,0008	0,0002
H3_T200	0,03	2,00	0,0050	0,016074756	0,016549053	0,0008	0,0001
H3_T250	0,03	2,50	0,0054	0,018425587	0,017792224	0,0020	0,0001
H4_T100	0,04	1,00	0,0060	0,012947392	0,011092804	0,0006	0,0003
H4_T150	0,04	1,50	0,0071	0,020771998	0,015628141	0,0008	0,0002
H4_T200	0,04	2,00	0,0083	0,019014068	0,019132315	0,0009	0,0002
H4_T250	0,04	2,50	0,0079	0,020894096	0,020680623	0,0023	0,0003
H5_T100	0,05	1,00	0,0070	0,014674692	0,012413249	0,0005	0,0003
H5_T150	0,05	1,50	0,0093	0,021167563	0,017706639	0,0009	0,0002
H5_T200	0,05	2,00	0,0125	0,0199632	0,02137993	0,0016	0,0006
H5_T250	0,05	2,50	0,0152	0,021909527	0,023288067	0,0016	0,0012
H6_T100	0,06	1,00	0,0084	0,018627004	0,013560586	0,0005	0,0004
H6_T150	0,06	1,50	0,0127	0,023212155	0,01915877	0,0013	0,0004
H6_T200	0,06	2,00	0,0159	0,022708992	0,023481143	0,0026	0,0020
H6_T250	0,06	2,50	0,0202	0,023177857	0,025638093	0,0036	0,0021
H8_T100	0,08	1,00	0,0125	0,022518897	0,015549699	0,0017	0,0011
H8_T150	0,08	1,50	0,0188	0,031224848	0,022219144	0,0015	0,0014
H8_T200	0,08	2,00	0,0161	0,019706109	0,026951628	0,0024	0,0015
H8_T250	0,08	2,50	0,0147	0,024487631	0,029784793	0,0019	0,0012
H10_T100	0,10	1,00	0,0151	0,023638852	0,017271104	0,0030	0,0020
H10_T150	0,10	1,50	0,0189	0,025293833	0,024875989	0,0016	0,0016
H10_T200	0,10	2,00	0,0192	0,023173443	0,030553726	0,0031	0,0017
H10_T250	0,10	2,50	0,0187	0,035857161	0,033586112	0,0025	0,0019
H12_T100	0,12	1,00	0,0132	0,020089824	0,018980398	0,0024	0,0021
H12_T150	0,12	1,50	0,0207	0,026138344	0,027237742	0,0020	0,0026
H12_T200	0,12	2,00	0,0231	0,028161044	0,033361859	0,0028	0,0018
H12_T250	0,12	2,50	0,0219	0,036618513	0,036849433	0,0017	0,0016
H15_T100	0,15	1,00	0,0121	0,022195358	0,021139253	0,0027	0,0018
H15_T150	0,15	1,50	0,0234	0,035539674	0,030378343	0,0031	0,0049
H15_T200	0,15	2,00	0,0277	0,036015452	0,037262143	0,0036	0,0034
H15_T250	0,15	2,50	0,0255	0,0464081	0,041037088	0,0030	0,0026

Tab. 4.3.6 – Correlazioni tra *runup*, *swash* e *setup* con le altezze e le lunghezze d'onda per $h=0,56m$ per le onde regolari

Dalle analisi effettuate si è riscontrato un maggiore accordo con i dati sperimentali con il calcolo del parametro in funzione della lunghezza d'onda calcolata in corrispondenza della pala e l'altezza d'onda incidente.

Se invece si utilizzasse l'altezza d'onda trasmessa H_{m0t} , non si terrebbe conto che le onde con altezza d'onda più alte frangono in corrispondenza della struttura. Tale frangimento comporterebbe un innalzamento del livello medio dietro la struttura e, di conseguenza, un *runup* maggiore.

Nel grafico 4.3.2, in funzione dei parametri dell'onda trasmessa si nota che $R^2 = 0,759$ e mentre nel grafico 4.3.3 in funzione delle caratteristiche dell'onda incidente si ottiene un $R^2 = 0,830$.

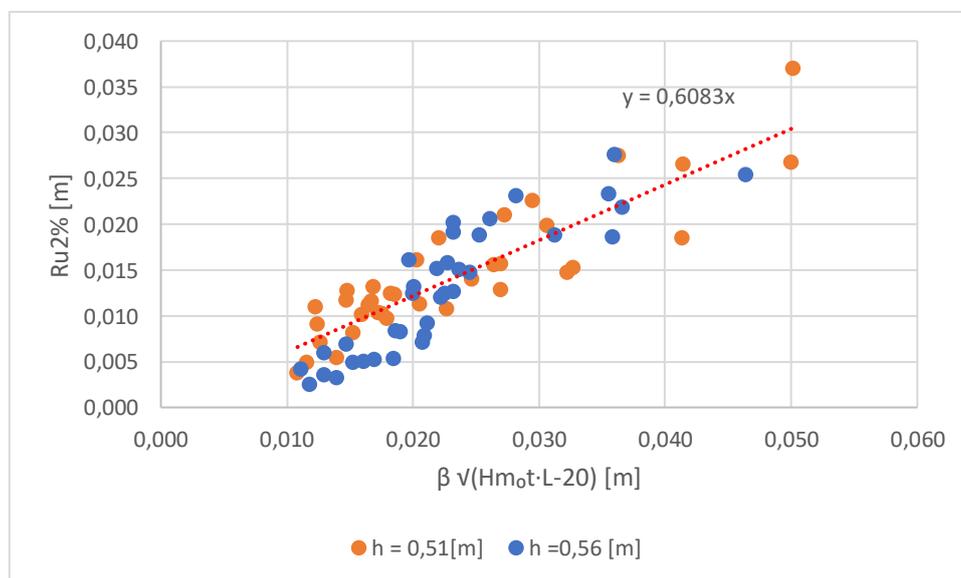


Grafico 4.3.2 – Correlazione del $Ru2\%$ e $\beta \sqrt{(H_{m0t} \cdot L - 20)}$ delle onde regolari

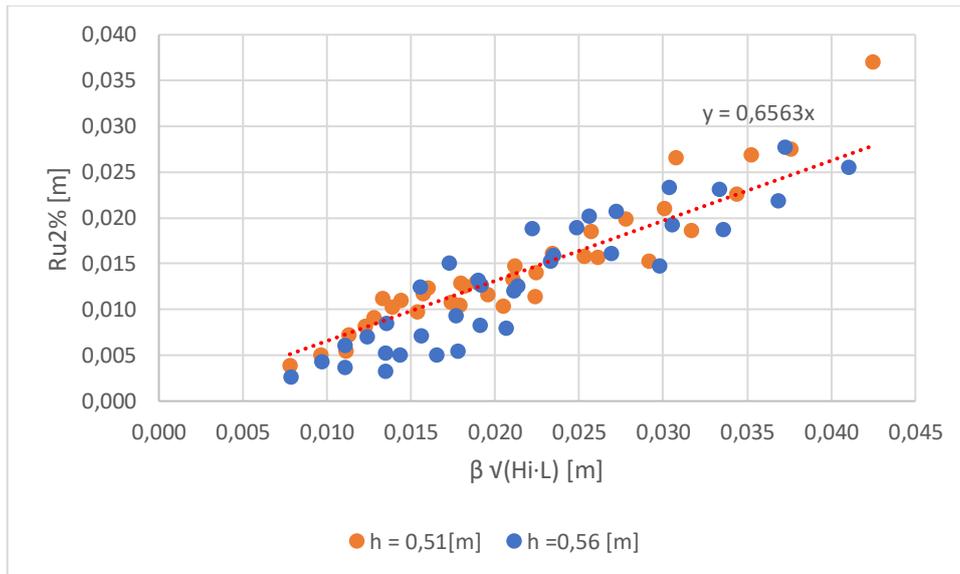


Grafico 4.3.3 – Correlazione del $Ru2\%$ e $\beta \sqrt{Hi \cdot L}$

Nelle seguenti analisi si sono quindi studiate le principali caratteristiche spettrali del *runup* (*swash* e *setup*) in funzione di tale parametro. In particolare, per ogni coppia di dati è stata effettuata una regressione lineare con intercetta fissata a zero. Lo *swash incidente* non mostra una buona correlazione per le onde monocromatiche in funzione dell'altezza d'onda incidente, come si può anche notare dal grafico 4.3.4 $R^2 = 0,108$. In particolare, i valori più dispersi si osservano soprattutto nel caso col tirante minore che risulta associato a valori mediamente più alti di S .

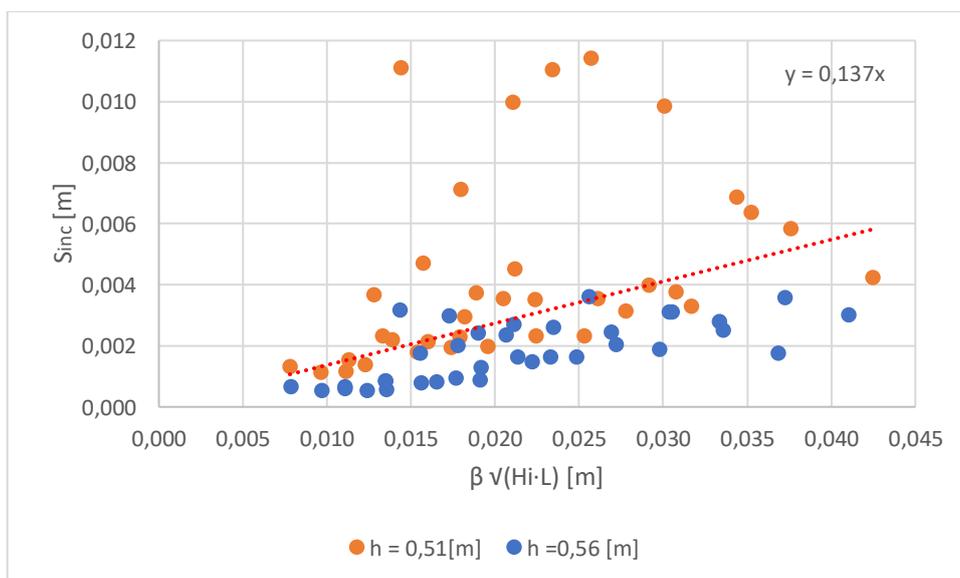


Grafico 4.3.4 – Correlazione del *swash* incidente e $\beta \sqrt{Hi \cdot L}$

Lo *swash infragravitazionale* mostra una correlazione leggermente migliore col parametro dell'altezza d'onda incidente, come si può notare anche dal grafico 4.3.5, dove $R^2 = 0,462$. Anche in questo caso, i valori di S_{IG} maggiori sono ottenuti per i test realizzati con il tirante più basso. Sebbene l'adattamento non sia buono si nota un trend crescente in funzione del parametro scelto; onde più lunghe e più alte sono quindi associate a valori maggiori di S_{IG} . La notevole differenza tra i due diversi tiranti utilizzati è spiegata dall'effetto della struttura sommersa la cui sommergenza passa da $-0,10\text{ m}$ a $-0,15\text{ m}$. Con una sommergenza minore, le onde sono maggiormente spinte verso condizioni di frangimento in corrispondenza della struttura. Questo effetto, se da una parte induce una riduzione dell'altezza d'onda trasmessa, dall'altra porta ad un aumento del livello medio oltre l'opera per effetto del fenomeno di piling-up e al conseguente aumento del runup sulla spiaggia retrostante.

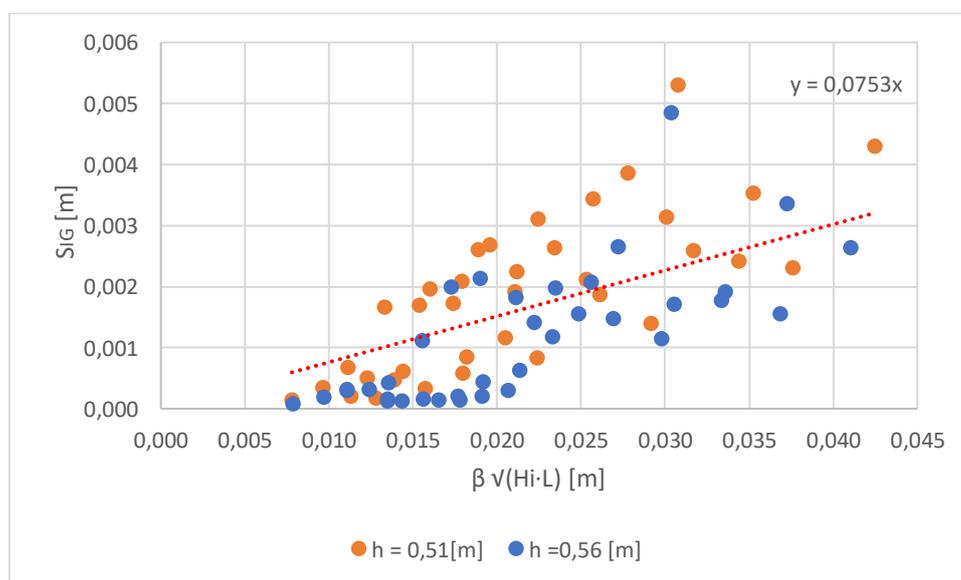


Grafico 4.3.5 – Correlazione del swash infragravitazionale e $\beta \sqrt{H_i-L}$

Il *setup* risulta correlarsi meglio dello *swash incidente* e dello *swash infragravitazionale* con l'altezza d'onda incidente e la lunghezza d'onda al generatore ondoso, come si nota dal grafico 4.3.6, dove $R^2 = 0,807$. Tali valori di *setup* risultano essere di circa un ordine di grandezza maggiori rispetto a quelli dello *swash*. Questo è un risultato atteso in quanto nel caso di onde regolari che frangono su spiagge a debole pendenza lo *swash* è praticamente trascurabile (Kobayashi et al., 1989).

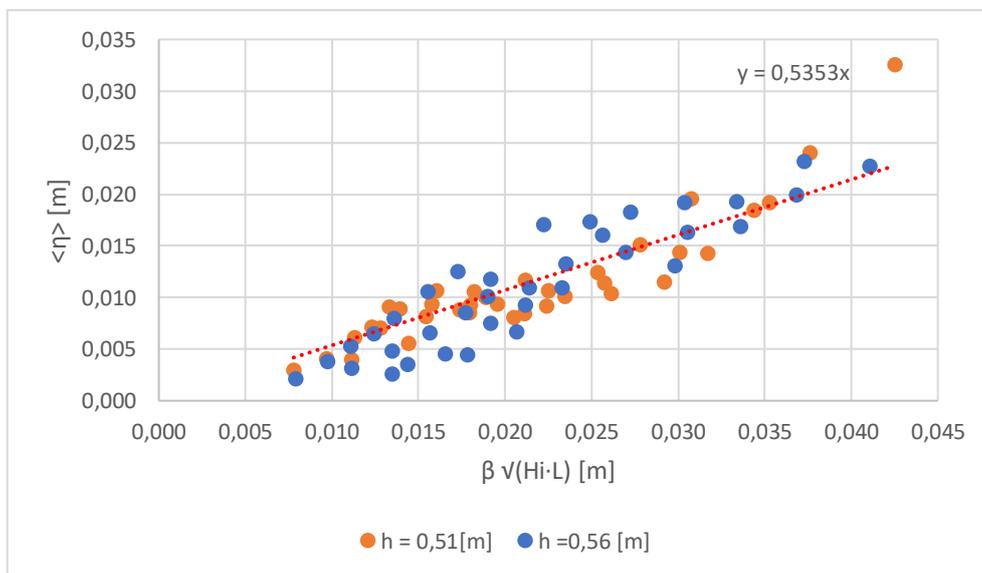


Grafico 4.3.6 – Correlazione del $\langle \eta \rangle$ e $\beta \sqrt{H_i L}$ delle onde regolari

Il *runup* sulle onde regolari è quasi interamente dovuto al contributo del *setup*, come si nota anche nel grafico 4.3.7. Per spiagge a debole pendenza, il *setup* diventa predominante rispetto all'azione dello *swash*. In altre parole, quasi tutta l'energia delle onde incidenti è dissipata per il frangimento delle onde stesse sulla barra sommersa. La differenza tra i valori e la linea bisettrice rappresenta lo *swash*.

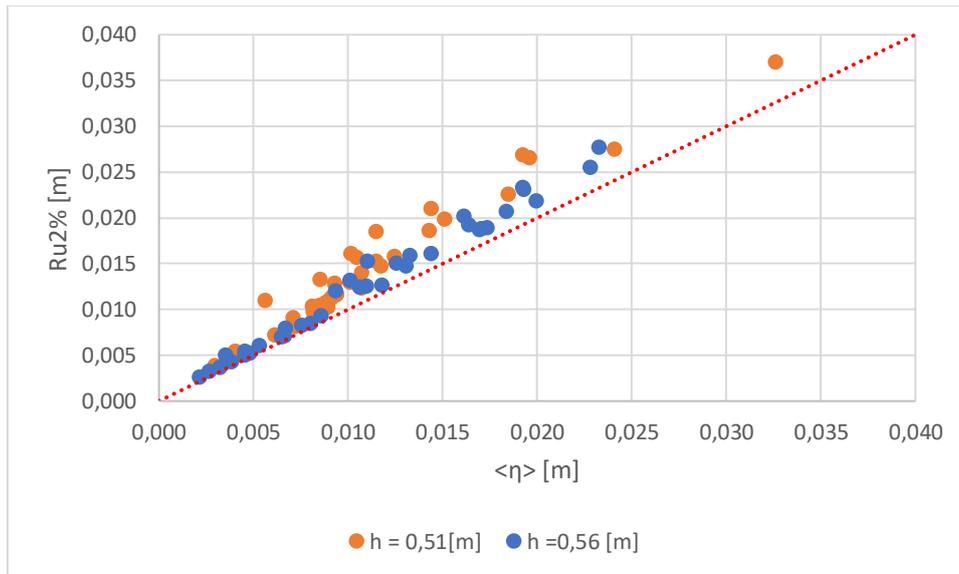


Grafico 4.3.7 – Correlazione del Ru2% e $\langle \eta \rangle$ delle onde regolari

4.4 Determinazione delle altezze d'onda trasmesse e le lunghezze per le onde irregolari

Nell'analisi delle onde irregolari sono state studiate diverse combinazioni di altezza e periodo d'onda al fine di determinare quale di queste fosse più idonea a rappresentare il *runup*. Tra queste è stata valutata l'altezza d'onda sia come incidente alla struttura (H_i) che trasmessa (H_{m0t}) e valutata a partire dalle sue caratteristiche spettrali.

Per le lunghezze d'onda si è valutato la lunghezza d'onda alla pala calcolata col periodo di picco (L), e le lunghezze d'onda derivanti dall'analisi spettrale L_{-10} (4.4.1) e L_{-20} (4.4.2) che amplificano il contributo associato alle basse frequenze.

$$L_{-10} = \frac{gT_{m-01}}{2\pi} \tanh kh \quad (4.4.1)$$

$$L_{-20} = \frac{gT_{m-02}}{2\pi} \tanh kh \quad (4.4.2)$$

La determinazione di tali parametri mediante analisi spettrale è stata effettuata attraverso un codice di calcolo sviluppato in ambiente MATLAB. Di seguito sono riportate le tabelle con i valori ottenuti.

Onde Irregolari								
h = 0,51 [m]								
Nome	Hs [m]	Tp [s]	Hm_{ot} [m]	Hm_o 0,5 [m]	Hi [m]	L [m]	L-10 [m]	L-20 [m]
H3_T200	0,03	2,00	0,0236	0,0023	0,0204	3,520	2,287	3,934
H3_T250	0,03	2,50	0,0234	0,0022	0,0200	4,957	2,424	5,245
H4_T150	0,04	1,50	0,0271	0,0034	0,0248	2,635	2,292	4,428
H4_T100	0,05	1,00	0,0313	0,0045	0,0200	1,312	1,638	3,523
H5_T200	0,05	2,00	0,0334	0,0040	0,0343	3,535	2,401	8,877
H5_T250	0,05	2,50	0,0335	0,0042	0,0339	4,985	2,707	9,940
H6_T150	0,06	1,50	0,0349	0,0050	0,0373	2,660	2,369	8,199
H8_T100	0,08	1,00	0,0390	0,0072	0,0324	1,381	1,924	6,704
H8_T200	0,08	2,00	0,0391	0,0073	0,0553	3,591	4,137	19,731
H8_T250	0,08	2,50	0,0390	0,0084	0,0553	5,004	5,441	23,068
H10_T150	0,10	1,50	0,0415	0,0081	0,0631	2,691	4,010	19,202
H12_T100	0,12	1,00	0,0423	0,0094	0,0505	1,482	2,684	12,554

Tab 4.4.1 – Altezza d'onda trasmessa per barra sommersa per onde irregolari

Onde Irregolari								
h = 0,56 [m]								
Nome	Hs [m]	Tp [s]	Hm_{ot} [m]	Hm_o 0,5 [m]	Hi [m]	L [m]	L-10 [m]	L-20 [m]
H3_T200	0,03	2,00	0,0210	0,0017	0,0209	3,668	3,077	4,170
H3_T250	0,03	2,50	0,0206	0,0018	0,0206	5,103	3,764	5,185
H4_T150	0,04	1,50	0,0268	0,0028	0,0255	2,720	2,803	3,983
H4_T100	0,05	1,00	0,0337	0,0034	0,0212	1,306	1,534	2,821
H5_T200	0,05	2,00	0,0374	0,0041	0,0353	3,704	2,852	4,603
H5_T250	0,05	2,50	0,0381	0,0040	0,0350	5,142	3,090	5,407
H6_T150	0,06	1,50	0,0400	0,0055	0,0383	2,730	2,867	4,591
H8_T100	0,08	1,00	0,0494	0,0067	0,0345	1,363	1,762	3,359
H8_T200	0,08	2,00	0,0529	0,0072	0,0573	3,697	3,010	8,285
H8_T250	0,08	2,50	0,0534	0,0074	0,0570	5,152	3,260	9,578
H10_T150	0,10	1,50	0,0566	0,0093	0,0645	2,716	3,000	8,752
H12_T100	0,12	1,00	0,0599	0,0097	0,0528	1,482	2,031	5,233

Tab 4.4.2 – Altezze d'onda trasmesse per barra sommersa per onde irregolari

4.4.1 Determinazione del runup per le onde irregolari

Come descritto anche per le onde regolari per la determinazione del *runup*, ovvero l'entità della risalita ondosa sulla spiaggia, sono state utilizzate due metodologie. La prima metodologia è rappresentata da *Ru2%*, ovvero, che il valore di *runup* è superato dal 2% delle onde in arrivo sulla spiaggia. Invece la seconda metodologia rappresenta il *runup* calcolato direttamente dallo spettro ed è stato stimato come nella 2.6.3.

Onde Irregolari				
h = 0,51 [m]				
Nome	Hs [m]	Tp [s]	Ru2% [m]	1,1 (<η> + S/2) [m]
H3_T200	0,03	2,00	0,0138	0,0130
H3_T250	0,03	2,50	0,0157	0,0144
H4_T150	0,04	1,50	0,0149	0,0138
H4_T100	0,05	1,00	0,0178	0,0157
H5_T200	0,05	2,00	0,0213	0,0182
H5_T250	0,05	2,50	0,0243	0,0209
H6_T150	0,06	1,50	0,0202	0,0183
H8_T100	0,08	1,00	0,0274	0,0205
H8_T200	0,08	2,00	0,0280	0,0240
H8_T250	0,08	2,50	0,0352	0,0313
H10_T150	0,10	1,50	0,0298	0,0259
H12_T100	0,12	1,00	0,0298	0,0265

Tab. 4.4.3 – *Runup 2% e Runup calcolato dallo spettro*

Onde Irregolari				
h = 0,56 [m]				
Nome	Hs [m]	Tp [s]	Ru2% [m]	1,1 (<η> + S/2) [m]
H3_T200	0,03	2,00	0,0097	0,0088
H3_T250	0,03	2,50	0,0117	0,0105
H4_T150	0,04	1,50	0,0103	0,0097
H4_T100	0,05	1,00	0,0146	0,0115
H5_T200	0,05	2,00	0,0231	0,0180
H5_T250	0,05	2,50	0,0233	0,0211
H6_T150	0,06	1,50	0,0176	0,0156
H8_T100	0,08	1,00	0,0251	0,0202
H8_T200	0,08	2,00	0,0277	0,0277
H8_T250	0,08	2,50	0,0302	0,0306
H10_T150	0,10	1,50	0,0242	0,0245
H12_T100	0,12	1,00	0,0259	0,0257

Tab. 4.4.4 – *Runup 2% e Runup calcolato dallo spettro*

Onde Irregolari						
h = 0,51 [m]						
Nome	Hs [m]	Tp [s]	Ru2% [m]	Sinc [m]	SIG [m]	<η> [m]
H3_T200	0,03	2,00	0,0138	0,0108	0,0047	0,0059
H3_T250	0,03	2,50	0,0157	0,0128	0,0056	0,0061
H4_T150	0,04	1,50	0,0149	0,0107	0,0050	0,0067
H4_T100	0,05	1,00	0,0178	0,0154	0,0050	0,0061
H5_T200	0,05	2,00	0,0213	0,0144	0,0055	0,0088
H5_T250	0,05	2,50	0,0243	0,0165	0,0085	0,0097
H6_T150	0,06	1,50	0,0202	0,0138	0,0058	0,0091
H8_T100	0,08	1,00	0,0274	0,0182	0,0051	0,0092
H8_T200	0,08	2,00	0,0280	0,0194	0,0086	0,0113
H8_T250	0,08	2,50	0,0352	0,0240	0,0175	0,0136
H10_T150	0,10	1,50	0,0298	0,0200	0,0102	0,0124
H12_T100	0,12	1,00	0,0298	0,0224	0,0081	0,0122

Tab. 4.4.5 – Correlazioni tra runup, swash e setup con le altezze e le lunghezze d'onda per $h=0,51m$

Onde Irregolari						
h = 0,56 [m]						
Nome	Hs [m]	Tp [s]	Ru2% [m]	Sinc [m]	SIG [m]	<η> [m]
H3_T200	0,03	2,00	0,0097	0,0061	0,0038	0,0044
H3_T250	0,03	2,50	0,0117	0,0068	0,0049	0,0054
H4_T150	0,04	1,50	0,0103	0,0065	0,0035	0,0051
H4_T100	0,05	1,00	0,0146	0,0094	0,0040	0,0053
H5_T200	0,05	2,00	0,0231	0,0128	0,0077	0,0089
H5_T250	0,05	2,50	0,0233	0,0143	0,0101	0,0104
H6_T150	0,06	1,50	0,0176	0,0103	0,0060	0,0082
H8_T100	0,08	1,00	0,0251	0,0168	0,0069	0,0093
H8_T200	0,08	2,00	0,0277	0,0196	0,0107	0,0140
H8_T250	0,08	2,50	0,0302	0,0190	0,0139	0,0160
H10_T150	0,10	1,50	0,0242	0,0167	0,0123	0,0119
H12_T100	0,12	1,00	0,0259	0,0191	0,0098	0,0126

Tab. 4.4.6 – Correlazioni tra runup, swash e setup con le altezze e le lunghezze d'onda per $h=0,56m$

Nel grafico 4.4.1 sono stati riportati i valori di $Ru2\%$ in ordinata e i valori di $1,1(<\eta> + S/2)$ sull'ascissa calcolati alle differenti profondità $h=0,51m$ e $h=0,56m$. Come si può notare dal grafico i punti si trovano molto vicini alla linea bisettrice del primo quadrante. Ciò significa che le due metodologie di calcolo permettono di ottenere risultati caratterizzati da piccoli scostamenti l'uno dall'altro.

Si è deciso di proseguire per le successive elaborazioni solamente con $Ru2\%$ e tralasciando $1,1 (\langle \eta \rangle + S/2)$ anche perché mostra valori leggermente superiori, risultando quindi in un vantaggio ai fini di sicurezza.

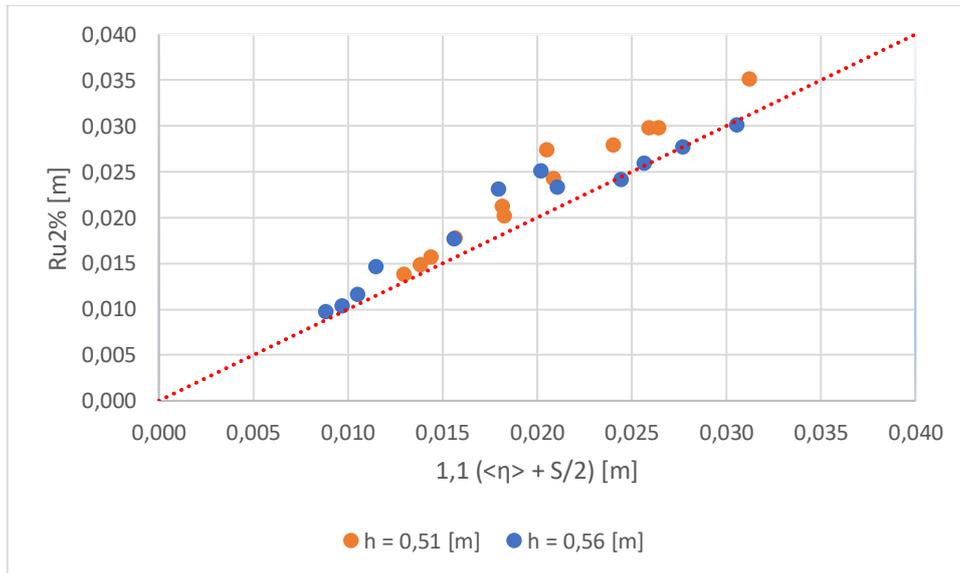


Grafico 4.4.1 – Correlazione del $Ru2\%$ e $1,1 (\langle \eta \rangle + S/2)$ calcolato dallo spettro delle onde irregolari

4.4.2 Runup, swash e setup per onde irregolari

Come per le *onde regolari*, anche per le *onde irregolari* si sono valutati i parametri dell'altezza d'onda incidente (H_{m_0sI}) e trasmessa (H_{m_0t}), le lunghezze d'onda derivante dall'analisi spettrale (L_{-10} e L_{-20}) e la lunghezza d'onda alla pala (L).

Se il *runup* è correlato con le caratteristiche dell'onda incidente (H_{m_0sI}) e la lunghezza d'onda alla pala (L), i valori sono dispersi, come si nota dal grafico 4.4.2 si ha un $R^2 = 0,215$.

Si è riscontrato invece un maggiore accordo con i dati sperimentali con il calcolo del parametro in funzione delle lunghezze d'onda derivante dall'analisi spettrale (L_{-10} e L_{-20}) con l'altezza d'onda trasmessa H_{m_0t} , dove per L_{-20} si ha un $R^2 = 0,675$ (figura 4.4.4) e per L_{-10} (figura 4.4.3) si ha un $R^2 = 0,621$.

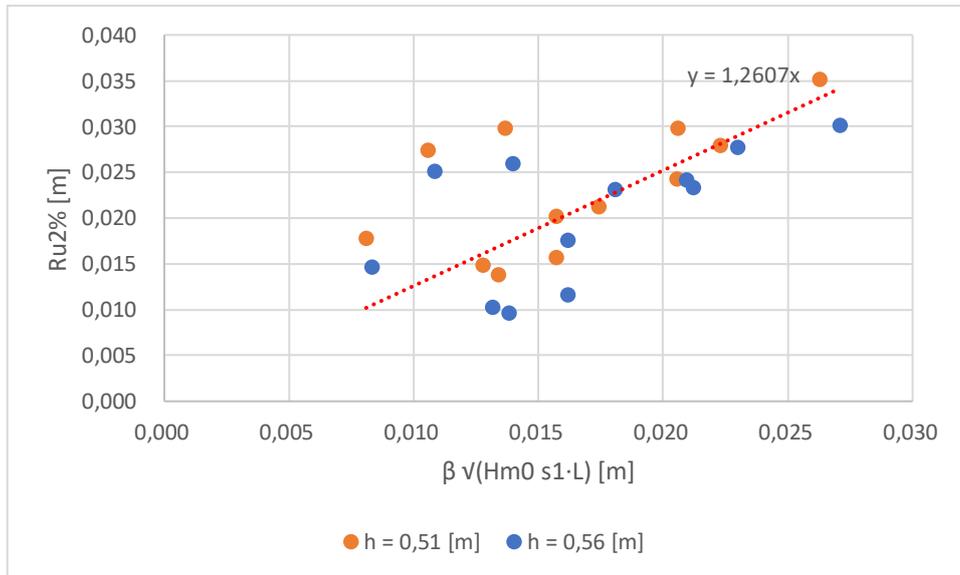


Grafico 4.4.2 – Correlazione dello swash incidente e $\beta \sqrt{Hm_0 s1-L}$ per le onde irregolari

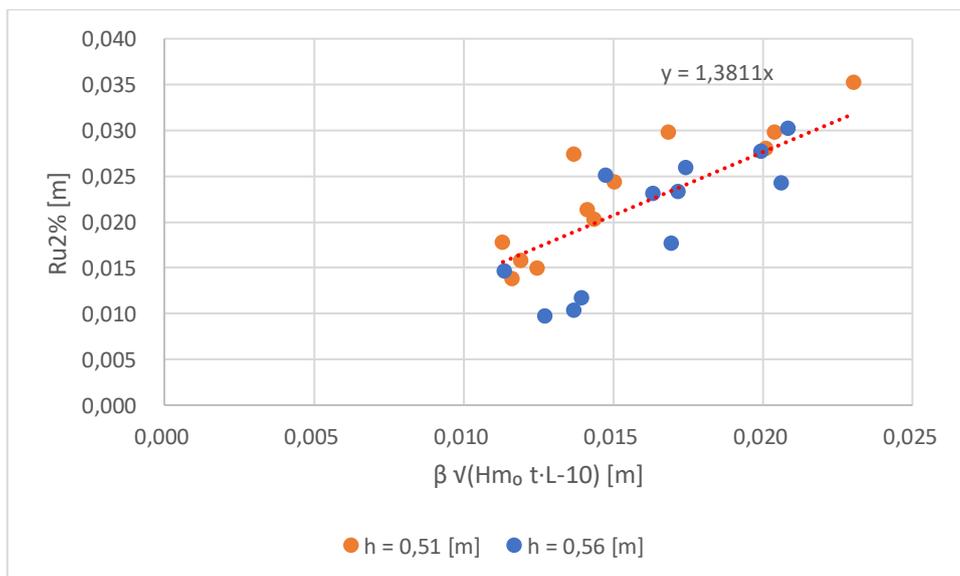


Grafico 4.4.3 – Correlazione del $Ru2\%$ e $\beta \sqrt{Hm_0 t-L-10}$ per le onde irregolari

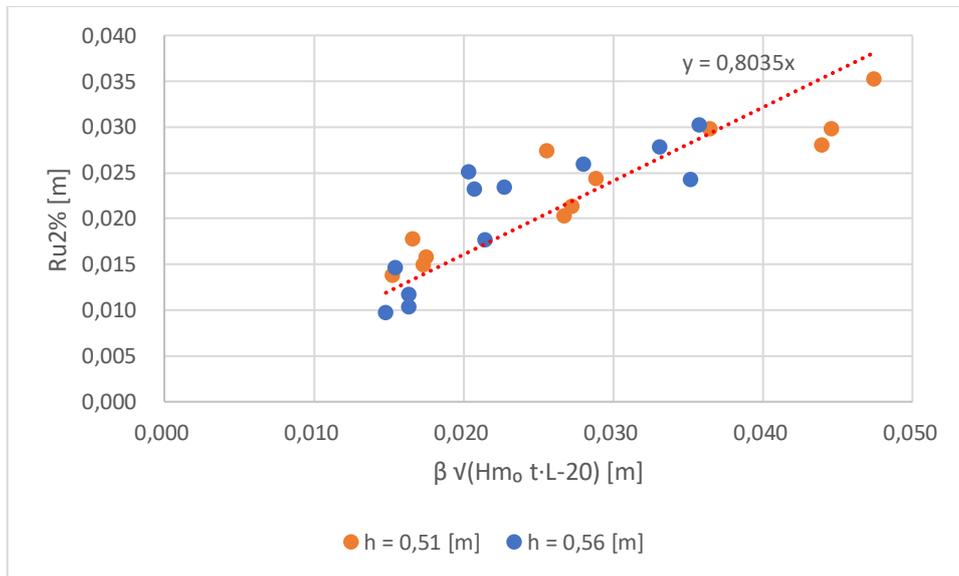


Grafico 4.4.4 – Correlazione del $Ru2\%$ e $\beta \sqrt{Hm_0 \cdot t \cdot L-20}$ per le onde irregolari

Lo *swash* è calcolato con l’ausilio del software MATLAB, come l’area dello spettro dello *swash incidente* per le frequenze maggiori di $0,05 \text{ Hz}$, al fine di correlare le misure della sonda del *runup* con quelle effettuate dalla sonda *n.15*, che corrispondono all’onda trasmessa.

Anche in questo caso, come per il caso delle onde regolari, lo *swash incidente* non risulta correlato al parametro associato alla lunghezza d’onda $L-10$. Come si dimostra anche dal grafico 4.4.5 dove $R^2 = 0,489$.

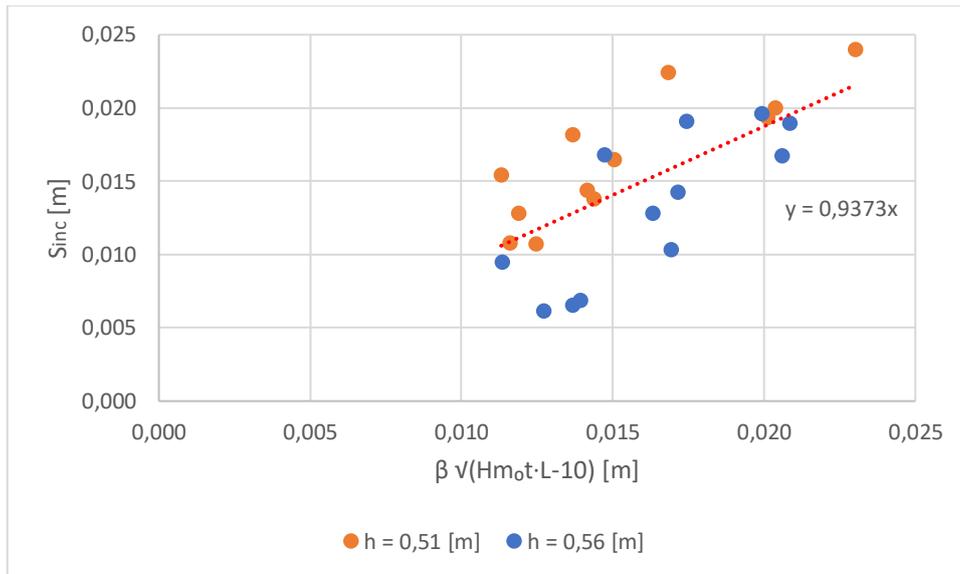


Grafico 4.4.5 – Correlazione dello swash incidente e $\beta \sqrt{H_{m0}t \cdot L-10}$ per le onde irregolare

Lo *swash incidente* si correla meglio con $L-20$, ovvero il periodo che amplifica maggiormente il contributo alle basse frequenze e avendo il quadrato lo amplifica ancor di più. Come si dimostra anche dal grafico 4.4.6 dove $R^2 = 0,638$.

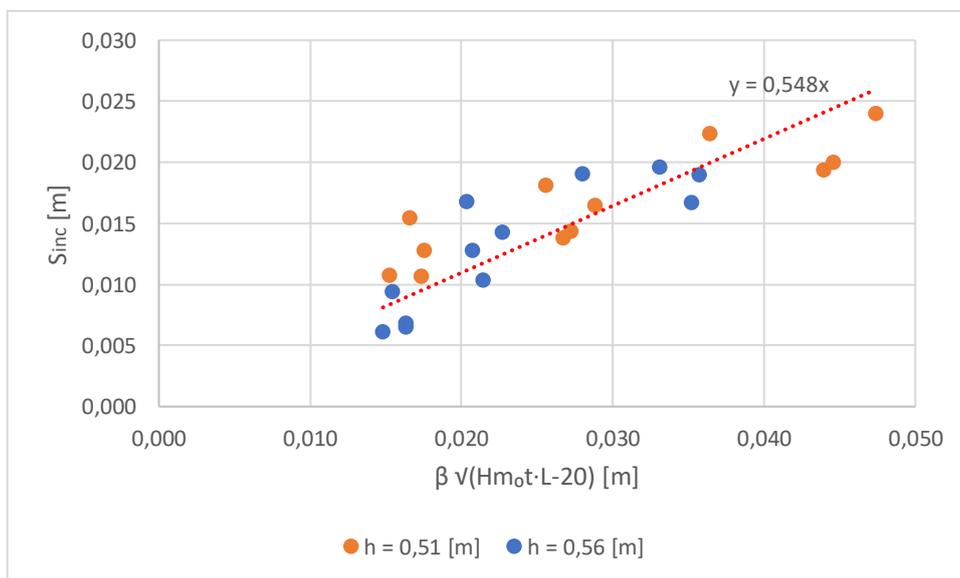


Grafico 4.4.6 – Correlazione dello swash incidente e $\beta \sqrt{H_{m0}t \cdot L-20}$ per le onde irregolari

Lo *swash infragravitazionale* mostra una correlazione leggermente migliore con il parametro della lunghezza d'onda derivante dall'analisi spettrale $L-20$, come si può notare anche dal grafico 4.4.8, dove $R^2 = 0,650$, rispetto alla lunghezza d'onda $L-10$, dove $R^2 = 0,643$ (grafico 4.4.7).

Si ha una miglior correlazione con $L-20$ dato che questa lunghezza d'onda amplifica ancora di più il contributo alle basse frequenze rispetto a $L-10$.

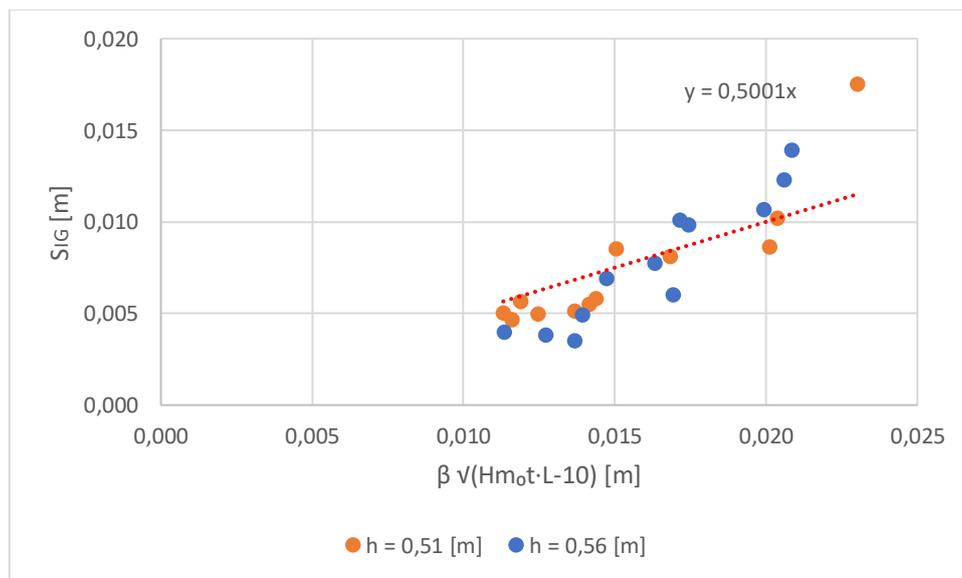


Grafico 4.4.7 – Correlazione dello swash infragravitazionale e $\beta \sqrt{Hm_0 \cdot L-10}$ per le onde irregolari

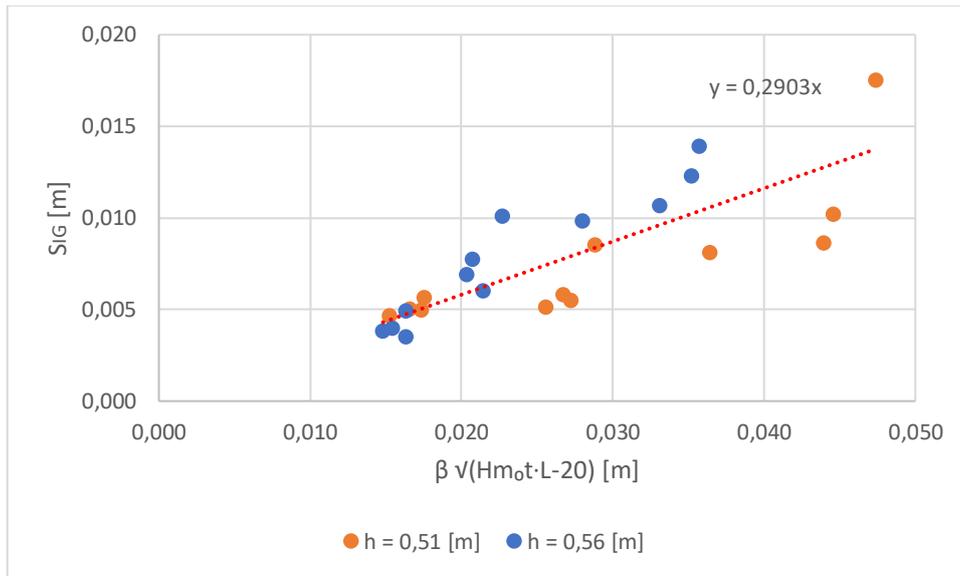


Grafico 4.4.8 – Correlazione dello swash infragravitazionale e $\beta \sqrt{Hm_0 t - L - 20}$ per le onde irregolari

Il *setup* risulta correlarsi meglio dello *swash incidente* e dello *swash infragravitazionale* per la lunghezza d'onda derivante dall'analisi spettrale L_{-10} come si nota anche nel grafico 4.4.9 dove $R^2 = 0,719$. Cambia per la lunghezza d'onda L_{-20} dove si la stessa correlazione dello *swash incidente* e *swash infragravitazionale*, come si dimostra anche dal grafico 4.4.10 dove $R^2 = 0,666$.

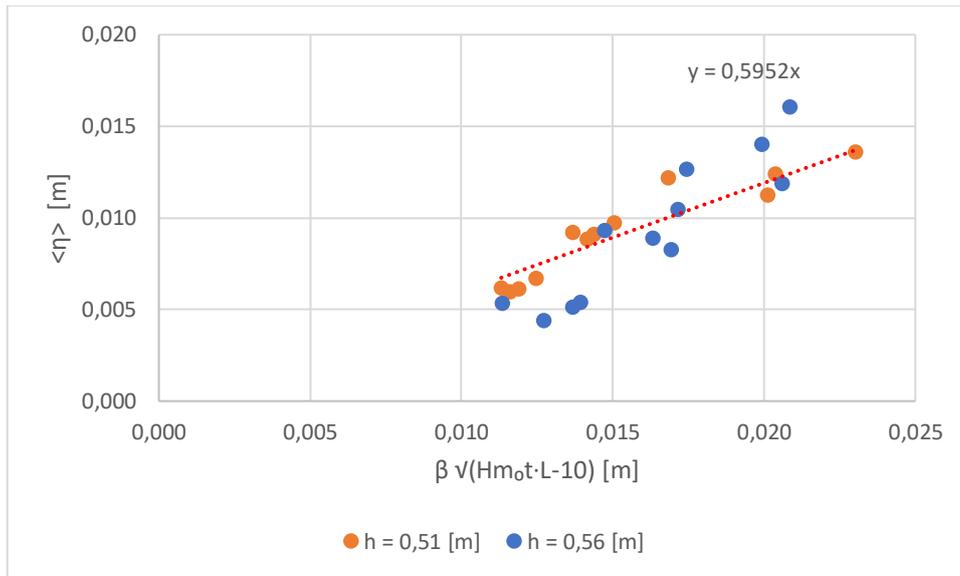


Grafico 4.4.9 – Correlazione del setup e $\beta \sqrt{(H_{m0t} \cdot L-10)}$ per le onde irregolari

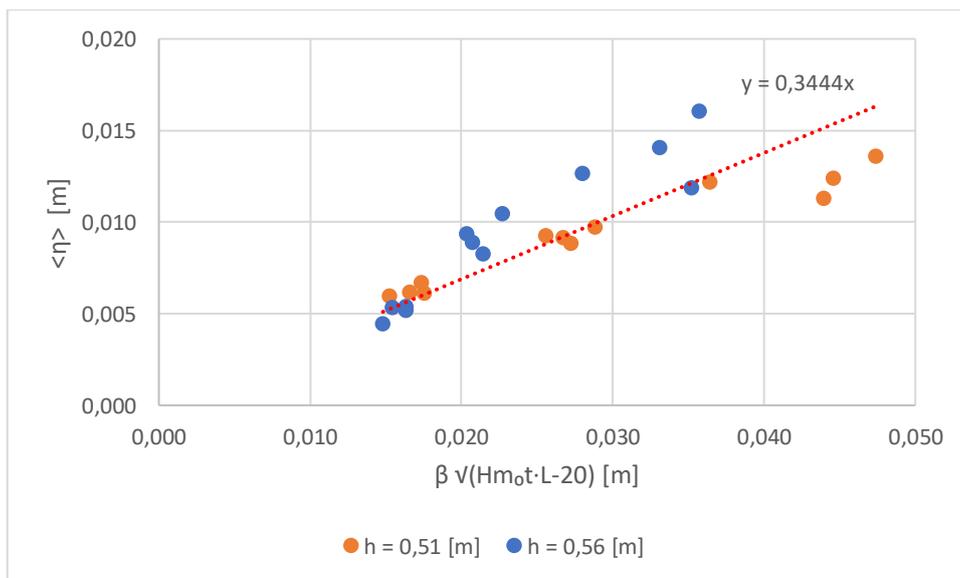


Grafico 4.4.10 – Correlazione del setup e $\beta \sqrt{(H_{m0t} \cdot L-20)}$ per le onde irregolari

Infine, si è correlato il *runup* con le caratteristiche dell'onda con frequenza minori di 0,5 la frequenza di picco (f_p) per le lunghezze d'onda $L-10$ e $L-20$. Come si dimostra anche dal grafico 4.4.11, dove $R^2 = 0,741$ e dal grafico 4.4.12, dove $R^2 = 0,328$, la miglior correlazione avviene con $L-20$.

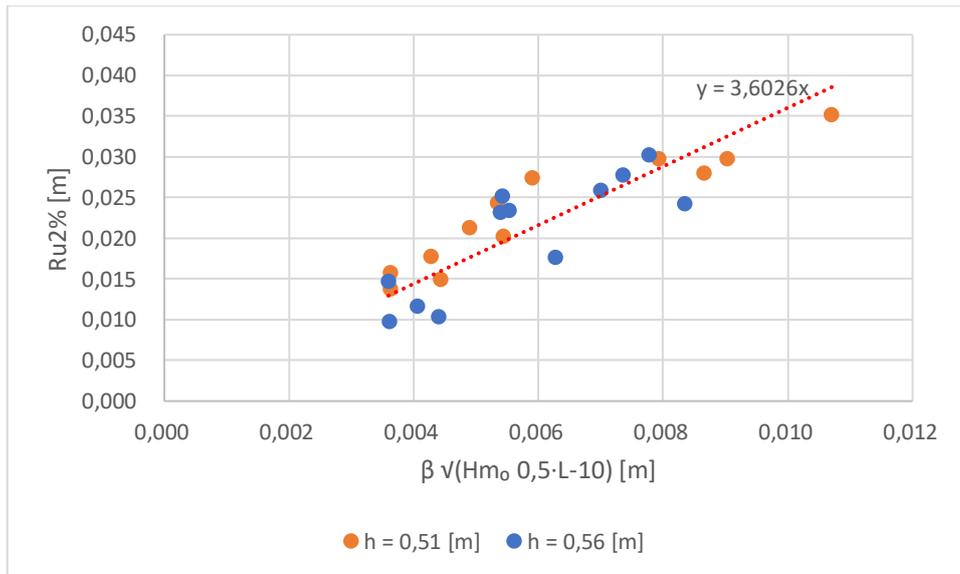


Grafico 4.4.11 – Correlazione del $Ru2\%$ e $\beta \sqrt{(Hm_0 0,5 \cdot L - 10)}$ per le onde irregolari

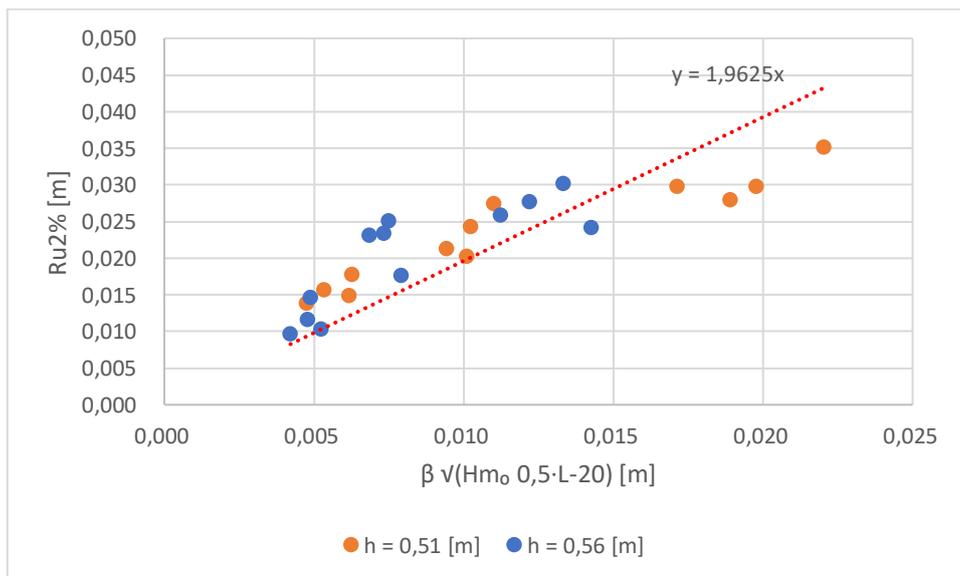


Grafico 4.4.12 – Correlazione del $Ru2\%$ e $\beta \sqrt{(Hm_0 0,5 \cdot L - 20)}$ per le onde irregolari

4.5 Correlazione dell'energia coinvolta nello spettro con l'altezza d'onda trasmessa ed incidente

Gli spettri d'energia tendono a subire delle importanti modifiche per effetto dell'interazione non lineare onda-struttura. L'analisi dei dati è stata condotta mediante l'utilizzo di codici di calcolo scritti in ambiente software MATLAB.

Per le onde irregolari è stato calcolato il contenuto energetico, in termini di area dello spettro m_0 alle basse frequenze (minori di $0,5 f_p$). Nelle tabelle sottostanti è stato riportato il rapporto dell'energia dello spettro alle basse frequenze rispetto all'energia totale dello spettro (m_0) e il rapporto dell'altezza d'onda incidente (H_{m_0} s1) con la sommergenza (R_c).

Onde Irregolari				
h = 0,51 [m]				
Nome	Hs [m]	Tp [s]	m_0 0.5/m_0	H_{m_0} s1/R_c
H3_T200	0,03	2,00	0,0097	-0,2377
H3_T250	0,03	2,50	0,0086	-0,2291
H4_T150	0,04	1,50	0,0163	-0,3025
H4_T100	0,05	1,00	0,0212	-0,3866
H5_T200	0,05	2,00	0,0145	-0,3996
H5_T250	0,05	2,50	0,0159	-0,3870
H6_T150	0,06	1,50	0,0206	-0,4548
H8_T100	0,08	1,00	0,0349	-0,6044
H8_T200	0,08	2,00	0,0344	-0,6473
H8_T250	0,08	2,50	0,0470	-0,6310
H10_T150	0,10	1,50	0,0388	-0,7658
H12_T100	0,12	1,00	0,0494	-0,8540

Tab. 4.5.1 – Correlazione dell'energia coinvolta nello spettro con l'altezza d'onda trasmessa ed incidente per $h=0,51m$

Onde Irregolari				
h = 0,56 [m]				
Nome	Hs [m]	Tp [s]	m_0 0.5/m_0	H_{m_0} s1/R_c
H3_T200	0,03	2,00	0,0066	-0,1619
H3_T250	0,03	2,50	0,0073	-0,1575
H4_T150	0,04	1,50	0,0108	-0,2048
H4_T100	0,05	1,00	0,0103	-0,2620
H5_T200	0,05	2,00	0,0120	-0,2728
H5_T250	0,05	2,50	0,0109	-0,2670

H6_T150	0,06	1,50	0,0191	-0,3096
H8_T100	0,08	1,00	0,0188	-0,4093
H8_T200	0,08	2,00	0,0187	-0,4405
H8_T250	0,08	2,50	0,0192	-0,4327
H10_T150	0,10	1,50	0,0271	-0,5183
H12_T100	0,12	1,00	0,0270	-0,5743

Tab. 4.5.2 – Correlazione dell’energia coinvolta nello spettro con l’altezza d’onda trasmessa ed incidente per $h=0,56m$

L’energia spettrale alle basse frequenze (minori di $0,5 f_p$) dipende dall’altezza d’onda incidente ($H_{m_0} sI$), come si osserva anche nel grafico 4.5.1 e il valore associato di R^2 è 0,882.

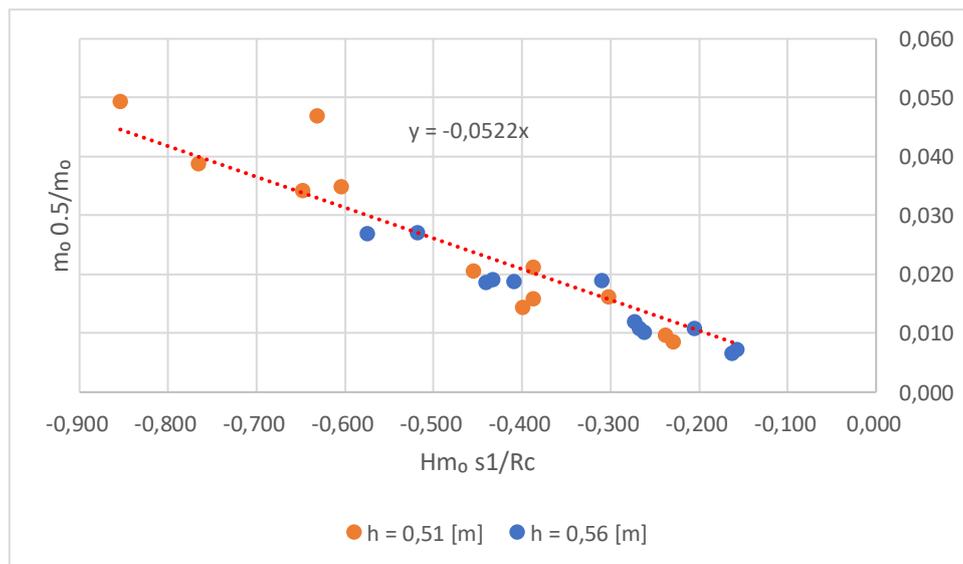


Grafico 4.5.1 – Correlazione del rapporto $m_0 0.5/m_0$ con $Hm_0 sI/Rc$

L’energia alle basse frequenze ($m_{0,0.5}$) adimensionalizzata con l’energia totale dello spettro (m_0), aumenta con il diminuire del rapporto tra l’altezza d’onda incidente ($H_{m_0} sI$) e la sommergenza (R_c).

Onde più alte, quindi, a seguito dei fenomeni di frangimento che si verificano nella loro propagazione sulla barra sommersa, inducono un maggiore trasferimento di energia alle basse frequenze. Inoltre, il frangimento risulta

più intenso per sommergenze minori che, di conseguenza, inducono un maggior trasferimento di energia alle basse frequenze.

Conclusioni

Nella presente tesi si è affrontato il tema del *runup*, il fenomeno della massima risalita del moto ondoso su strutture marittime e su spiagge. Un modello fisico in scala ridotta è stato realizzato al fine di studiare il runup su una spiaggia con pendenza 1:20 indotto da onde. regolari e irregolari in

presenza di una barra sommersa. Lo studio è stato eseguito per due profondità dell'acqua all'interno del canale, $h=0,51m$ associata ad una sommergenza di $0,10m$ e con $h=0,56m$ con una sommergenza di $0,15m$.

Il *runup* è stato calcolato con due metodologie differenti come $Ru2\%$ e $1,1(\langle\eta\rangle + S/2)$. Si è notato che sia per le onde regolari che per le onde irregolari le due metodologie non presentavano notevoli scostamenti e, quindi, le successive elaborazioni sono state condotte in riferimento al valore di *runup* calcolato dalla serie temporale $Ru2\%$.

Per tutte le condizioni ondose sono stati studiati lo *swash incidente*, *swash infragravitazionale* ed il *setup*.

Per le onde regolari il contributo dello *swash incidente* e *infragravitazionale* è caratterizzato da valori minori rispetto al contributo del *setup*. Un parametro calcolato con l'altezza d'onda incidente (H_i) e la lunghezza d'onda alla pala (L) è risultato essere ben correlato con il *setup* con un coefficiente di determinazione pari a $R^2 = 0,807$.

Il *runup* sulle onde regolari risulta quindi essere quasi interamente dovuto al contributo del *setup*. Per spiagge a debole pendenza, il *setup* diventa predominante rispetto all'azione dello *swash*. In altre parole, quasi tutta l'energia delle onde incidenti è dissipata per il frangimento delle onde stesse sulla barra sommersa.

Con l'utilizzo dell'altezza d'onda trasmessa H_{m0t} , non si terrebbe conto del fatto che le onde più alte frangono prima della struttura generando di conseguenza un innalzamento del livello medio a seguito della barra sommersa.

La parametrizzazione effettuata con H_{m0t} permette di ottenere un valore di $R^2 = 0,759$, inferiore a quella ottenuta con l'altezza d'onda incidente H_i ($R^2 = 0,830$).

Il *runup* per le onde irregolari è stato valutato in funzione dell'altezza d'onda trasmessa (H_{m0t}) sia associata alla lunghezza d'onda L_{-10} ($R^2 = 0,621$) che

con $L-20$ ($R^2 = 0,675$). A differenza di quanto ottenuto per onde regolari, in questo caso la correlazione con l'altezza d'onda incidente risulta essere peggiore. Questo effetto può essere spiegato dalle differenze nella propagazione sopra la barra di onde regolari e irregolari. Infatti, mentre nel caso di onde regolari l'effetto principale della struttura sommersa è quello di forzare la generazione di superarmoniche di ordine superiore, nel caso di onde irregolari a causa del frangimento e a causa delle interazioni non lineari si generano delle componenti di onda lunga alle basse frequenze che risultano essere di primaria importanza per la risalita ondosa sulla spiaggia. Il *runup* è stato valutato anche con le caratteristiche dell'onda alle frequenze minori di 0,5 volte la frequenza di picco per $L-10$ permettendo di ottenere una correlazione maggiore ($R^2 = 0,741$).

La parametrizzazione effettuata con H_{m0t} e $L-10$ è risultata essere la più efficace sia per la valutazione dello *swash infragravitazionale* che del *setup*. Lo *swash incidente*, invece, risulta correlato in maniera migliore a H_{m0t} $L-20$ ($R^2 = 0,638$).

Infine, è stato valutato per le onde irregolari l'effetto del rapporto tra l'altezza d'onda incidente ($H_{m_0} sI$) e la sommergenza (R_c) sul trasferimento di energia verso le basse frequenze dello spettro. Il frangimento e i fenomeni non lineari risultano essere i principali responsabili di tale trasferimento.

Di conseguenza, quando il rapporto $H_{m_0} sI$ su R_c diminuisce si ha un maggior redistribuzione dell'energia verso le basse frequenze. Questo, quindi, avviene per altezze d'onda maggiori (maggior frangimento) e per minore sommergenza (maggior frangimento e maggiori interazioni non lineari).

Ringraziamenti

Alla fine di questa tesi e di questo percorso è arrivato il momento di dover ringraziare le persone che hanno contribuito in questi ultimi anni al raggiungimento dell'obiettivo, anche se con un solo sorriso, una chiacchierata o una parola di buono.

Un particolare Ringraziamento alla Prof. Sara Corvaro, per avermi dato la possibilità aver fatto parte di questa attività di ricerca, per i suoi preziosi insegnamenti che mi ha fornito durante il lavoro di tesi.

Ringrazio l'Ing. Francesco Marini e l'Ing. Stefania Rocchi per il loro aiuto durante i momenti di difficoltà in laboratorio, che hanno saputo trasformare le mie difficoltà in punti di forza e per la stesura della presente tesi.

Ringrazio il prof. Alessandro Mancinelli il quale ha cambiato in me il modo di vedere l'idraulica, appassionandomi alle sue lezioni e trasmettendomi la passione verso questa materia.

Ringrazio il prof. Carlo Lorenzoni per aver contribuito alla riuscita di questa tesi con i suoi preziosi consigli.

Ringrazio la mia famiglia: i miei genitori, Muharem e Hamite, i miei fratelli, Fatmir e Ronald, la mia ragazza e futura moglie il 02/10/2022 Glorja, mia sorella Klaudia, le mie amate nipotine Elizabeta e Suada ed il piccolo della casa Muharrem, per essermi stato sempre accanto in questi anni, per avermi aiutato nei momenti più difficili della vita universitaria e non, per avermi fatto capire che se si vuole arrivare a conquistare qualcosa non bisogna mollare, ma fissare e puntare l'obbiettivo.

Ringrazio le mie nonne, i miei zii e zie, i cugini e le cugine per il loro contributo morale.

Ringrazio i miei amici, Romarjo, Kledis, Fatjon, Marjo, Eris, Daniel, Xhoni Claudio, Denaldo, Gazmend e Bruno per le risate al bar dopo pranzo, per essermi stati vicini nei momenti di difficoltà, per aver studiato in compagnia e per avermi dimostrato che le grandi amicizie non cadono davanti a niente.

Altin Kamberaj

Bibliografia

Aiello, E., et al. «Il Trasporto Litoraneo lungo la Costa Toscana tra la foce del Fiume Magra ed i Monti dell'Uccellina.» Bollettino della Società Geologica Italiana 94 (1976): 1591 – 1571

Aminti, P. L., F. Pelliccia, e E. Pranzini. «Evoluzione del profilo di spiaggia a seguito di un ripascimento artificiale in ghiaia su di una spiaggia altamente protetta.» Note e Pubblicazioni di Ingegneria Idraulica, Università di Firenze 30 (1983)

Barber N. F.; Ursell, F., 1948: The Generation and Propagation of Ocean Waves and Swell. Wave Periods and Velocities: Phil. Trans, my. Soc. A

Boccotti, P., 2000. Wave mechanics for ocean engineering. Elsevier Science

Cipriani, L. E., Ferri S., Iannotta, P. P., F. Paolieri, e E. Pranzini. «Morfologia e Dinamica dei Sedimenti del Litorale della Toscana Settentrionale.» Studi Costieri - Dinamica e Difesa dei Litorali - Gestione Integrata della Fascia Costiera 4 (2001)

Chun-Yuan Lin, Chin-Jer Huang “Decomposition of incident and reflected higher harmonic waves using four wave gauges”, Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University, 2004

Costal Engineering Research Center, US Army Corps of Engineers “Shore protection manual”, Volume II (1984).

D’Alessandro, F., Tomasicchio G.R., 2008. The BCI criterion for the initiation of breaking process in Boussinesq – type equations wave models. Coastal Engineering, Vol. 55(12)

Guza, R.T., Thornton, E.B., 1982. Swash oscillations on a natural beach. In Journal Geophysics Research, Vol. 87(C1)

Hanslow, D. and P. Nielsen. 1993 Shoreline setup on natural beaches. Journal of Coastal Research.

Hasselmann, K., et al. «Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay During the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP).» Deut. Hydrogr. Z. 1973.

Holthuijsen, L. H. Waves in Oceanic and Coastal Waters. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.

HR Wallingford “HR Generation System”, Technical and User Manual. Supplied to Università Politecnica delle Marche. HR Wallingford (2004).

J.W. van der Meer, H.J.Regeling and J.P. de Wal, “Wave Transmission: spectral changes and its effects on run-up and overtopping”, 2001

Longuet-Higgins M.S., 1969. A nonlinear mechanism for the generation of sea waves, Proc. R. Soc. Ser. A. 311

Madsen, P.A., Sorensen, O.R., Schäffer H.A., 1997. Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. Part I. Model description and cross-shore motion of regular waves. In Coastal Engineering, Vol. 32(4)

Mancinelli, A., et al. «Opere di difesa realizzate con strutture sommerse ed a cresta bassa ad Alghero (SS), Perd'e Sali (CA), Marina di Massa (MS), Marina di Pisa (PI), Porto Recanati (MC), Marina di Montemarciano (AN), Lido di Dante (RA) e Pellestrina (VE).» Studi Costieri 9 (2005)

Masselink, G., Puleo, J.A., 2006. Swash-zone morphodynamics. Continental Shelf Research 26

Miles, J.W., 1957. On the generation of surface waves by shear flows. In Journal Fluid Mechanics, Vol. 3

Pierson Jr, W.J., Moskowitz, L., 1964. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of Kitaigorodskii S.A. In Journal of geophysical research, Vol. 69.

Ruessink, B.G., Houwman, K.T., Hoekstra, P., 1998. The systematic contribution of transporting mechanisms to the cross-shore sediment transport in water depths of 3 to 9 m. In Marine Geology, Vol. 152

Phillips, O.M., 1957. On the generation of waves by turbulent winds. In Journal Fluid Mechanics Vol. 2

Scarsi, G., 2009. Elementi di idraulica marittima e costiera. Ed. Aracne

Shepard, F.P., 1976. Coastal classification and changing coastlines. In Geoscience and Man

Stokdon, H.F., Holman, R.A., Howd, P.A., Sallenger A.H., 2006. Empirical parameterization of setup, swash and run-up. In Coastal Engineering

Svendsen, I.A., and I.G. Jonsson (1976) Hydrodynamics of coastal regions. Den private Ingeni0rfond, Tech. Univ. Denmark.