



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CATANIA
DIPARTIMENTO INGEGNERIA CIVILE E ARCHITETTURA
CORSO DI DOTTORATO DI RICERCA – XXX CICLO

DOTTORATO DI RICERCA IN VALUTAZIONE E MITIGAZIONE DEI
RISCHI URBANI E TERRITORIALI

**SISTEMI PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA
NELL'AMBITO DI INFRASTRUTTURE
PORTUALI**

Tutors:

Prof. Ing. Enrico Foti

Dottorando:

Dott. Ing. Stefania Naty

Dott. Ing. Gianguido Babini

Cotutor:

Dott. Ing. Antonino Viviano

Gruppo di tesi:

Prof. Ing. Diego Vicinanza

(Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli")

CATANIA
Anno Accademico 2015-2016
Settembre 2017

Indice

Sommario	1
1. INTRODUZIONE	5
1.1. Posizione del problema.....	5
1.2. Oggetto della ricerca.....	8
1.3. Rilevanza scientifica.....	9
1.4. Obiettivi della ricerca	11
1.5. Metodologia.....	12
1.6. Limiti	13
1.7. Fasi del lavoro svolto.....	15
2. LO SFRUTTAMENTO DELL'ENERGIA DEL MOTO ONDOSO.....	19
2.1. Generalità	19
2.2. Il moto ondoso come fonte di energia	20
2.3. Energia disponibile lungo le coste italiane	24
2.4. Classificazione dei sistemi WEC per la conversione di energia dal moto ondoso	26
2.5. Dispositivi WEC integrabili in strutture portuali.....	31
3. I SISTEMI A COLONNA D'ACQUA OSCILLANTE	35
3.1. Generalità	35
3.2. Storia degli OWC	35
3.3. Periodo proprio di oscillazione.....	37
3.4. Coefficiente di riflessione.....	39

3.5.	Pressioni e forze	41
3.6.	Rumore	45
3.7.	Rendimento	47
3.8.	Idrodinamica all'interno della camera pneumatica	49
4.	SCHEMATIZZAZIONE DEL PROBLEMA AI FINI DELLA MODELLAZIONE FISICA DEGLI OWC	55
4.1.	Generalità	55
4.2.	Similitudine nei modelli fisici di OWC.....	56
4.3.	Effetti di scala sul modello.....	60
4.3.1.	Modello a grande scala.....	61
4.3.2.	Modello a piccola scala.....	65
4.4.	Configurazione geometrica ottimale	71
4.5.	Studio di fattibilità.....	73
5.	RISULTATI DEL MODELLO A GRANDE SCALA	75
5.1.	Generalità	75
5.2.	Valutazioni sulla riflessione	76
5.2.1.	Onde irregolari	77
5.2.2.	Onde regolari.....	84
5.3.	Misura delle pressioni e forze estreme	85
5.4.	Valutazioni sul periodo proprio di oscillazione	94
5.5.	Idrodinamica della colonna d'acqua oscillante	95
5.5.1.	Proposta di una formulazione empirica.....	101
6.	ANALISI DEGLI EFFETTI DI SCALA	107

6.1.	Generalità	107
6.2.	Periodo proprio di oscillazione.....	107
6.3.	Moto ondoso.....	109
6.4.	Azioni sul dispositivo	116
7.	OTTIMIZZAZIONE DEL SISTEMA.....	121
7.1.	Generalità	121
7.2.	Coefficiente di riflessione.....	121
7.3.	Pressioni e forze	127
8.	IMPLEMENTAZIONE DEL SISTEMA OWC AL CASO STUDIO	129
8.1.	Generalità	129
8.2.	Scelta del sito.....	130
8.3.	Energia disponibile	132
8.4.	Modellazione fisica.....	135
8.5.	Analisi dei parametri caratteristici.....	138
8.5.1.	Periodo proprio di oscillazione.....	139
8.5.2.	Coefficiente di riflessione.....	140
8.5.3.	Pressioni e forze.....	142
8.6.	Dimensionamento del dispositivo	146
8.6.1.	Rumore	147
8.6.2.	Rendimento.....	148
8.6.3.	Analisi strutturale	150
8.7.	Analisi economica	153

9. CONCLUSIONI.....	157
Bibliografia	167

Sommario

Il mare rappresenta una inesauribile fonte di energia rinnovabile, di particolare interesse per i Paesi che si affacciano lungo le coste. L'impiego di tale fonte di energia presenta, ad oggi, un vantaggio di carattere economico in quanto molti Paesi propongono una tariffa particolarmente incentivante. Lo sfruttamento di questa fonte di energia richiede però lo sviluppo di tecnologie adatte sia alla fonte di energia che al sito di interesse.

Tra le varie forme di energia, quella relativa al moto ondoso viene convertita in energia elettrica attraverso l'impiego di diversi sistemi di produzione noti in letteratura come Wave Energy Converter WEC. Le tipologie di WEC brevettate sono molteplici, ognuna con il proprio principio di funzionamento ed ognuna adatta ad una specifica installazione. Una delle applicazioni di largo interesse prevede l'installazione dei sistemi WEC *onshore* ed in particolare nei porti. Ipotizzare l'installazione di un sistema WEC nei porti, modifica l'ottica di inquadramento degli stessi da infrastrutture intermodale di trasporto a infrastruttura verde. Finora, i porti sono stati considerati solo infrastrutture destinate ad ospitare natanti all'interno di uno specchio acqueo ridossato al moto ondoso, costituendo un nodo per vari sistemi di trasporto. In tali infrastrutture confluiscono e hanno continuità varie vie di comunicazione fluvio-marittime, terrestri e aeree. Oggi, le tematiche relative ai porti verdi e alle infrastrutture cosiddette *smart* assumono un interesse sempre più rilevante ai fini di una *green-strategy*. I porti verdi presentano quindi una rinnovata sostenibilità ambientale delle mobilità e delle attività interportuali.

L'attività svolta ha lo scopo di favorire lo sviluppo di sistemi per l'estrazione di energia dal moto ondoso, contribuendo alle valutazioni sull'efficienza degli stessi sistemi in condizioni reali. Particolare attenzione è rivolta ai dispositivi a colonna

d'acqua oscillante (Oscillating Water Column, OWC) che hanno il vantaggio di essere integrabili nelle dighe portuali a parete verticale. Tali dispositivi sfruttano le oscillazioni del pelo libero del moto ondoso mediante la compressione e decompressione dell'aria in una camera stagna. L'aria a sua volta viene veicolata verso una turbina in grado di funzionare in entrambe le direzioni del moto.

La presente ricerca è stata condotta mediante modellazione fisica, perseguendo l'obiettivo di migliorare l'efficienza del sistema valutando vantaggi e criticità del dispositivo. Nel dettaglio, è stato analizzato il funzionamento dei sistemi OWC simulando, per semplicità, la perdita di carico dovuta alla turbina mediante un orifizio, un restringimento inserito in un condotto verticale sopra la camera d'aria. Il funzionamento del sistema è stato esaminato dal punto di vista strutturale e idrodinamico attraverso le valutazioni sul periodo proprio di oscillazione del sistema, sulla riflessione del sistema, sulle pressioni e sulle forze agenti sulla struttura. In dettaglio, dalla modellazione a grande scala è stato possibile valutare il diametro dell'orifizio ottimale, che provoca la minor riflessione possibile.

Note le difficoltà di riprodurre i modelli a grande scala, sono stati valutati gli effetti di scala su un OWC. Tale valutazione è stata eseguita sulla base della modellazione fisica a piccola scala progettata a partire dalla modellazione a grande scala.

I parametri geometrici sono stati indagati nella modellazione a piccola scala valutando la loro influenza sulla riflessione. Dall'influenza dei parametri geometrici sulla riflessione è stato possibile definire una configurazione ottimale del sistema.

Il lavoro svolto ha come fine ultimo quello di favorire la progettazione di un sistema OWC da inserire presso un sito campione, scelto lungo le coste della Sicilia. L'OWC è stato modellato a piccola scala sulla base delle condizioni d'onda e morfologiche del sito. Il dimensionamento del caso studio è stato eseguito sulla base delle valutazioni del periodo proprio del sistema, della

riflessione, delle pressioni e dei carichi. Da tale applicazione è stato altresì possibile valutare il problema del rumore provocato dall'attivazione della turbina in fase di esercizio, proponendo una soluzione che riduce il livello sonoro a valori compatibili con le attività previste nel porto. Inoltre, è stato possibile massimizzare il rendimento del dispositivo OWC al caso studio. Infine è stata verificata la stabilità strutturale ed è stata eseguita un'analisi economica sull'installazione di un OWC in un porto.

1. INTRODUZIONE

1.1. Posizione del problema

La crescente attenzione nei confronti dei sistemi alternativi di produzione di energia è, di fatto, l'oggetto di norme internazionali per cui ogni Paese è tenuto a mettere in atto azioni concrete al fine di raggiungere l'obiettivo comunitario di rendere sostenibile il consumo delle fonti energetiche per le generazioni future. L'attenzione rivolta verso le fonti rinnovabili è, dunque, il prodotto di scelte economiche e politiche che mirano alla salvaguardia dell'ambiente. A tale scopo, risulta di fondamentale importanza lo sviluppo e l'impiego di tecnologie per l'estrazione di energia che consentano di soddisfare la domanda energetica, riducendo al contempo le emissioni inquinanti.

Le fonti fossili come il petrolio, il gas naturale e il carbone, impiegate tutt'oggi per la produzione di energia a livello mondiale, presentano tre inconvenienti principali. Il primo inconveniente è che tali fonti sono derivate da un processo di degrado del materiale organico durato milioni di anni e vengono consumate in un arco temporale molto breve rispetto al tempo necessario per produrle, quindi sono destinate ad estinguersi. Il secondo problema è legato agli equilibri internazionali politici ed economici, a causa della distribuzione geografica dei combustibili fossili e dei Paesi consumatori. Le fonti fossili sono infatti localizzate maggiormente nei Paesi del Medio Oriente, ad elevata instabilità sociale e geopolitica. I Paesi consumatori di grosse quantità hanno invece fonti fossili non sufficienti per soddisfare i propri fabbisogni. Il terzo svantaggio dell'utilizzo delle fonti fossili è rappresentato dal processo di sfruttamento di tali fonti che provoca emissioni di anidride carbonica (CO₂), contribuendo così ad aumentare l'effetto serra e il surriscaldamento globale. Al fine di far fronte a questo

problema, a livello internazionale è stato redatto il protocollo di Kyoto sottoscritto l'11 dicembre 1997 durante la Conferenza delle parti di Kyoto (la COP3), con l'obiettivo di ridurre le emissioni dei gas, causa dell'effetto serra.

In particolare l'Europa, sempre attenta alla crescita sostenibile degli Stati Membri, ha imposto, nel breve periodo, la riduzione di gas serra del 20%, l'aumento del consumo di energie rinnovabili del 20% e dell'efficienza energetica del 20% (Direttiva 2009/29/CE). In tal senso è possibile anche stimare un risparmio economico di miliardi di euro rispetto alle importazioni di petrolio e gas, portando gli Stati che fino ad oggi sono risultati dipendenti da tali importazioni a raggiungere l'autonomia. Si prevede, inoltre, che l'adozione di tale politica contribuisca all'aumento occupazionale dei cittadini europei.

Più recente è la Conferenza sui cambiamenti climatici di Parigi (COP21) del 2015 a trovare un consenso globale a cui hanno aderito anche i quattro più grandi Paesi inquinatori, tra cui l'Europa. L'accordo di Parigi stabilisce che, per limitare il surriscaldamento globale, il rialzo della temperatura globale deve mantenersi al di sotto dei 2°C, sforzandosi di fermarsi a +1,5°C. I progressi ottenuti vanno monitorati ogni cinque anni e bisognerà arrivare al 2020 in modo da essere pronti a perseguire gli obiettivi posti. I Paesi più poveri devono essere aiutati nello sviluppo di nuove tecnologie per lo sfruttamento delle fonti rinnovabili dai Paesi di vecchia industrializzazione erogando 100 miliardi all'anno dal 2020. Inoltre, è previsto un rimborso ai Paesi più vulnerabili per compensare le perdite finanziarie causate dai cambiamenti climatici.

In definitiva, l'instabilità del prezzo del petrolio e degli equilibri internazionali di carattere politico e strategico, la divulgazione di studi scientifici sui cambiamenti climatici connessi al consumo di fonti fossili di energia, l'insostenibile crescita delle emissioni di CO₂, la crescente attenzione verso la tutela ambientale sta spingendo molti Paesi alla ricerca di una soluzione alternativa alle fonti fossili.

Per affrontare i problemi sopraelencati e soddisfare i crescenti fabbisogni energetici si sta largamente sviluppando l'impiego di fonti rinnovabili, ovvero di fonti energetiche che per caratteristiche intrinseche non sono esauribili e il cui utilizzo non pregiudica le risorse naturali per i fabbisogni futuri. Un altro aspetto dell'impiego delle fonti rinnovabili è lo sviluppo di nuove tecnologie: le tecniche tradizionali, impiegate per lo sfruttamento delle fonti fossili, non sono infatti adatte alla conversione dell'energia proveniente da fonti rinnovabili. Inoltre, ciascuna fonte rinnovabile richiede tecnologie specifiche per la conversione dell'energia, presentando i propri vantaggi e svantaggi, da valutare in base alle condizioni di impiego e installazione.

Secondo la normativa italiana (D.M. 6 Luglio 2012), sono da considerarsi rinnovabili le fonti energetiche come il sole, il vento, le risorse idriche, le risorse geotermiche, le maree, il moto ondoso, la trasformazione dei rifiuti organici e inorganici.

Per di più, tra le fonti rinnovabili, l'energia del moto ondoso si presenta conveniente anche in termini strettamente economici. In molti Paesi, infatti, la tariffa incentivante per lo sfruttamento di tale energia è maggiore rispetto a quella delle altre energie rinnovabili. In particolare, in Italia il D.M. 6 luglio 2012 ha fissato la tariffa base per l'energia elettrica da moto ondoso in 300€/MWh per impianti fino a 5MW. Questo aspetto evidenzia come lo sfruttamento dell'energia del mare sia ancora poco diffuso e allo stesso tempo vantaggioso.

Nel presente lavoro di tesi vengono ampiamente trattati i vantaggi e i problemi legati alla conversione di energia dal moto ondoso mediante il sistema a colonna d'acqua oscillante, in alcune condizioni tipo di impiego e nell'ipotesi di installazione di un dispositivo in un sito campione, in un porto della Sicilia. Il sistema attualmente più utilizzato in Sicilia è rappresentato dai pannelli fotovoltaici e più di recente si sta anche sviluppando l'impiego, ancora poco diffuso, delle pale eoliche. L'applicazione di un sistema che produce energia dal

moto ondoso sarebbe in grado di sopperire alla mancata produzione di energia dai pannelli fotovoltaici nei giorni in cui il cielo è coperto, magari in concomitanza di precipitazioni. Spesso infatti tali eventi atmosferici sono accompagnati da tempeste di vento, che a loro volta possono incrementare l'energia del moto ondoso. Tale vantaggio è sfruttabile in modo particolare nei mesi invernali, quando la luminosità del sole è ridotta e le tempeste di vento sono più frequenti. A tal proposito, si ricorda che garantire la continuità di produzione di energia da fonti rinnovabili contribuisce al raggiungimento degli obiettivi comunitari.

1.2. Oggetto della ricerca

Il presente lavoro di tesi è redatto nell'ambito dell'attività di ricerca dal titolo "*Strutture portuali innovative e interazione col moto ondoso per la produzione di energia*", svolta durante il Dottorato di Ricerca del XXX ciclo in "*Valutazione e mitigazione dei rischi urbani e territoriali*" presso l'Università degli Studi di Catania. Tale ricerca, finanziata dalla società Tecnis s.p.a., ha tenuto conto delle indicazioni suggerite dall'azienda, rappresentata dal tutor aziendale Ing. G. Babini. L'azienda è interessata ad approfondire le prospettive e le problematiche riguardanti l'installazione di un sistema di produzione di energia dal moto ondoso all'interno di strutture portuali, mettendo a disposizione il porto di Giardini Naxos come sito per l'installazione di un modello di prototipo.

L'attività di ricerca si inquadra nell'ottica dello sviluppo dei sistemi in grado di estrarre energia dalle fonti rinnovabili, fonti tra cui è possibile annoverare l'energia marina nelle sue diverse forme, successivamente elencate. In particolare modo, lo studio si è concentrato sui sistemi di conversione di energia del moto ondoso (Wave Energy Converter, WEC) che sfruttano il principio di funzionamento della colonna d'acqua oscillante, nota in letteratura come Oscillating Water Column (OWC). Tali sistemi sono facilmente integrabili nelle

strutture portuali. Il fine ultimo della ricerca è indagare gli aspetti legati all'idrodinamica, il rendimento del dispositivo e la stabilità strutturale dell'opera, in modo da fornire delle linee guida per i progettisti delle opere portuali in cui inserire il sistema OWC.

1.3. Rilevanza scientifica

L'attività di ricerca si inserisce nell'ambito internazionale delle fonti rinnovabili ed in particolare della conversione di energia del moto ondoso. Le fonti rinnovabili maggiormente sfruttate in Italia, come in Europa, sono rappresentate dall'energia eolica, solare e idraulica. Tuttavia, una fonte di energia rinnovabile che sta prendendo piede in Europa negli ultimi anni è l'energia marina. L'oceano è mediamente più energetico rispetto ai mari chiusi (Lopez et al., 2013) e la notevole disponibilità di energia lungo le coste sta spingendo molti Paesi ad investire sulla conversione di energia ottenuta dal moto ondoso attraverso i sistemi WEC. Il nostro Paese, pur non affacciandosi sull'oceano, tuttavia presenta circa 7500km (dato ISTAT, 2010) di costa con un'alta potenzialità alla conversione di energia dal moto ondoso.

I sistemi WEC vengono spesso installati a largo (*offshore*), presentando però difficoltà dovute all'impetuosità delle tempeste e a costi di installazione elevati, questi ultimi anche dovuti alla necessità di trasportare l'energia convertita a riva. Per ovviare a questi problemi, è possibile prevedere l'installazione dei sistemi WEC vicino la costa (*nearshore*) e in particolare predisporre le strutture portuali ad accogliere un sistema di conversione di energia dal moto ondoso, nella fase di costruzione e/o ristrutturazione delle strutture stesse.

La scelta dei dispositivi WEC da integrare nelle strutture portuali deve essere frutto di valutazioni riguardanti l'energia disponibile, il ritorno economico dell'investimento e la stabilità strutturale relativa all'impatto delle onde sull'opera. Tali valutazioni comprendono l'ottimizzazione del sistema, al fine di

investigare come le caratteristiche geometriche e quelle del moto ondoso influiscono sulla produzione di energia del dispositivo e sull'efficienza dello stesso. Questi studi necessitano di analisi eseguite mediante la modellazione idraulica del dispositivo, in cui i parametri geometrici principali possono essere variati e valutati volta per volta.

In particolare, l'attività di ricerca svolta si è concentrata sullo studio di un dispositivo OWC integrabile in una struttura portuale. La ricerca si è sviluppata mediante l'analisi di dati di un modello OWC a grande scala e l'esecuzione di esperimenti a piccola scala. Il confronto tra due modelli geometricamente simili ma a scale diverse ha reso possibile le valutazioni degli effetti di scala. La modellazione fisica a piccola scala degli OWC è stata largamente utilizzata in letteratura scientifica (Takahashi, 1988; Morris Thomas et al., 2007; Sheng et al., 2013; Kooverji, 2014; Ashlin et al., 2016), al contrario di quella a grande scala (Allsop et al., 2014). Per di più, il confronto tra le due modellazioni fisiche permette di considerare gli effetti di scala e di applicarli ai sistemi a scala di prototipo, consentendo una migliore progettazione degli stessi in modo da massimizzare il rendimento energetico ed economico del sistema.

Il problema principale della valutazione sugli effetti di scala è che il volume d'aria della camera non segue la scala geometrica, come gli altri parametri. Ciò, comporterebbe nella piccola scala volumi d'aria aggiuntivi di difficile implementazione (Weber, 2007). La modellazione fisica, eseguita con dimensioni della camera d'aria variabili, consente di valutare gli errori relativi a tale effetto. Inoltre, nella piccola scala diminuisce la velocità dell'acqua e quindi anche la turbolenza, a vantaggio degli effetti viscosi.

L'ottimizzazione geometrica dei dispositivi OWC è scientificamente rilevante per valutare l'installazione del dispositivo anche in zone con disponibilità energetica bassa.

Le valutazioni riguardanti l'interazione tra il moto ondoso e il dispositivo sono state applicate ad un sistema OWC da installare nel sito campione.

1.4. Obiettivi della ricerca

L'attività di ricerca svolta ha come ultimo principale l'applicazione di un sistema WEC nel porto di Giardini Naxos, massimizzando l'efficienza del sistema per valutarne la fattibilità nelle opere portuali e soprattutto la quantità di energia prodotta dal sistema.

Al fine di scegliere un sistema WEC che meglio si adatti alle condizioni di esercizio del porto di Giardini Naxos, è stato redatto un quadro d'insieme sui dispositivi WEC oggi disponibili ed è stato scelto il sistema OWC. Le caratteristiche del sistema OWC sono state approfondite in modo da delineare i vantaggi e gli svantaggi nelle applicazioni reali. L'attività di ricerca è stata, dunque, condotta seguendo una linea di intervento che si interfaccia con obiettivi intermedi prefissati.

In questo contesto, è stata eseguita la analisi degli esperimenti a grande scala eseguiti da Allsop et al. (2014), presso il Grosse Wellenkanal (GWK) di Hannover con l'obiettivo di valutare l'influenza della geometria del sistema ed ottenere il diametro ottimale dell'orifizio che simula la perdita di carico dell'aria dovuta alla presenza della turbina. Dall'analisi dei dati è possibile effettuare delle valutazioni sul coefficiente di riflessione e sulle pressioni e forze agenti sulla struttura, con lo scopo di individuare i vantaggi e le criticità del dispositivo.

Non essendo sempre possibile condurre esperimenti a grande scala come quelli del GWK, sia in termini di spazi disponibili nei laboratori sia in termini economici di modelli di prototipo, si vogliono valutare gli effetti di scala su un sistema OWC. A tale scopo è stata eseguita una campagna di laboratorio a piccola scala, in modo da ripetere gli esperimenti a grande scala e confrontare i risultati ottenuti dalle due campagne di laboratorio.

Un ulteriore obiettivo è quello di valutare l'influenza della geometria del sistema ed in particolare delle dimensioni della camera e della sommergenza della parete frontale. La campagna di laboratorio a piccola scala ha dunque previsto degli esperimenti tali da definire una geometria ottimale del sistema OWC. Anche la configurazione ottimale del sistema OWC che si vuole installare nel porto di Giardini Naxos è stata ottenuta tramite il modello fisico a piccola scala, appositamente condotto per ottimizzare tale dispositivo. Trovare la configurazione geometrica ottimale equivale a massimizzare l'efficienza del sistema, aspetto fondamentale per la scelta del sistema stesso.

Per meglio comprendere l'idrodinamica dell'OWC, gli esperimenti sono stati predisposti in modo da valutare la variazione della pressione dell'aria e del livello dell'acqua dentro la camera. È possibile valutare l'idrodinamica all'interno della camera confrontando i risultati ottenuti con una formulazione teorica dell'interazione aria-acqua.

In definitiva, il lavoro svolto vuole raccogliere indicazioni sulle caratteristiche dei sistemi OWC da tenere in conto per la loro progettazione ed esecuzione, potendo anche rappresentare un punto di partenza per la stesura di linee guida rivolte a pianificatori, progettisti e tecnici in ambito portuale.

1.5. Metodologia

L'attività di ricerca è stata condotta attraverso l'approccio sperimentale a partire dai risultati degli esperimenti a grande scala, condotti Allsop et al. (2014) ad Hannover nel GWK. Sulla base di tali esperimenti a grande scala, sono stati progettati gli esperimenti a piccola scala, condotti nel Laboratorio di Idraulica dell'Università di Catania.

Gli esperimenti eseguiti a piccola scala hanno previsto tre tipologie differenti di configurazioni del sistema OWC: la prima è volta alla ricerca degli effetti di scala rispetto al modello a grande scala, la seconda alla ricerca della configurazione

ottimale che fornisce il miglior rendimento del sistema e la terza alla riproduzione del sistema da installare nel sito di interesse.

Gli esperimenti condotti a piccola scala hanno previsto un totale di 32 configurazioni differenti del sistema OWC, su cui sono state testate 9 condizioni d'onda differenti. Dai dati sperimentali sono stati indagati fenomeni come la riflessione del moto ondoso e l'interazione onda-struttura per definire l'altezza d'onda, le pressioni e le forze sulla parete frontale del cassone OWC. Sono inoltre stimati gli effetti di scala e la configurazione ottimale del sistema. Per la configurazione del dispositivo da implementare nel sito pilota sono stati inoltre valutati il rumore dovuto all'attivazione della turbina attraverso un confronto con il sistema LIMPET (Starzmann e Carolus, 2013); la stabilità strutturale allo scorrimento e al ribaltamento; il ritorno economico dell'investimento considerando i costi della struttura, delle opere meccaniche, della connessione alla rete di distribuzione e la soluzione adottata per la riduzione del rumore.

Gli effetti idrodinamici dentro la camera sono stati valutati attraverso il confronto tra gli esperimenti condotti e una formulazione teorica dell'interfaccia aria-acqua. Da tale confronto è stato possibile elaborare una formulazione per riprodurre il comportamento del sistema OWC al variare delle sue configurazioni geometriche e delle condizioni del moto ondoso incidente.

1.6. Limiti

Le indagini sperimentali effettuate in laboratorio, così come le formulazioni teoriche, sono soggette a diversi limiti. Per quanto riguarda le indagini sperimentali di laboratorio, i limiti che si sono individuati riguardano sia la progettazione che l'esecuzione degli esperimenti nonché l'acquisizione e l'elaborazione dei dati.

Bisogna tenere presente che riprodurre un esperimento in scala comporta delle approssimazioni: (i) le costanti fisiche, come l'accelerazione di gravità o la

densità dell'acqua, non possono essere scalate; (ii) le grandezze fisiche scalate geometricamente sono soggette ad arrotondamenti per eccesso o per difetto; (iii) la fase di taratura manuale degli strumenti, come le sonde resistive, potrebbe essere affetta da errori di parallasse. Inoltre, gli strumenti di misura funzionano bene in un range di acquisizione ben definito e presentano una sensibilità dello strumento limitata, oltre la quale lo strumento non può cogliere variazioni di misura. È dunque importante scegliere gli strumenti in modo tale che il loro range di funzionamento riesca ad acquisire i dati senza raggiungere il fondo scala dello strumento stesso, oltre il quale il segnale acquisito viene tagliato.

Per il sistema OWC riprodotto a piccola scala, le sonde di pressione utilizzate hanno una dimensione prossima a quella testata della camera e, per limitare l'influenza di tali sonde sugli esperimenti, sono state collocate lateralmente. Il modello è inoltre soggetto a perdite d'aria non quantificabili, a causa del fatto che la tenuta ermetica non è garantita.

Le analisi dei dati sono state condotte sulla base di ipotesi semplificative: (i) l'analisi dei dati è condotta in modo bidimensionale, anziché tridimensionale supponendo che il fenomeno sia invariante lungo la terza dimensione non considerata; (ii) la distribuzione delle pressioni, noti solo due punti di acquisizione, viene considerata lineare; (iii) per ottenere approssimativamente il punto in cui la sopraelevazione dell'onda giunge alla parete frontale, è stata eseguita un'estrapolazione dalle sonde resistive poste davanti alla parete frontale; (iv) il segnale di pressione è stato filtrato in quanto è risultato a tratti disturbato a causa dell'ingresso di aria nel sensore di pressione.

Oltre ai limiti citati e alle ipotesi semplificative adottate, per il caso reale, un limite è rappresentato dall'ipotesi semplificativa con cui la turbina viene sostituita nel modello fisico da un orifizio che simula la perdita di carico dell'aria nella camera. Questo limite può essere però superato solo mediante una applicazione

pilota in campo prevedendo l'inserimento della turbina, opportunamente calibrata per massimizzarne il rendimento.

Nonostante i sopra citati limiti, si ritiene comunque che i risultati ottenuti siano affidabili nel range dei parametri studiati.

1.7. Fasi del lavoro svolto

Il lavoro si è articolato secondo quattro grandi fasi schematizzate in Figura 1.1: (i) ricerca bibliografica, (ii) analisi critica dei risultati sperimentali a grande scala, (iii) progettazione ed esecuzione degli esperimenti con relativa analisi dei risultati, (iv) sviluppo e applicazione di una formulazione teorica semplificata.

In primo luogo è stata condotta una fase di studio preliminare di ricerca bibliografica in cui sono state approfondite le tematiche relative alle diverse tipologie di sistemi WEC e alla loro classificazione, ponendo particolare attenzione ai sistemi che ben si integrano nelle infrastrutture portuali. Tra questi, dopo una preliminare analisi di fattibilità, è stato scelto il sistema OWC (Oscillating Water Column) da implementare in un sito pilota: il porto di Giardini Naxos. Lo studio bibliografico si è, dunque, focalizzato sulle problematiche e sui vantaggi di questi sistemi.

La fase successiva ha compreso l'analisi dei dati degli esperimenti a grande scala su un dispositivo OWC generico, al fine di stimare l'apertura ottimale dell'orifizio utilizzato per simulare la turbina ad aria. In tale ambito vengono calcolati anche il coefficiente di riflessione e le forze impulsive sulla struttura dell'OWC.

In seguito ai risultati ottenuti e sulla base degli esperimenti a grande scala, sono stati progettati gli esperimenti a piccola scala, condotto presso il Laboratorio di Idraulica dell'Università di Catania.

Le prove effettuate a piccola scala sono state eseguite in modo da essere confrontate con le prove a grande scala, al fine di valutare gli effetti di scala e quindi gli errori di cui sono affetti i risultati. Tale analisi è stata eseguita sulla base del coefficiente di riflessione, delle pressioni e forze agenti sulla struttura nonché del periodo proprio di oscillazione del dispositivo.

La campagna sperimentale a piccola scala ha inoltre previsto la variazione dei parametri geometrici del dispositivo che influenzano il coefficiente di riflessione e le forze impattanti sulla struttura, al fine di valutare una configurazione ottimale del sistema. La configurazione ottimale è da considerarsi tale da massimizzare il rendimento del sistema, e quindi minimizzare la riflessione del moto ondoso.

Un'ulteriore fase della attività di laboratorio ha previsto la verifica del sistema OWC che si vuole installare nel sito pilota, valutando anche in questo caso l'influenza dei parametri principali che regolano l'interazione onda-struttura e ottenendo una configurazione ottimale per la conversione di energia del moto ondoso. Inoltre, è stato affrontato il problema del rumore legato al funzionamento del dispositivo, attraverso lo studio di una soluzione da integrare nel sistema per insonorizzare la camera pneumatica e la turbina. Sono state eseguite la verifica della stabilità strutturale e la valutazione economica della soluzione proposta in termini di rientro economico dell'investimento.

Lo scopo della fase finale della attività della ricerca è stato lo studio dell'idrodinamica dentro la camera per le opportune considerazioni sull'efficienza del sistema OWC. Sulla base dei dati disponibili, è stata applicata una formulazione teorica di letteratura e successivamente è stata elaborata una formulazione empirica.

Il presente elaborato risulta articolato come segue. Il Capitolo 2 introduce la tematica del moto ondoso e dei sistemi WEC. Nel Capitolo 3 vengono esposte le principali problematiche affrontate in letteratura sui sistemi OWC e utilizzate durante l'attività di ricerca. Nel Capitolo 4 viene descritta la fase di progettazione

e di realizzazione dell'apparato sperimentale e nel Capitolo 5 vengono esposti i risultati. Il Capitolo 6 focalizza l'attenzione sugli effetti di scala e il Capitolo 7 sull'ottimizzazione geometrica del sistema. Nel Capitolo 8 viene descritta l'applicazione del sistema OWC al sito pilota. Infine, il Capitolo 9 riporta le principali conclusioni del lavoro svolto.

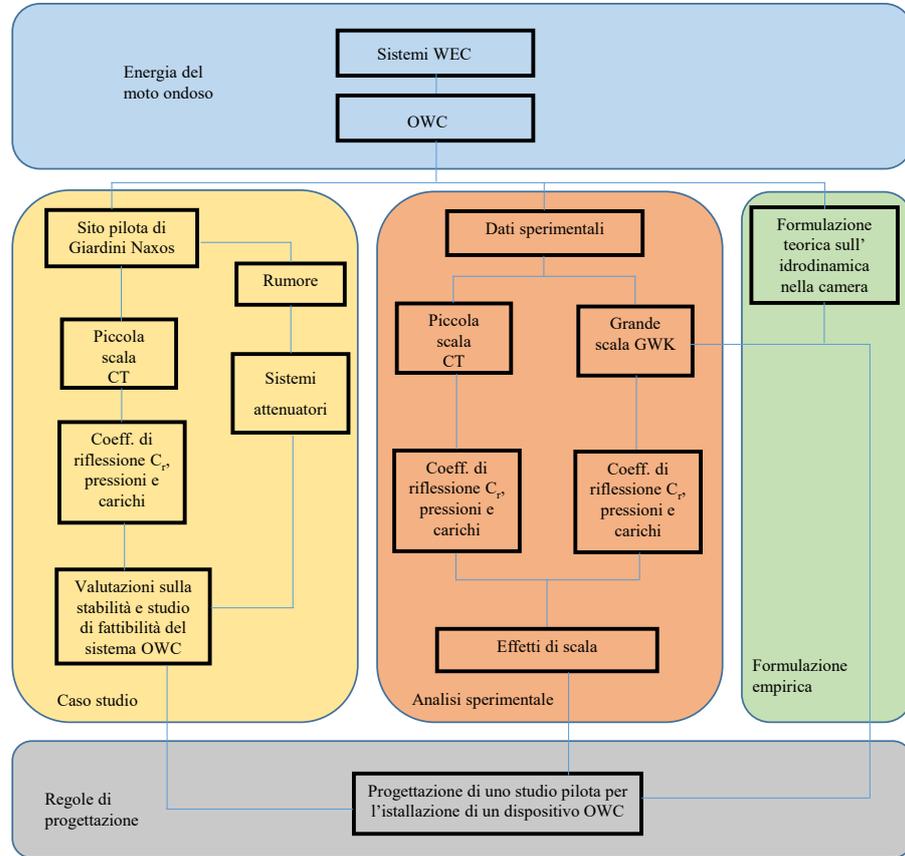


Figura 1.1: Diagramma di flusso delle attività della tesi di dottorato.

2. LO SFRUTTAMENTO DELL'ENERGIA DEL MOTO ONDOSO

2.1. Generalità

L'energia marina è una fonte rinnovabile che rappresenta un'immensa riserva energetica da poter sfruttare, visto che la superficie del pianeta occupata da mari e oceani è pari a circa l'80% di quella totale. L'energia marina richiede tecnologie e approfondimenti specifici diversificati in base alle sue diverse forme, che sono legate a: (i) gradienti salini; (ii) gradienti termici; (iii) biomassa marina; (iv) maree; (v) correnti marine e correnti di marea; (vi) onde.

La presente attività di ricerca si è concentrata sull'energia marina associata al moto delle onde, con particolare riferimento a quella estraibile nell'ambito delle strutture portuali. Tra le fonti di energia rinnovabile, l'energia del moto ondoso è attualmente quella più studiata ma anche meno sfruttata rispetto alle sue potenzialità, nonostante i numerosi brevetti e prototipi esistenti. Le difficoltà nell'impiego di tale energia sono dovute principalmente all'imprevedibilità degli eventi estremi, che possono portare anche al danneggiamento delle strutture costiere e dei dispositivi ivi contenuti.

In quest'ottica, vengono di seguito discusse le caratteristiche principali del moto ondoso e dei sistemi WEC utilizzabili per il suo sfruttamento, in modo da fornire una panoramica di carattere generale necessaria per individuare le problematiche specifiche dei sistemi WEC. Si precisa che tali sistemi sono attualmente nella fase di sviluppo sperimentale: essi sono stati ampiamente studiati in laboratorio mediante modelli fisici in scala e, solo in alcuni casi, qualche prototipo è stato installato in mare.

2.2. Il moto ondoso come fonte di energia

L'energia del moto ondoso rappresenta una fonte di energia che non implica la produzione di sostanze di scarto durante la fase di produzione, è dunque da considerare una fonte di energia rinnovabile.

L'energia ondosa è dovuta al trasferimento dell'energia del vento sulla superficie del mare. In particolare, le onde sono generate dall'azione combinata di forze instabilizzanti e stabilizzanti rispetto alla condizione di fluido in quiete: le prime sono esplicate dall'azione dei venti che soffiano sulla superficie dell'acqua, deformandola; le seconde sono la forza di gravità e quella di tensione superficiale, che si oppongono alla deformazione, tendendo quindi a ripristinare l'equilibrio (Dean e Dalrymple, 1991).

Il fenomeno di propagazione delle onde è accompagnato solo da un trasporto di energia, ma non della massa d'acqua, la cui superficie libera si limita appunto ad oscillare. Clement et al. (2002) affermano che il flusso di energia ondosa è in grado di viaggiare per lunghe distanze subendo solo una piccola perdita di energia. Tale flusso di energia ondosa è esprimibile in termini di potenza per metro lineare di fronte d'onda ed è misurato in kW/m.

La piccola perdita di energia del flusso e la capacità predittiva del moto ondoso, di gran lunga maggiore rispetto a quella del vento, consentono quindi di stimare in modo affidabile la produzione di energia dei WEC (Clement et al., 2002; Lopez et al., 2013).

Inoltre, il moto ondoso presenta diversi vantaggi raccolti da Zanuttigh e Angelelli (2011), ed elencati di seguito:

- maggiore diffusione e densità di energia rispetto ad altre fonti rinnovabili come il vento e le maree;
- variabilità oraria e giornaliera minore rispetto a quelle di altre risorse rinnovabili, come il vento, il sole o le correnti oceaniche;

- variazione stagionale che segue il trend del consumo di energia elettrica nell'Europa occidentale;
- affidabilità con la quale i livelli ondosi, in una specifica località, possano essere previsti con largo anticipo;
- possibilità di sfruttare ampie superfici oceaniche di molti chilometri quadrati;
- possibile integrazione con l'energia eolica, in quanto in presenza di vento si ha la contemporanea generazione delle onde marine sulla superficie libera;
- basso impatto ambientale e visivo che ha la maggior parte dei dispositivi per la trasformazione di energia da onda, quasi invisibili sopra la linea dell'orizzonte, rispetto ad esempio alle turbine eoliche.

Per migliorare la produzione di energia dei WEC, tali vantaggi devono essere valutati insieme alle caratteristiche del moto ondoso nelle diverse zone del globo. Una caratteristica del moto ondoso è la sua notevole variabilità geografica, tra i diversi siti, ed elevata variabilità temporale, in uno stesso sito. Cornett (2008) afferma che sono preferibili siti caratterizzati da onde più stabili e moderate rispetto a siti molto energetici che non vantano una costanza del regime delle onde. Lopez et al. (2013) motiva questa affermazione con la considerazione che siti con elevata energia possono provocare il danneggiamento dei WEC installati e che questi sistemi devono lavorare nelle condizioni di massima efficienza, in stabili range di periodo e altezza d'onda.

La variabilità temporale è espressa da Cornett (2008) attraverso il coefficiente di variazione (COV), definito come il rapporto tra la deviazione standard della potenza dell'onda nell'intervallo temporale di riferimento $\sigma(P(t))$ e il valore medio della potenza nello stesso intervallo $\mu(P(t))$:

$$COV = \frac{\sigma(P(t))}{\mu(P(t))} \quad (2.1)$$

Le variabilità geografica (Figura 2.1) e temporale (Figura 2.2) del moto ondoso riportate da López et al. (2013), sono ottenute da uno studio di Cornett (2008) appositamente condotto sugli Oceani per il decennio 1997-2006.

La Figura 2.1 mostra che le zone oceaniche più ricche di energia sono comprese tra i 40° e i 60° di longitudine, in entrambi gli emisferi, e che tra i due emisferi la zona più ricca energeticamente appartiene all'emisfero australe.

La Figura 2.2 mostra che la zona più energetica dell'emisfero australe ha una minore variabilità, espressa con un valore minore di COV, rispetto alla corrispondente zona dell'emisfero boreale. Di conseguenza, l'emisfero meridionale è più stabile e più energetico di quello settentrionale. La fascia equatoriale è invece caratterizzata da una bassa disponibilità di energia e una elevata stabilità.

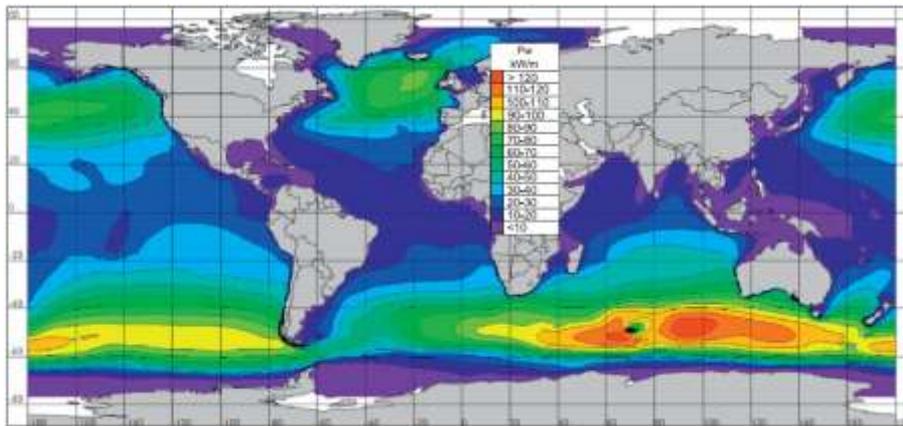


Figura 2.1: Stima della potenza ondosa media annuale a livello globale, espressa in kW/m, per il decennio 1997-2006 (López et al., 2013).

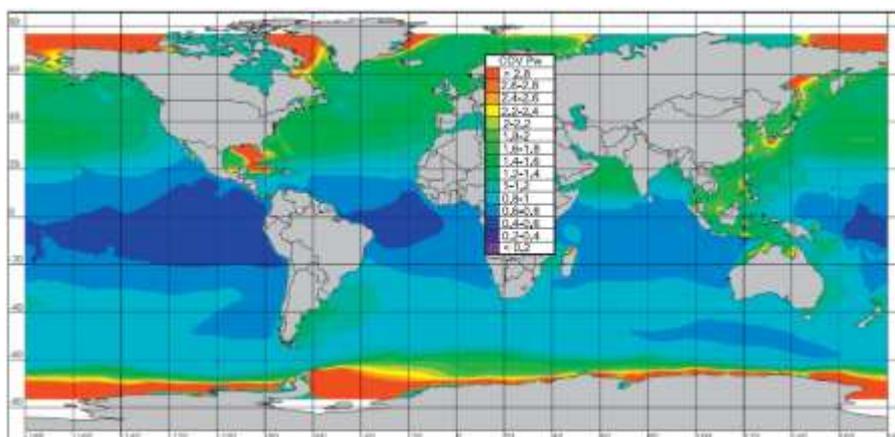


Figura 2.2: Variabilità temporale del moto ondoso espressa mediante il coefficiente di variazione (López et al., 2013).

Tra gli studi condotti sull'energia ondosa disponibile a livello globale, si inserisce quello di Mork et al. (2010), considerato lo stesso decennio 1997-2006, in cui sono indicate come zone particolarmente energetiche la parte meridionale del sud America e le coste atlantiche europee (Figura 2.3).

La Figura 2.3 mostra che la costa occidentale dell'Europa ha una disponibilità totale di flusso di energia ondosa pari a circa 290GW, con valori massimi di 75kW/m sulle coste dell'Irlanda e della Scozia.

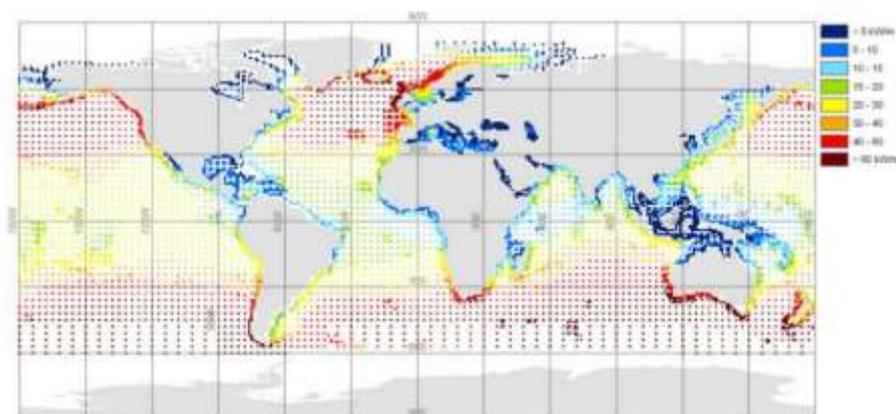


Figura 2.3: Distribuzione globale del flusso medio di energia espresso in kW/m (Mork et al., 2010).

In definitiva, lo sfruttamento del moto ondoso come fonte di energia è quindi particolarmente sostenibile perché unisce una elevata disponibilità diffusa geograficamente ad un ridotto impatto ambientale e visivo.

2.3. Energia disponibile lungo le coste italiane

La stima dell'energia ondosa nel mediterraneo è condotta da Liberti et al. (2013) considerando il decennio 2001-2010. Come si vede dalla Figura 2.4, il livello energetico annuale disponibile è compreso tra i 4 e gli 11 kW/m ed è di un ordine di grandezza inferiore a quello degli Oceani. L'area energeticamente più importante del Mediterraneo è compresa tra la Sardegna e le Isole Baleari, con valori pari a circa 12 kW/m sulle coste della Sardegna occidentale in corrispondenza di Cagliari. Risulta essere particolarmente energetica anche l'area compresa tra la Sicilia occidentale e le coste Nord dell'Africa, con valori pari a 9 kW/m di fronte Mazara del Vallo (TP) (Figura 2.5). Studi simili sono stati condotti da molti come Vicinanza et al. (2009 e 2011), Iuppa et al. (2015), Monteforte et al. (2015) e Arena et al. (2015).

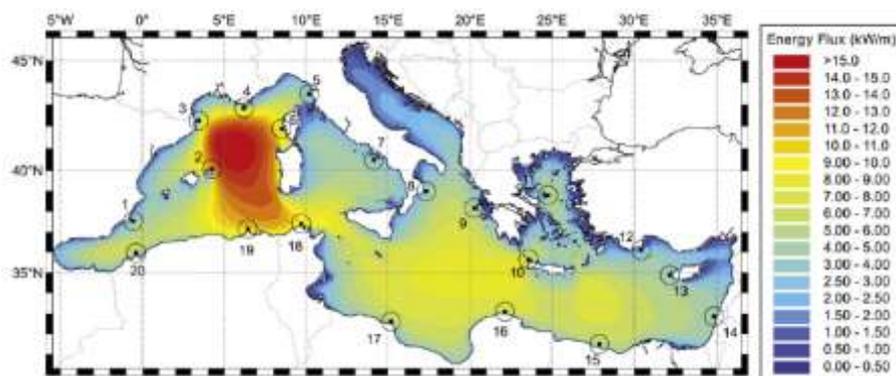


Figura 2.4: Distribuzione del flusso medio di energia nel bacino del Mediterraneo. (Liberti et al., 2013).

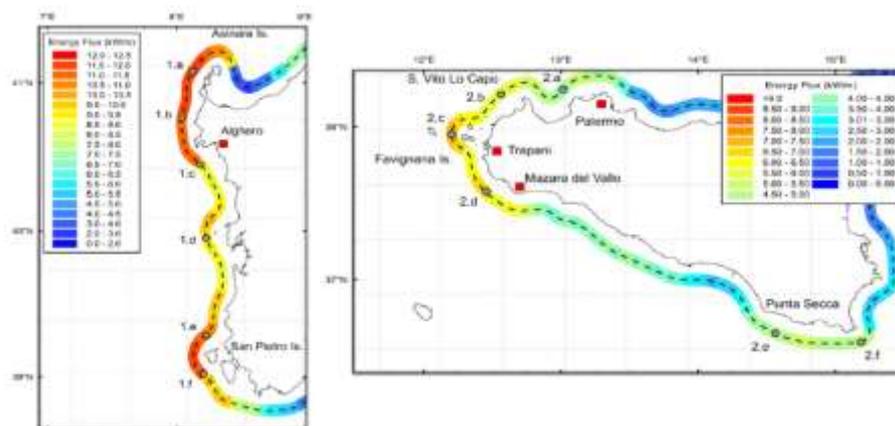


Figura 2.5: Distribuzione del flusso medio di energia per le isole maggiori del bacino del Mediterraneo: Sardegna a sinistra e Sicilia a destra, ad una distanza di 12km dalla costa (Liberti et al., 2013).

È evidente che la distribuzione dell'energia vari con le stagioni, ed è maggiore nei mesi invernali rispetto a quelli estivi. La Figura 2.6 mostra la distribuzione spaziale del coefficiente di variazione COV nei mari attorno all'Italia, con valori superiori a 0,2 lungo le coste maggiormente esposte. In particolare, i valori COV maggiori si osservano nel Tirreno Meridionale ($COV > 0,4$) ed in alcune parti dello Ionio. Lungo le coste occidentali della Sardegna e le coste nord-occidentali e meridionali della Sicilia, i valori di COV sono minori di 0,25, comportando quindi condizioni più stabili e, per quanto precedentemente discusso, favorevoli alla produzione di energia con i sistemi WEC.

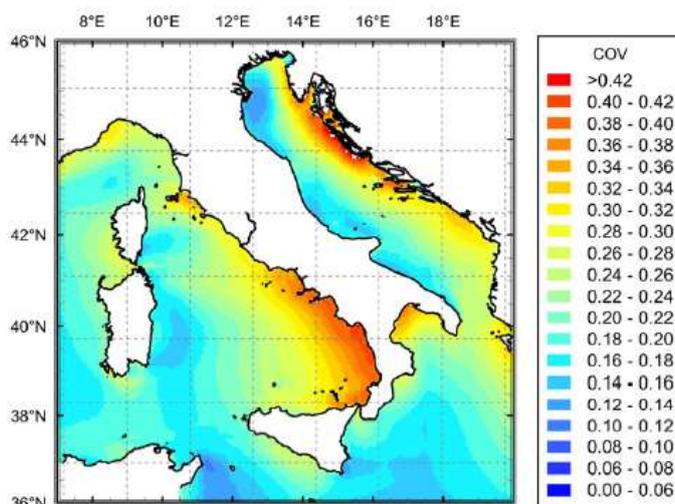


Figura 2.6: Distribuzione del coefficiente di variazione COV della potenza media annuale attorno all'Italia nel decennio 2001-2010, considerato da Liberti et al. (2013).

In definitiva, le coste del bacino del Mediterraneo, pur non presentando gli elevati livelli di energia ondosa dell'emisfero australe o del nord Europa, sono indicate per l'installazione dei sistemi WEC, grazie ai ridotti valori di COV che garantiscono maggiore stabilità ondosa. In particolare, l'Italia, compresa delle isole, ha una conformazione geografica con circa 7500km di fronte mare (dato ISTAT, 2010). Gran parte della popolazione vive nelle vicinanze della costa, dove si concentra il maggior consumo di energia elettrica. Dal momento che il moto ondoso può essere sfruttato sia a largo (*offshore*) che sulla costa (*onshore*), la conversione di tale risorsa energetica potrebbe soddisfare gran parte della domanda.

2.4. Classificazione dei sistemi WEC per la conversione di energia dal moto ondoso

Lo sfruttamento dell'energia delle onde di mare può avvenire mediante adeguati sistemi di conversione (WEC), che consentono di produrre elettricità da poter impiegare per gli usi comuni. Le tipologie di WEC brevettate sin dal 1799

(Falcao, 2010) sono molteplici: Buccino et al., (2015), affermano che i dispositivi classificati come WEC sono più di 1000. Per tale motivo, è stata svolta un'accurata ricerca bibliografica al fine di cogliere informazioni sui diversi sistemi di conversione dell'energia dal moto ondoso, classificandoli.

È importante evidenziare la varietà dei sistemi esistenti e che i maggiori investimenti e contributi scientifici in questo campo sono di origine nord europea e giapponese.

La descrizione e la classificazione dei sistemi WEC viene di solito fatta in funzione delle caratteristiche del sistema e della posizione rispetto alla costa. Lopez et al. (2013), ad esempio, definisce una classificazione basata sulla: (i) localizzazione dei sistemi rispetto alla costa in funzione della profondità d'acqua distinguendo a largo, vicino o sulla costa; (ii) tipologia di sistema in base alla direzione dell'onda; (iii) principio di funzionamento rispetto al moto ondoso.

Non sempre tali classificazioni riescono a rappresentare tutti i sistemi WEC in modo univoco. Per tale ragione viene qui delineato un quadro dettagliato di tali sistemi, proponendo un'ulteriore classificazione. Si è scelto di raggruppare i WEC in funzione della:

- localizzazione rispetto alla costa, analogamente a Lopez et al. (2013);
- struttura del sistema;
- tipologia del sistema, come riportato dal sito dell'EMEC The European Marine Energy Center Ltd (<http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/>).

La localizzazione rispetto alla costa (Lopez et al., 2013) fa riferimento alla profondità d'acqua d , rispetto alla quale il dispositivo è installato. In questo modo si distinguono sistemi *onshore* se collocati a profondità $d < 10\text{m}$, *nearshore* se $d < 25\text{m}$ e *offshore* se $d > 40\text{m}$ (Figura 2.7).

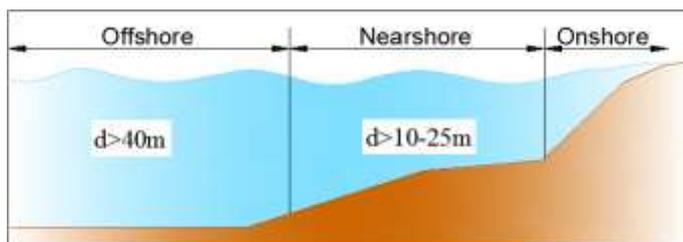


Figura 2.7: Rappresentazione della localizzazione dei dispositivi rispetto la costa (Lopez et al., 2013).

La configurazione strutturale del sistema, proposta sulla base di valutazioni effettuate su oltre 300 sistemi trovati in letteratura, può afferire alle seguenti classi: (i) galleggiante con struttura del sistema galleggiante; (ii) ancorata, se la struttura è galleggiante ma ancorata al fondo; (iii) sommersa; (iv) struttura fissa. La tipologia del sistema, come si vede in Figura 2.8, è indicativa delle sue caratteristiche funzionali (sito dell'EMEC The European Marine Energy Center Ltd <http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/>). Sulla base della sua tipologia, ciascun sistema WEC può essere classificato come segue:

- Attenuatore, è un sistema galleggiante che opera parallelamente alla direzione delle onde catturando l'energia dal movimento relativo dei due bracci;
- Assorbitore puntuale, è una struttura galleggiante che assorbe energia da tutte le direzioni di provenienza delle onde e converte energia dal movimento del galleggiante superiore rispetto alla base;
- Convertitore moto ondoso oscillante (Oscillating Wave Surge Converter), estrae energia da picchi d'onda e dal movimento delle particelle di acqua; il braccio oscilla come un pendolo montato su un giunto in risposta al movimento delle onde nell'acqua;
- A colonna d'acqua oscillante (Oscillating Water Column OWC), è costituito da una camera d'aria in cui la variazione del livello del mare induce la compressione e la decompressione dell'aria che passa

attraverso una turbina ad aria; il sistema utilizza una turbina bidirezionale, adatta alla rotazione indipendentemente dalla direzione del flusso d'aria;

- A tracimazione, è un sistema che cattura l'onda che risale da una rampa, l'acqua viene restituita al mare passando attraverso una turbina convenzionale che genera energia;
- A pressione differenziale, è un sistema in cui il movimento delle onde causa la variazione del livello del mare sopra di esso, inducendo un differenziale di pressione nel dispositivo;
- Sistema a protuberanza d'onda (Bulge Wave), è costituito da un tubo di gomma nel quale l'acqua entra attraverso la poppa e il passaggio dell'onda provoca variazioni di pressione lungo la lunghezza del tubo, creando un "rigonfiamento". Il rigonfiamento viaggia attraverso il tubo, raccogliendo energia che viene utilizzata per azionare una turbina di bassa prevalenza situata a prua, attraverso cui l'acqua ritorna quindi al mare;
- Sistema a massa rotante, utilizza due forme di rotazione per catturare l'energia: il movimento ondeggiante del dispositivo e l'ondeggiamento delle onde. In entrambi i casi il movimento è collegato ad un generatore elettrico all'interno del dispositivo;

Se un dispositivo WEC ha un design unico e molto diverso dalle tecnologie esistenti o se non è stato possibile determinare le informazioni sulle caratteristiche del dispositivo stesso, viene catalogato come "Altro" .

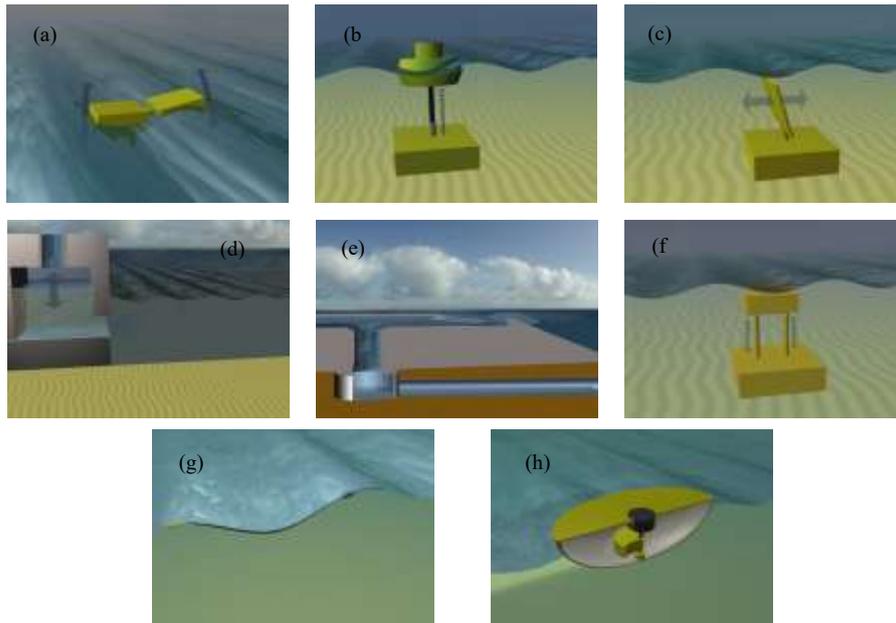


Figura 2.8: Classificazione dei sistemi WEC per tipologia su circa 170 sistemi (sito dell'EMEC The European Marine Energy Center Ltd <http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/>): (a) attenuatore; (b) assorbitore puntuale; (c) convertitore moto ondoso; (d) colonna d'acqua oscillante (OWC); (e) tracimazione; (f) pressione differenziale; (g) protuberanza d'onda; (h) massa rotante.

È evidente che un sistema non rientra univocamente in una sola delle precedenti classificazioni, ma in una combinazione di esse in funzione delle sue caratteristiche. La Figura 2.9, proposta da Lopez et al. (2013), fornisce una sommaria classificazione dei sistemi WEC, fornendo un'idea della complessità e varietà di tipologie esistenti.

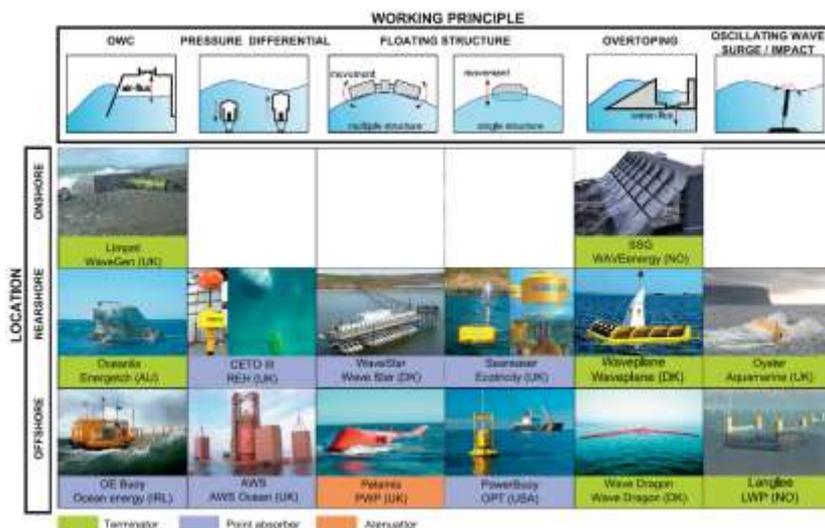


Figura 2.9: Classificazione dei WECs proposta da Lopez et al. (2013) in funzione della posizione rispetto alla costa (ordinata), del principio di funzionamento (ascissa) e della posizione rispetto alla direzione di provenienza delle onde (variazione di colori).

2.5. Dispositivi WEC integrabili in strutture portuali

La presente attività di ricerca pone particolare attenzione ai sistemi che ben si integrano nelle strutture portuali. Tali sistemi sono principalmente di tre tipi: sistemi a tracimazione (overtopping), sistemi a colonna d'acqua oscillante (OWC) e sistemi a colonna d'acqua oscillante modificati (U-OWC).

Data la loro conformazione, i sistemi a tracimazione, sono spesso impiegati nelle dighe a gettata, mentre i sistemi OWC e U-OWC (entrambi a colonna d'acqua oscillante) sono integrabili nelle dighe a parete verticale.

È recente l'installazione di un sistema a tracimazione OBREC nel porto di Napoli interrata in una diga a gettata, come riportato in Figura 2.10. **L'origine riferimento non è stata trovata.** (Iuppa et al., 2016).

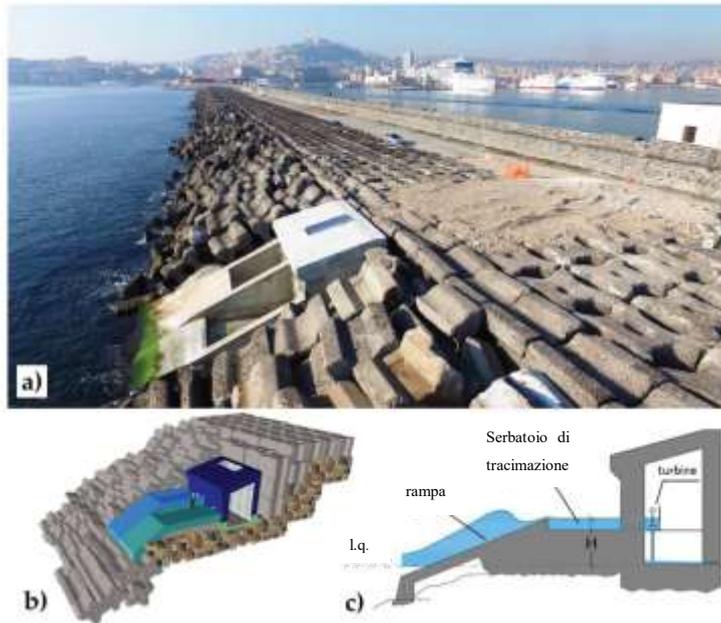


Figura 2.10: Prototipo OBREC integrato in una diga a scogliera: (a) foto del prototipo installato nel porto di Napoli; (b) componenti strutturali del prototipo; (c) principio di funzionamento (Iuppa et al., 2016).

I sistemi a colonna d'acqua oscillante sono costituiti da una camera a tenuta stagna, in cui la parete frontale è forata nella zona bassa. Attraverso tale foro, la camera entra in comunicazione con il moto ondoso che causa la variazione della superficie libera dentro la camera stessa. A seguito dell'arrivo dell'onda si ha quindi la compressione e decompressione dell'aria nella camera stagna (Figura 2.11), l'aria viene veicolata verso una turbina autorettificante in grado di funzionare in entrambe le direzioni di flusso, come la turbina Wells (Figura 2.12). Questi sistemi, in base alla classificazione precedente possono essere collocati sia *offshore* che *nearshore*. In particolare, quelli *offshore* possono essere con struttura del tipo galleggiante o ancorata, mentre quelli *nearshore* sono quasi sempre collocati in strutture fisse, quali i porti.

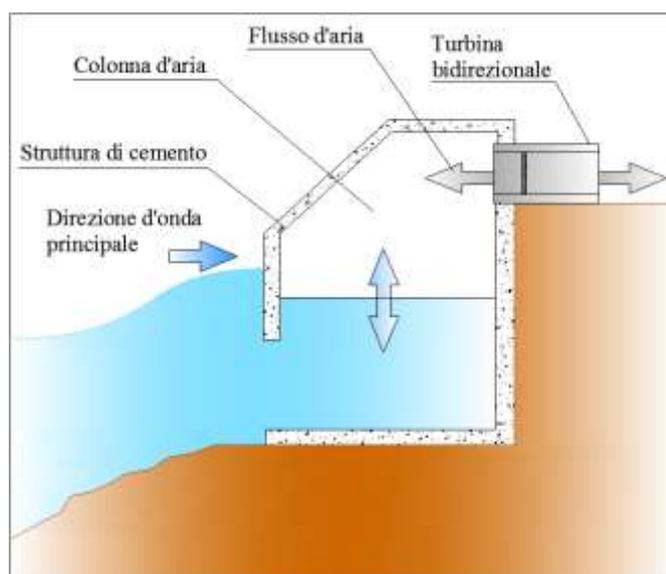


Figura 2.11: Sezione schematica di un dispositivo a colonna d'acqua oscillante o OWC (Dzhonova – Atanasova et al., 2013).

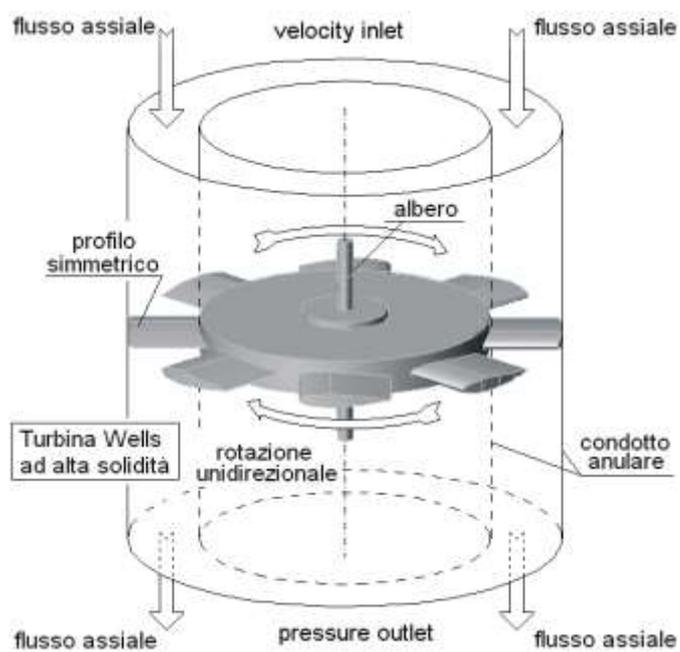


Figura 2.12: Schematizzazione di una turbina ad aria di tipo Wells (Torresi et al., 2006).

Il sistema U-OWC (Boccotti, 2004) è un OWC modificato con una parete frontale davanti l'imboccatura dell'OWC (Figura 2.13), al fine di incrementare il periodo di oscillazione del sistema, rendendolo prossimo al periodo delle onde di mare, massimizzando così il rendimento del dispositivo.

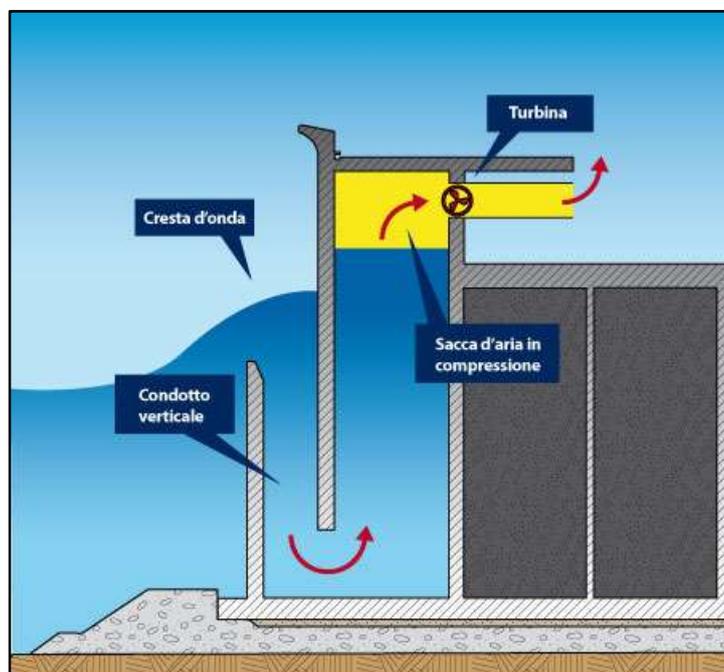


Figura 2.13: Sezione schematica di un dispositivo a colonna d'acqua oscillante modificato o U-OWC (<http://www.wavenergy.it/>).

3. I SISTEMI A COLONNA D’ACQUA OSCILLANTE

3.1. Generalità

Il sistema a colonna d’acqua oscillante, noto come OWC, è particolarmente versatile poiché può essere collocato sia *offshore* che *nearshore*, può essere sia a struttura galleggiante che fisso e può essere installato nelle dighe a parete verticale. Questo lo rende particolarmente interessante per le applicazioni nei porti.

Tali applicazioni necessitano di studi approfonditi che trovano fondamento negli studi di letteratura. Di seguito si fa riferimento allo stato dell’arte degli OWC considerando le principali problematiche affrontate in letteratura e utilizzate durante l’attività di ricerca

3.2. Storia degli OWC

L’ideatore dei sistemi OWC è stato Yoshio Masuda (1925-2009). Egli realizzò nel 1940 una boa di navigazione equipaggiata con una turbina ad aria, corredata da valvole di non ritorno per garantirne la rotazione in un solo senso, in cui l’elettricità prodotta serviva ad alimentare la luce segnalatrice della boa stessa (Masuda, 1971). Successivamente, lo stesso Masuda (1979) promosse la realizzazione di una gigantesca piattaforma galleggiante a ovest dell’arcipelago giapponese, denominata Kaimei, che servì a testare numerose turbine ad aria e configurazioni delle valvole di rettifica (Falcao, 2010).

Un quadro generale dei sistemi OWC è presentato da Falcao e Henriques (2015). Il primo impianto a scala reale fu realizzato in Norvegia nel 1985 a ridosso di una scogliera a Toftestallen ed equipaggiato da una turbina Wells. Esso fu dismesso

qualche anno dopo la sua realizzazione a causa di una tempesta che distrusse la connessione tra la struttura metallica e la fondazione. Nel 1990, fu realizzato il primo sistema OWC, equipaggiato da una turbina Wells ed integrato nell’opera di difesa costiera del porto di Sakata, in Giappone.

In Europa, a seguito della decisione della Commissione Europea di annoverare l’energia del moto ondoso nel programma di Ricerca e Sviluppo sulle fonti rinnovabili nel 1991, furono realizzati due impianti pilota. Il primo (Figura 3.1.a) fu installato nell’isola di Pico, nelle Azzorre in Portogallo, con dimensioni $3,66\text{m} \times 12\text{m}^2$. Fu terminato nel 1999 e dotato di una turbina Wells, era progettato per produrre 400kW (Falcao, 2000). L’altro impianto pilota, installato nel 2000 nell’isola di Islay in Scozia, è il LIMPET 500 (Land Installed Marine Powered Energy Trasformer) sviluppato da Wavegen. Esso si compone di tre colonne d’acqua oscillanti poste in una cavità artificiale, costituita da un piano inclinato di 40° rispetto l’orizzontale, per una lunghezza totale di 21m (Figura 3.1.b). Esso è dotato di due turbine Wells per una potenza nominale di 500kW (Heath et al., 2000). Sembrerebbe che la camera inclinata faciliti l’ingresso e l’uscita dell’acqua dalla camera stessa, provocando meno turbolenza e minori perdite di energia (Brooke, 2003).

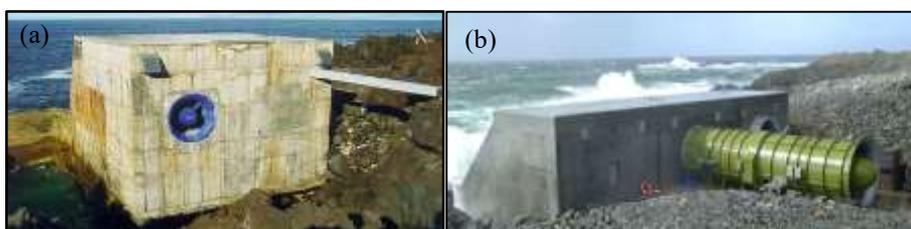


Figura 3.1: (a) Vista posteriore del dispositivo OWC, PICO; (b) Schema rappresentativo del dispositivo OWC, LIMPET 500 (Falcao e Henriques, 2015).

Un sistema OWC a scala reale è stato installato a Mutriku nel Nord della Spagna (Figura 3.2), grazie all’interesse del governo Basco nei confronti delle tecnologie rinnovabili. Come descritto da Torre Enciso et al. (2009), la diga ospita per circa

100m della sua lunghezza 16 cassoni OWC, disposti secondo un raggio di curvatura di 220m. I cassoni, costati 4,4 milioni di euro, hanno forma trapezoidale di circa 6x12m. In esso sono stati installati 16 turbogeneratori di potenza massima nominale pari a 18,5kW, per un totale di 296kW, ed un costo di 2 milioni di euro. La produzione energetica prevista dal sistema era 600MWh/anno. A causa dei danni riportati alla struttura a seguito di mareggiate molto violente, il sistema attualmente risulta dismesso.



Figura 3.2: Foto della diga di Mutriku (Spagna) con all'interno il dispositivo OWC (Torre Enciso et al., 2009).

La stabilità strutturale delle opere rappresenta dunque un punto debole dei sistemi OWC. Per tale ragione, lo studio dei prototipi e della loro rottura durante il funzionamento è rilevante per la valutazione dei parametri e degli aspetti che ancora possono essere investigati al fine di garantire la durabilità delle strutture.

3.3. Periodo proprio di oscillazione

Uno degli aspetti principali dell'interazione tra le onde e gli OWC è rappresentato dall'idrodinamica all'interno della camera pneumatica. In

particolare, l'interazione tra l'aria e l'acqua è strettamente legata al volume d'aria inizialmente presente all'interno di tale camera e alle caratteristiche della turbina (PTO, dall'inglese Power Take Off).

L'andamento dei flussi d'acqua e d'aria all'interno della camera è legato sia alla geometria dell'OWC sia alle condizioni ondose incidenti. L'analisi separata di tutti questi aspetti difficilmente coglie il comportamento complessivo del sistema, soprattutto in piccola scala; è dunque necessario seguire un approccio olistico. Questo tipo di approccio allo studio dei sistemi OWC è stato applicato da Boccotti (2007), il quale introduce il concetto di periodo proprio di oscillazione della colonna d'acqua mediante lo sfasamento temporale T^* tra il flusso all'interno della camera q e la pressione esercitata dall'onda Δp sulla parte più bassa della parete anteriore, all'imboccatura della camera.

Nel caso di onde irregolari q e Δp non sono periodici e il loro sfasamento può esprimersi, essendo somma di componenti periodici, attraverso una correlazione tra la pressione e il flusso d'acqua:

$$\psi(T) = \langle \Delta p(t)q(t + T) \rangle \quad (3.1)$$

dove le parentesi angolari esprimono la media nel tempo (t); T è una ulteriore variabile di tempo, indipendente da t . Lo sfasamento temporale T^* è pari al valore di T corrispondente al massimo della correlazione $\psi(T)$. A sua volta, il periodo proprio di oscillazione del sistema è pari a $4T^*$ (Arena et al., 2015) ed è possibile definire un coefficiente di risonanza:

$$R = \frac{4T^*}{T_p} \quad (3.2)$$

dove T_p è il periodo di picco dell'onda. Se il periodo di picco è vicino al periodo proprio di oscillazione, il dispositivo funziona vicino alla condizione di risonanza e tale condizione consente di ottenere il massimo tasso di conversione dell'energia. Per massimizzare la conversione dell'energia dell'onda, il coefficiente di risonanza R deve essere vicino all'unità. Se il coefficiente di

risonanza è superiore all'unità, il periodo di oscillazione del sistema è maggiore del periodo di picco delle onde. Al contrario, se il valore è inferiore all'unità, il periodo proprio del sistema è inferiore a quello delle onde. Il periodo proprio del sistema è particolarmente utile per trovare la configurazione geometrica ottimale del sistema da installare in uno specifico sito.

3.4. Coefficiente di riflessione

L'interazione dell'onda con la struttura ed il comportamento del sistema ha un effetto immediato sulla agitazione ondosa all'esterno dell'OWC, che è valutabile mediante il coefficiente di riflessione. Tale coefficiente è definito come il rapporto tra l'onda riflessa e quella incidente alla struttura. Esso rappresenta uno dei parametri fondamentali per la progettazione delle dighe portuali in quanto rappresenta un indicatore del moto ondoso in prossimità del porto.

In generale, nelle modellazioni fisiche il coefficiente di riflessione è valutabile attraverso i noti metodi delle due sonde (Goda e Suzuki, 1976) e delle tre sonde (Mansard e Funke, 1980), o il più recente metodo delle quattro sonde (Faraci et al., 2015). Tali metodi definiscono la sopraelevazione dell'onda come somma delle due quantità incidente e riflessa, espresse nella forma complessa come segue:

$$\eta = \sum_{n=-N}^N [f_{In} e^{i(\omega_n t - k_n x)} + f_{Rn} e^{i(\omega_n t + k_n x)}] \quad \text{per } n \neq 0, (\omega_n, k_n) \neq 0 \quad (3.3)$$

con i unità immaginaria, t variabile temporale, x direzione di propagazione delle onde incidenti, ω_n frequenza angolare della n -esima componente armonica, k_n numero d'onda della n -esima componente armonica. Inoltre, f_{Rn} e f_{In} sono quantità complesse che contengono l'ampiezza e la fase rispettivamente dell'onda riflessa e incidente attraverso le misurazioni della sopraelevazione dell'onda. Queste quantità complesse vengono ottenute dalle sopraelevazioni registrate dagli strumenti in m differenti posizioni, attraverso l'impiego di altrettante differenti

sonde collocate lungo il canale. Con l’impiego della trasformata di Fourier, è possibile definire un sistema lineare di m equazioni con le due quantità complesse incognite f_{Rn} e f_{In} . I metodi sopra citati forniscono, inoltre, dei propri limiti di applicazione secondo cui le sonde devono essere posizionate ad una distanza tale per cui il determinante del sistema non sia nullo.

In definitiva, il coefficiente di riflessione si ottiene confrontando le due quantità trovate. In particolare, è possibile definire il coefficiente di riflessione spettrale $C_{r(f)}$, funzione della frequenza f delle componenti dello spettro:

$$C_r(f) = \frac{|f_{Rn}|}{|f_{In}|} \quad (3.4)$$

Inoltre, si può definire il coefficiente di riflessione complessivo C_r di un treno d’onde irregolari, pari al rapporto sotto radice quadrata delle somme degli spettri (Goda, 2000):

$$C_r = \sqrt{\frac{\sum_{n=n_1}^{n_2} |f_{Rn}|^2}{\sum_{n=n_1}^{n_2} |f_{In}|^2}} \quad (3.5)$$

dove n_1 e n_2 sono i limiti inferiore e superiore delle componenti dello spettro, utilizzati per calcolare il coefficiente di riflessione.

Il coefficiente di riflessione è compreso idealmente tra 0 ed 1. Nelle dighe a parete verticale investite da onde irregolari è circa 0,9 secondo Allsop et al. (1994 e 1999). I risultati ottenuti in letteratura sui sistemi OWC mostrano valori di coefficiente di riflessione minori rispetto a quelli relativi alla parete verticale, generalmente pari a circa 0,5 (Takahashi, 1988). Zanuttigh et al. (2009) ottengono coefficienti di riflessione compresi tra 0,3 e 0,55, valutando anche l’influenza della lunghezza d’onda su tale coefficiente. Secondo Ashlin et al. (2016), i valori del coefficiente di riflessione del moto ondoso davanti a un OWC sono compresi tra 0,2 e 0,7, in funzione delle diverse conformazioni del fondo della camera e minori per quella arrotondata.

In generale, è possibile affermare che quando il sistema OWC è prossimo alle condizioni di diga a parete verticale, il suo coefficiente di riflessione tende a crescere fino al valore 0,9. Oltre all'influenza della lunghezza d'onda e della forma del fondo della camera, altri parametri geometrici influenzano il coefficiente di riflessione. Valutare tali condizioni in modo da ottenere il minimo valore di riflessione è vantaggioso anche ai fini energetici in quanto il coefficiente di riflessione, sulla base del bilancio di energia complessivo dell'OWC, fornisce informazioni indirette anche sul rendimento del sistema al netto delle dissipazioni di energia al suo interno (Tseng et al., 2000).

3.5. Pressioni e forze

La stabilità strutturale dei sistemi OWC è valutabile sulla base dell'interazione dell'onda con la struttura attraverso l'analisi delle pressioni e delle forze agenti sulla struttura stessa, in termini di valori massimi.

A tale scopo, risulta importante avere a disposizione segnali di pressione e/o forza acquisiti ad elevata frequenza (per esempio 1000 Hz) per consentire una misura affidabile dei picchi di onde impulsive. L'analisi dei dati deve prevedere l'eliminazione del transitorio iniziale, nel caso di onde generate in laboratorio che non hanno ancora raggiunto le condizioni di regime. Al fine di individuare i massimi è possibile selezionare un tratto di segnale corrispondente a 1000 onde. Il valore medio dei primi 4 picchi può essere considerato come valore massimo delle pressioni e di conseguenza dei carichi (Cuomo et al., 2010; Goda, 2000; Contestabile et al. 2017). Tale analisi, decisamente più attendibile da un punto di vista statistico rispetto al considerare solo un massimo, fornisce dei valori chiamati 1/250 perché equivalenti al massimo che si ha ogni 250 onde.

Le registrazioni fornite dalle sonde di pressione in presenza di aria e acqua possono avere dei tratti di segnale disturbato con oscillazioni non fisiche di valori attorno allo zero, come mostrato in Figura 3.3

Figura 3.3 (a). Questo è spesso dovuto proprio all’ingresso d’aria e acqua nel sensore. Risulta essenziale, in tali casi, applicare un filtro numerico per pulire il segnale dal rumore. Ad esempio, il filtro utilizzato da Viviano et al. (2016) funziona in modo che in presenza di forti oscillazioni di segnale, in fase di cavo dell’onda, la pressione sia considerata pari a zero. Ciò è ritenuto lecito in quanto le oscillazioni sono sicuramente causa di un segnale disturbato e non reale. In tal modo, i picchi massimi raggiunti in fase di cresta dell’onda non vengono modificati dal filtro perché sono sempre circondati da valori positivi. L’effetto del filtro si osserva in Figura 3.3

Figura 3.3 (b).

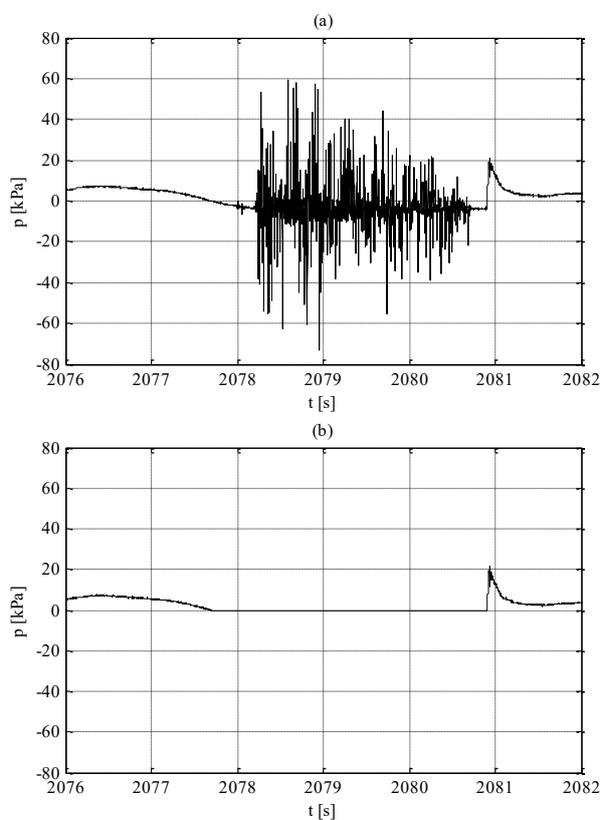


Figura 3.3: Esempio di segnale di pressione: (a) segnale non filtrato affetto dal disturbo dell’aria; (b) segnale filtrato.

Un simile disturbo del segnale di pressione può essere osservato a seguito di picchi dovuti ad onde impulsive. Il segnale può presentare una brusca salita ed una discesa più lenta, andamento tipicamente conosciuto come *church roof*. In questi casi, il segnale di pressione può essere filtrato con la media mobile locale, assumendo che il primo picco del segnale sia il picco impulsivo e la parte discendente sia rumore. Un esempio di tale applicazione è mostrato in Figura 3.4, dove il segnale rosso è quello registrato dalla sonda, in blu è invece riportato il risultato del filtro appena descritto.

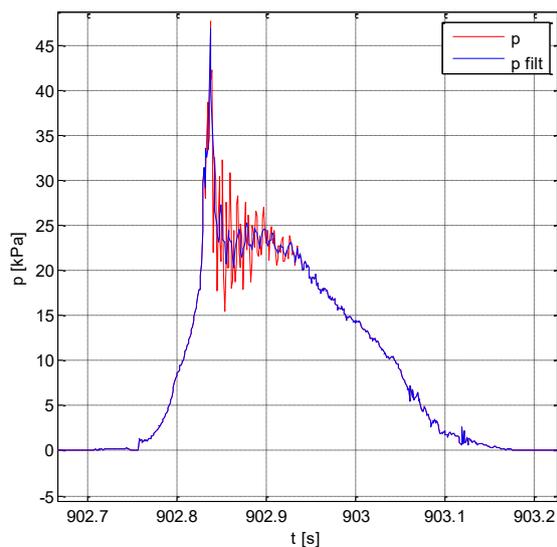


Figura 3.4: Esempio di segnale di pressione dalla caratteristica forma asimmetrica chiamata *church roof*.

Ad oggi non esistono delle formulazioni attendibili per la stima delle azioni sugli OWC. È possibile però utilizzare delle formulazioni di letteratura valide per opere a parete verticale o per cassoni antiriflettenti del tipo Jarlan. Questi ultimi sono geometricamente simili agli OWC in quanto caratterizzati da una camera interna. La differenza principale sta nel fatto che i cassoni Jarlan hanno la apertura della camera sulla parte superiore della parete verticale esterna.

Le più diffuse e attendibili formulazioni per la stima degli impatti delle onde sulle strutture marittime sono state sviluppate da Sainflou (1928), Goda (2000), Takahashi et al. (1994) e Takahashi e Shimosako (1994). I primi due metodi, validi per le opere a parete verticale, possono essere impiegati per la stima delle pressioni agenti sulla parete frontale del cassone.

Il metodo di Sainflou (1928) determina in modo semplificato l'andamento delle pressioni (Figura 3.5) su tutte le facce della struttura di dimensioni prefissate in modo da condurre le verifiche di stabilità, noti i pesi specifici del materiale. Esso prevede la valutazione della pressione al piede della struttura p_{2S} , la pressione al livello di quiete nel caso di cresta d'onda p_{1S} e una nel caso di cavo p_{3S} :

$$p_{2S} = \frac{\rho g H_{m0,i}}{\cosh\left(\frac{2\pi h_s}{L_p}\right)} \quad (3.6)$$

$$p_{1S} = (p_{2S} + \rho g h_s) \frac{H_{m0,i} + \delta_0}{h_s + H_{m0,i} + \delta_0} \quad (3.7)$$

$$p_{3S} = \rho g (H - \delta_0) \quad (3.8)$$

$$\text{con } \delta_0 = \frac{\pi H_{m0,i}^2}{L_p} \coth\left(\frac{2\pi h_s}{L_p}\right) \quad (3.9)$$

in cui ρ è la densità dell'acqua, g l'accelerazione di gravità, $H_{m0,i}$ è l'altezza d'onda incidente, L_p la lunghezza d'onda, h_s la profondità dell'acqua e δ_0 è il set-up (e set-down) dovuto alla cresta (e al cavo) dell'onda.

Tale metodo, valido per onde regolari e irregolari, non può essere adottato in presenza di onde frangenti o di onde che tracimano dalla parete. Inoltre, le relazioni di Sainflou sono state elaborate per opere appoggiate direttamente sul fondo, dunque la presenza dell'imbasamento e l'altezza limitata del muro anteriore necessitano un adeguamento di tale metodo.

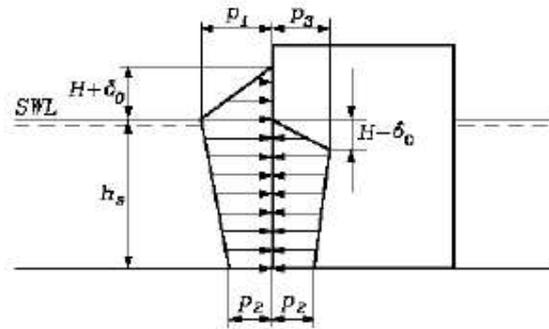


Figura 3.5: Schema di Saintflou per la valutazione delle pressioni agenti su una diga a parete verticale (Saintflou, 1928).

La formulazione proposta da Goda (2000) supera le ipotesi semplificative di Saintflou e tiene conto delle onde frangenti, dell'imbasamento e dell'altezza limitata della struttura, mentre Takahashi et al. (1994) propone una formulazione di Goda modificata per considerare l'effetto delle onde impulsive.

All'interno della camera dell'OWC è possibile applicare la formulazione di Takahashi e Shimosako (1994) sviluppata per la valutazione dei carichi all'interno di un cassone forato del tipo Jarlan.

Entrambi i metodi possono essere applicati al sistema OWC per fornire un confronto con i dati sperimentali ottenuti. In particolare, le forze istantanee per unità di lunghezza possono essere ottenute dai segnali filtrati della pressione, integrandoli lungo la parete anteriore, fino all'elevazione della superficie libera. Tale superficie libera può essere stimata attraverso un'estrapolazione lineare dei valori di sopraelevazione registrati dalle sonde resistive vicine alla struttura.

3.6. Rumore

L'ingresso dell'onda nella camera d'aria provoca la compressione e la decompressione dell'aria e un flusso d'aria che viene veicolato attraverso una turbina.

Il flusso di aria compressa (e decompressa) provoca la propagazione delle onde di pressione che a sua volta produce un rumore. La rumorosità del sistema in fase di esercizio, soprattutto durante la fase in cui viene attivata la turbina per la produzione di energia, è sicuramente un inconveniente del sistema OWC da valutare prima di una sua applicazione in prossimità dei centri urbani. La rumorosità del sistema aumenta in corrispondenza delle onde più energetiche, come evidenziato da Starzmann e Carolus (2013) attraverso uno studio sperimentale mediante un prototipo di OWC dotato di una turbina Wells. In particolare, il rumore viene definito come il livello di potenza sonora L_w , espresso in dB. Tale parametro può essere scritto in funzione di un livello di potenza sonora specifica $L_{w,spec}$, stimato sperimentalmente:

$$L_w = L_{w,spec} + 10 \log \frac{\dot{V}}{\dot{V}_0} + 20 \log \frac{\Delta p_{ts}}{\Delta p_0} \quad (3.10)$$

con \dot{V} portata di volume, \dot{V}_0 portata di riferimento pari a $1\text{m}^3/\text{s}$, Δp_{ts} pressione totale statica e Δp_0 pressione di riferimento, quest’ultima pari a 1Pa . Il livello di potenza sonora specifica $L_{w,spec}$ è considerato pari a 40dB , sulla base di prove sperimentali effettuate con differenti tipi di rotori di turbina.

Tale formulazione è stata dapprima applicata alla turbina a scala reale installata nel LIMPET, considerando sedici stati di mare aventi diverse altezze d’onda e periodi. Il rumore causato dalla turbina è compreso nell’intervallo $120 - 140\text{dB}$ per gli stati di mare considerati e aumenta con l’altezza d’onda.

Gli intervalli di rumore superano la soglia di tolleranza del dolore pari a 125dB (Gin, 1978), rappresentando un problema per l’installazione delle turbine nel sistema OWC per l’applicazione nei porti. Uno degli obiettivi della presente tesi è quello di definire una soluzione al problema del rumore, causato dall’attivazione delle turbine in fase di esercizio del sistema, in modo da ridurre il livello sonoro.

3.7. Rendimento

È importante capire da cosa è influenzato il rendimento dei sistemi OWC e quali sono i parametri geometrici fondamentali all'ottimizzazione del sistema. L'ottimizzazione del sistema, legata al rendimento massimo ottenibile, rappresenta uno degli obiettivi principali della presente ricerca. La letteratura in questo campo risulta essere scarna e insufficiente alla conduzione di uno studio completo su tale aspetto.

Il rendimento del sistema è il prodotto di quello idrodinamico e di quello legato alla turbina ad aria. Il primo è valutabile mediante prove di laboratorio come quelle eseguite da Morris Thomas et al. (2007) e Ashlin et al. (2016). In particolare, Morris Thomas et al. (2007) hanno analizzato rendimenti dei sistemi OWC in funzione della forma dell'imbocco della parete anteriore del sistema. Sono state testate le forme: tondeggiate, rettangolare, rettangolare con profondità di immersione maggiore e rettangolare con larghezza maggiore (Figura 3.6).

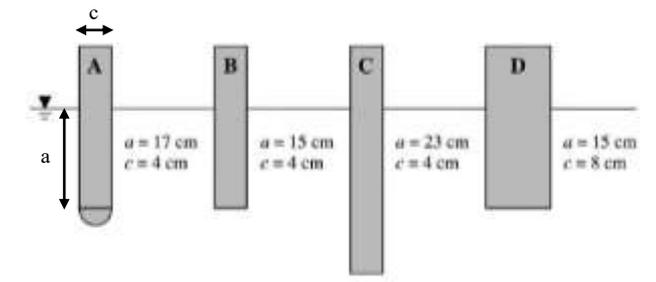


Figura 3.6: Illustrazione schematica della geometria dell'imboccatura della parete anteriore della camera. Con a è indicata la sommersione e con c lo spessore della parete (Morris Thomas et al. 2007).

I risultati sperimentali ottenuti e riportati in Figura 3.7, mostrano che il rendimento maggiore del sistema si ha con la configurazione tondeggiante dell'imboccatura della camera. Dalle altre configurazioni si ottengono valori di rendimento minore. Tuttavia, dato che i valori ottenuti sono concentrati attorno a

0,7 è possibile concludere che la forma dell'imboccatura della camera non è molto influente sul rendimento.

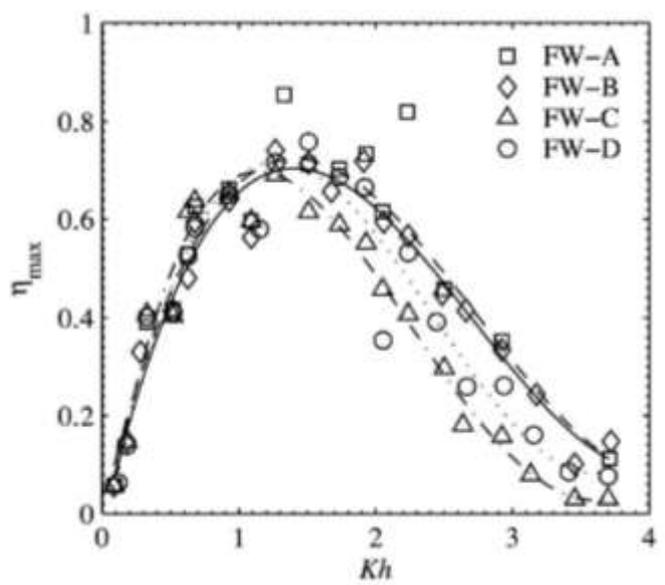


Figura 3.7: Rendimento del sistema OWC per le differenti forme dell'imboccatura della camera rappresentati rispetto al numero d'onda k e alla profondità h (Morris Thomas et al. 2007).

I risultati sono stati confrontati con il metodo di Evans e Potter (1995), ottenendo che tale metodo sovrastima il rendimento del sistema rispetto ai risultati sperimentali.

Ashlin et al. (2016) hanno ottenuto, da dati sperimentali, che il diametro dell'orifizio d_0 influenza significativamente l'efficienza del sistema, simulando con esso la perdita di carico dell'aria dovuta alla presenza della turbina. Affinando la ricerca, gli autori hanno ottenuto un diametro ottimale per il massimo rendimento idrodinamico pari a $A_0/A_c=0,68\%$, con onde regolari. Inoltre, fissando tale rapporto in condizioni di onde irregolari, hanno ricavato che il rendimento idrodinamico maggiore η_{ran} è pari a 0,7, come rappresentato in Figura 3.8 in funzione della profondità relativa d'acqua al cassone d rispetto alla

lunghezza dell'onda L_p . In particolare, tale risultato è ottenuto per differenti forme del fondo del cassone: il massimo valore η_{ran} si ha per una forma del fondo arrotondata.

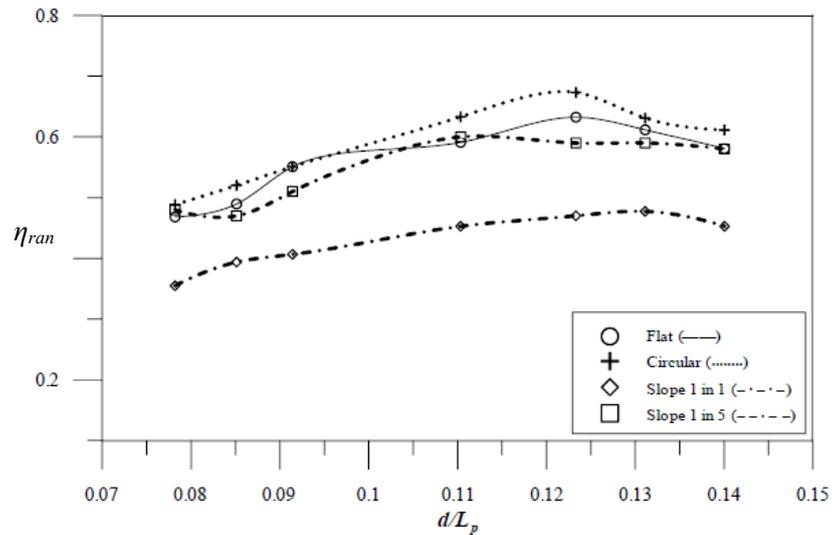


Figura 3.8: Efficienza idrodinamica η_{ran} di un OWC in funzione della profondità relativa d'acqua al cassone d/L_p (Ashlin et al.2016)

Tuttavia non è da escludere che i parametri che influenzano il rendimento del sistema siano anche altri. In tal senso, l'attività di ricerca svolta ha voluto indagare gli ulteriori parametri geometrici al fine di trovare l'ottimo del sistema OWC attraverso l'analisi di dati sperimentali. L'attenzione si è concentrata sui parametri geometrici come l'orifizio che simula la perdita di carico dell'aria dovuta alla presenza di una turbina (PTO), la larghezza della camera, l'altezza della camera e la sommergenza della parete anteriore.

3.8. Idrodinamica all'interno della camera pneumatica

L'interazione tra l'aria e l'acqua all'interno della camera pneumatica di un OWC è un fenomeno caratterizzato da un elevato grado di complessità, in cui particolare importanza assume la presenza della turbina che sfrutta il flusso d'aria

attraverso la camera per estrarre energia dalle onde. Al fine di cogliere i principi che stanno alla base dell'interazione acqua/aria all'interno della camera pneumatica, è possibile adoperare modelli teorici che hanno l'obiettivo di mettere in relazione l'elevazione di superficie con la compressione e decompressione dell'aria.

In letteratura, diversi autori hanno proposto dei modelli teorici per simulare l'interazione delle onde con OWC.

Il modello proposto da Boccotti (2007) è applicato a un U-OWC e ha come obiettivo la stima del flusso all'interno del dispositivo, assumendo di conoscere la sovrappressione d'onda $\Delta p(t)$ sull'apertura del condotto verticale. Egli ipotizza che all'interno dell'U-OWC sia presente una corrente oscillante prodotta dalla sovrappressione d'onda sull'apertura del condotto verticale. In ogni istante t , il flusso d'acqua $Q_p(t)$ in ingresso (o in uscita se negativo) e il flusso di energia assorbito dall'impianto $\phi_p(t)$ deve coincidere rispettivamente con la portata $Q(t)$ e il flusso di energia $\phi(t)$ relativo al moto ondoso agente sul dispositivo:

$$Q_p(t) = Q(t) \quad (3.11)$$

$$\phi_p(t) = \phi(t) \quad (3.12)$$

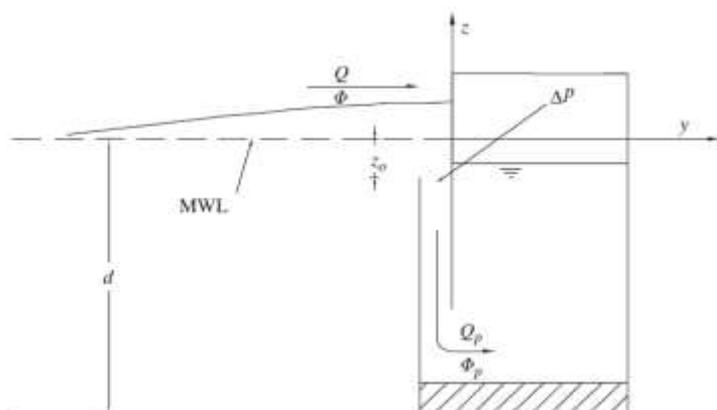


Figura 3.9: Schema del sistema U-OWC con le indicazioni del flusso d'acqua $Q(t)$ e il flusso di energia $\phi(t)$ del moto ondoso agente sul dispositivo e quello assorbito dal sistema (Boccotti, 2007).

La condizione importante per Boccotti affinché siano verificate la (3.11) e la (3.12) è che z_0 sia pari ad un valore z_{0c} chiamato critico e ottenuto risolvendo la seguente equazione:

$$\frac{\cosh[k(d + z_{0c})]}{\cosh(kd)} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right] \quad (3.13)$$

in tal modo le onde in vicinanza del dispositivo saranno periodiche.

L'onda che entra all'interno della diga OWC è diversa dall'onda che riflette su una diga convenzionale. Se l'onda prima della diga è periodica, la variazione di pressione all'apertura del condotto verticale è:

$$\Delta p(t) = \frac{\cosh[k(d + z_0)]}{\cosh(kd)} \eta_B(t) \quad (3.14)$$

dove $\eta_B(t)$ è l'elevazione di superficie davanti al dispositivo. Il flusso di energia assorbito dal dispositivo è uguale al prodotto $\Delta p(t) \times Q_p(t)$. Con l'espressione (3.14) Boccotti mette in relazione la sopraelevazione dell'onda all'esterno della camera con la variazione di pressione all'imbocco del condotto verticale ad U.

La variazione del livello dell'acqua dentro la camera comprime e decomprime la massa d'aria. Le equazioni che descrivono il processo devono tenere conto del problema idrodinamico e di quello termodinamico. L'idrodinamica dentro la camera descrive la sopraelevazione dell'acqua. Fissato il livello medio, il volume dell'acqua contenuta nella camera varia insieme alla sopraelevazione e di conseguenza al volume dell'aria. La variazione del volume è legata alla pressione e alla temperatura dell'aria dalla legge dei gas ideali. Il problema termodinamico può essere considerato un processo isoentropico.

Gervelas et al. (2011) ha sviluppato una formulazione teorica che affronta il problema idrodinamico e quello termodinamico all'interno della camera pneumatica di un OWC, riconducendoli alle seguenti espressioni:

$$\ddot{z} = -0,2 \sqrt{\frac{g}{\alpha + z}} \dot{z} - \frac{g}{\alpha + z} z + \frac{1}{\alpha + z} \sum_{i=1}^N \beta_i a_i \cos(\omega_i t + \phi_i) - \frac{\Delta P}{\rho(\alpha + z)} \quad (3.15)$$

$$\Delta P = -\frac{c_s^2 c_d A_0}{\pi R^2 (h_{a0} - z)} \sqrt{2 \Delta P \rho_{air}} + \gamma \frac{\Delta P + P_{atm}}{h_{a0} - z} \dot{z} \quad (3.16)$$

in cui ΔP è pressione all'interno della camera, P_{atm} pressione atmosferica, γ rapporto di calore specifico, h_{a0} altezza della camera d'aria, z sopraelevazione dell'acqua dentro la camera, c_d coefficiente di contrazione dell'orifizio ottenuto sperimentalmente pari a 0,685, $A_0/\pi R^2$ rapporto di apertura dell'orifizio, c_s velocità del suono nell'aria, ρ_{air} densità dell'aria. In tale formulazione, l'elevazione di superficie e la variazione di pressione all'interno della camera sono rispettivamente deducibili dalle espressioni (3.15) e (3.16). Il modello presuppone la teoria dell'onda lineare e un processo isentropico per l'espansione e la compressione dell'aria, non considerando gli effetti turbolenti all'interno della camera.

I risultati ottenuti da Gervelas et al. (2011) sono in buon accordo con i dati sperimentali forniti da un modello OWC a scala 1:20, con un orifizio utilizzato per simulare il flusso d'aria attraverso la turbina. Tuttavia, tale formulazione matematica non riesce a rappresentare nel dettaglio ciò che avviene nell'OWC e dovrebbe essere ulteriormente validata con dati di laboratorio o di campo.

Precedentemente, Takahashi (1988) aveva esteso il problema originariamente affrontato da Ojima et al. (1984) riconducendolo a due equazioni termodinamiche all'interno della camera e ad una cinematica all'apertura della camera:

$$\frac{dp^*}{dt} = \gamma \frac{p + p_0}{h_a - \eta_T} \left\{ \frac{d\eta_T}{dt} - c_d \varepsilon \omega_p \right\} \quad (3.17)$$

$$\frac{dT_T^*}{dt} = \gamma \frac{T_T^* + T_0}{h_a - \eta_T} \left\{ -\frac{d\eta_T}{dt} + \frac{h_a - \eta_T}{p + p_0} \frac{dp^*}{dt} + c_d \varepsilon \omega_p \right\} \quad (3.18)$$

$$2\eta_I = \frac{1}{\rho_w g} f(kh, kd_c) p + \frac{kB}{\tan kB} \eta_T + \frac{kB}{\sigma} \frac{d\eta_T}{dt} \frac{1}{\cos\vartheta_M} \quad (3.19)$$

$$\omega_p = \pm \varphi \sqrt{\frac{2}{\rho_{air}}} \sqrt{|p|} \quad (3.20)$$

$$f(kh, kd_c) = \frac{2 \cosh kh \sinh k(h - d_c)}{\cosh k(h - d_c) \sinh k(h - d_c) + k(h - d_c)} \quad (3.21)$$

dove p è la pressione all'interno della camera, p_0 la pressione atmosferica, γ esponente della politropica (pari a 1,4), h_a altezza della camera d'aria, η_T la sopraelevazione dell'acqua dentro la camera, c_d il coefficiente di contrazione dell'orifizio, ε il rapporto di apertura dell'orifizio, ω_p la velocità del flusso d'aria all'orifizio stesso, φ il coefficiente di velocità, ρ_{air} la densità dell'aria, T_T^* la temperatura all'interno della camera, T_0 la temperatura atmosferica, ρ_w la densità dell'acqua, g l'accelerazione di gravità, k il numero d'onda, h la profondità dell'acqua, d_c la sommergenza del muro frontale, B la larghezza della camera, σ la frequenza d'onda angolare per il periodo d'onda significativo, ϑ_M l'angolo di attacco del moto ondoso.

Anche in questo caso, la formulazione teorica proposta è rappresentativa di un sistema OWC in cui un orifizio simula la perdita di carico della turbina (PTO). L'inserimento di una turbina vera e propria richiederebbe una relazione appositamente studiata in base al tipo di turbina e alla sua modalità di funzionamento. I limiti del modello di Takahashi (1988) sono descritti nel dettaglio nel Capitolo 5 del presente elaborato di tesi.

4. SCHEMATIZZAZIONE DEL PROBLEMA AI FINI DELLA MODELLAZIONE FISICA DEGLI OWC

4.1. Generalità

Uno degli obiettivi principali della ricerca svolta è costituito dall'individuazione degli effetti di scala relativi alla modellazione fisica dei sistemi OWC. La metodologia seguita consiste nel riprodurre in piccola scala esperimenti effettuati a scala più grande, con l'obiettivo principale di analizzare gli effetti dovuti alla ridotta dimensione del modello sulle grandezze fisiche in gioco come la pressione dell'acqua e dell'aria, l'elevazione del pelo libero e la portata d'aria che fluisce nella camera pneumatica. Sono inoltre presi in considerazione i parametri statistici legati all'interazione tra le onde random e i sistemi OWC, con particolare riferimento al coefficiente di riflessione e alle massime pressioni di impatto delle onde sulla struttura.

In questo contesto si inseriscono gli studi condotti da Allsop et al. (2014) mediante esperimenti a grande scala, da cui è possibile estrarre delle informazioni attendibili sul funzionamento degli OWC e sulla loro interazione con le onde random. Sulla base di tali informazioni è possibile progettare una nuova campagna sperimentale a piccola scala in modo da verificare come vengono modificati i risultati dei test eseguiti a grande scala.

La modellazione fisica è stata condotta con l'ulteriore scopo di trovare la configurazione geometrica ottimale dei dispositivi OWC, con il fine di massimizzare la produzione di energia e l'efficienza nonché di garantire la stabilità strutturale del sistema.

Sulla base della analisi dei risultati della modellazione fisica, è possibile inoltre progettare un dispositivo OWC da installare presso un sito campione, ottimizzandolo sulla base delle caratteristiche del moto ondoso del sito in esame. Il dispositivo in scala ridotta testato presso il laboratorio di Idraulica dell'Università di Catania è composto da più pezzi, fissi e mobili, che ne consentono la applicazione in un gran numero di configurazioni diverse, in relazione ai diversi parametri geometrici che si vogliono ottimizzare. In funzione dei parametri da indagare sono state testate a piccola scala in totale trentadue configurazioni geometriche e, su ciascuna configurazione, sono state eseguite 9 condizioni d'onda.

4.2. Similitudine nei modelli fisici di OWC

Nel realizzare un modello fisico in ambito idraulico si deve tendere ad assicurare contemporaneamente la similitudine geometrica, cinematica e dinamica. Rispettare la similitudine geometrica vuol dire che ogni dimensione del modello a piccola scala deve essere in un rapporto costante con le corrispondenti dimensioni del modello a grande scala (o del prototipo). Il modello viene ottenuto come trasformazione omotetica del modello di riferimento. Per cui, in punti corrispondenti tra i due modelli, il rapporto tra le grandezze geometriche è costante ed è possibile definire un fattore di scala geometrica ε_g tra le lunghezze, pari al rapporto tra le lunghezze della grande L_M e piccola scala L_m :

$$\varepsilon_g = \frac{L_M}{L_m} \quad (4.1)$$

I rapporti tra le aree e tra i volumi possono essere ottenuti geometricamente e sono pari rispettivamente a ε_g^2 e ε_g^3 .

Rispettare la similitudine cinematica vuol dire che, in ogni punto del dominio del modello a piccola scala, la velocità deve avere la stessa direzione e verso della corrispondente velocità nel modello a grande scala. In punti corrispondenti tra i

due modelli, il rapporto tra i moduli delle velocità deve quindi risultare costante ed è possibile definire un fattore di scala delle velocità ε_v pari al rapporto:

$$\varepsilon_v = \frac{V_M}{V_m} \quad (4.2)$$

Analogamente, rispettare la similitudine dinamica vuol dire che ogni forza che agisce nel modello a piccola scala deve avere la stessa direzione e verso della corrispondente forza che agisce nel modello a grande scala. Per cui, in punti corrispondenti tra i due modelli, il rapporto tra i moduli di forze agenti deve essere uguale ed è possibile definire un fattore di scala delle forze ε_F pari al rapporto:

$$\varepsilon_F = \frac{F_M}{F_m} \quad (4.3)$$

Le similitudini dinamiche che in generale interessano i problemi idraulici sono:

- la similitudine per le forze peso

$$Fr = \frac{F_i}{F_g} = \frac{U}{\sqrt{gL_c}} \quad (4.4)$$

espressa dal numero di Froude Fr , data dal rapporto tra le forze d'inerzia F_i e le forze peso F_g ;

- la similitudine per le forze viscosi

$$Re = \frac{F_i}{F_v} = \frac{\rho UL_c}{\mu} \quad (4.5)$$

espressa dal numero di Reynolds Re , data dal rapporto tra le forze d'inerzia F_i e le forze viscosi F_v ;

- la similitudine per le forze di pressione

$$E = \frac{F_i}{F_p} = \frac{\Delta p}{\rho V^2} \quad (4.6)$$

espressa dal numero di Eulero E , data dal rapporto tra le forze d'inerzia F_i e le forze di pressione F_p ;

- la similitudine per le forze di tensione superficiale

$$We = \frac{F_i}{F_\sigma} = V \sqrt{\frac{\rho L_c}{\sigma}} \quad (4.7)$$

espressa dal numero di Weber We , data dal rapporto tra le forze d'inerzia F_i e le forze di tensione superficiale F_σ ;

dove U è una velocità caratteristica del fluido, L_c è una lunghezza caratteristica del sistema, g è l'accelerazione della gravità, ρ è la densità del fluido, μ è la viscosità del fluido, p è la pressione, V è il volume e σ è la tensione superficiale del fluido.

In generale, se un modello è realizzato in similitudine geometrica e dinamica, la similitudine cinematica tra i modelli è conseguentemente realizzata.

Fissato il rapporto di scala, non è possibile ridurre l'accelerazione di gravità secondo la scala scelta né la densità del fluido, se si utilizza lo stesso fluido tra i modelli, quindi non è possibile far corrispondere entrambi i numeri di Froude e Reynolds in due modelli che presentano lo stesso fluido e la stessa accelerazione della gravità. Tuttavia, per grandi numeri di Reynolds ($Re > 10^5$) la scala di Froude è sufficiente a garantire la correttezza tra i due modelli in scala, come evidenziato da Sheng et al. (2014).

In generale però è possibile che alcune grandezze fisiche in gioco non seguano la scala geometrica. Per tale ragione il fenomeno analizzato a piccola scala può differire da quello originario, determinando così un effetto di scala. È il caso di ciò che accade all'interno della turbina (PTO) e dell'interazione acqua-aria all'interno della camera pneumatica.

Falcao e Henriques (2014) hanno valutato che il rapporto di scala della potenza è pari a $\varepsilon_g^{7/2}$; tale valore implica un rapporto di potenza palesemente troppo piccolo per consentire un'adeguata modellizzazione della turbina, che viene dunque sostituita da un orifizio o da uno strato poroso.

La presenza dell'aria all'interno della camera pneumatica provoca un problema di scala che coinvolge la comprimibilità. La variazione della quantità di aria all'interno della camera è dovuta:

- alla variazione di volume dell'aria per densità fissata $\rho dV/dt$;
- alla variabilità di densità dell'aria per volume fissato Vdp/dt ;

dove ρ e V sono rispettivamente la densità e il volume dell'aria nell'OWC.

La variazione di volume dell'aria all'interno della camera, causata dall'oscillazione del pelo libero, può essere considerata pari alla portata q dell'acqua all'interno del OWC.

La variazione di densità è dovuta alla compressione dell'aria, rappresentata mediante la relazione tra la densità e la pressione in una trasformazione politropica di un gas perfetto:

$$\frac{p + p_{at}}{\rho^k} = \frac{p_{at}}{\rho_{at}^k} \quad (4.8)$$

dove p è la pressione relativa all'interno della camera, p_{at} è la pressione assoluta atmosferica, ρ_{at} è la densità esterna all'OWC, k è l'esponente politropico che è legato all'efficienza della turbina, come dimostrato da Falcao e Henriques (2014). Quest'ultimo esponente assume il valore massimo 1,4 se la turbina è perfettamente efficiente e il flusso è isoentropico. Al contrario, $k = 1$ se la turbina ha un'efficienza nulla, in quanto il processo è isotermico, come nella condizione in cui il PTO è sostituito da un orifizio o un materiale poroso. Tale coefficiente k dipende quindi dalle caratteristiche del PTO e non dalla scala geometrica.

Confrontando la variabilità di massa dell'aria all'interno del OWC, dovuta alla variazione della densità e del volume, sulla base dell'equazione (4.8) si ottiene:

$$\Gamma = \frac{Vdp/dt}{\rho q} = \frac{V}{kq(p + p_{at})} \frac{dp}{dt} \quad (4.9)$$

per cui Falcao e Henriques (2014) suggeriscono che Γ deve essere costante per ottenere una completa similitudine dinamica tra modelli a grande e piccola scala. Sotto la condizione di similitudine di Froude, le scale della portata q e della

variazione di pressione dp/dt sono rispettivamente $\varepsilon_g^{2.5}$ e $\varepsilon_g^{0.5}$. Inoltre, le p_{at} sono costanti a diverse scale e le pressioni relative all'interno della camera p possono essere considerate piccole rispetto alla pressione assoluta, $p \ll p_{at}$. Tutte queste considerazioni causano che il volume dell'aria deve essere scalato con ε_g^2 per avere un valore costante di T , mentre per la similitudine geometrica la scala del volume è ε_g^3 , come evidenziato da Sheng et al. (2014). Per questo motivo, Weber (2007) ha affermato che i requisiti con cui deve essere scalata la compressibilità dell'aria possono essere soddisfatti solo mantenendo l'altezza della camera d'aria invariata: in questo modo il rapporto tra i volumi nei modelli a diverse scale coincide con il rapporto delle aree, ossia ε_g^2 .

Per affrontare questi problemi di scala in un sistema OWC è possibile procedere in diversi modi. In piccoli laboratori, quando la scala è particolarmente piccola, non è possibile mantenere invariata l'altezza della camera d'aria, proprio a causa delle ridotte dimensioni del laboratorio. Ciononostante, il corrispondente volume addizionale può essere ricavato collegando la camera con un serbatoio d'aria. Un altro approccio possibile è quello di verificare l'effetto della variazione del volume dell'aria, o specificamente dell'altezza della camera, in modo da effettuare un'analisi di sensibilità e definire l'influenza del volume d'aria. Tale metodo può consentire di superare la necessità di aggiungere un grande serbatoio di volume dell'aria, in quanto testare due modelli a piccola scala con diverse altezze dell'aria può consentire di estrapolare risultati anche di altre all'altezze della camera d'aria non testate. Un'applicazione di questo tipo e dei relativi effetti è stata eseguita nell'attività di ricerca svolta.

4.3. Effetti di scala sul modello

La valutazione degli effetti di scala è eseguita a partire dai risultati degli esperimenti condotti a grande scala, comparandoli con quelli a scala ridotta. Questa seconda serie di esperimenti è stata progettata in modo da riprodurre

condizioni simili a quelle testate negli esperimenti di Allsop et al. (2014). Nel dettaglio, sono stati riprodotti gli esperimenti condotti con profondità $h=3,5$ m, in quanto più numerosi, e con diametro dell'orifizio $d_0=0,2$ m. Quest'ultimo corrisponde con il diametro ottimale da un punto di vista energetico, ottenuto minimizzando il valore del coefficiente di riflessione.

Il modello a piccola scala rappresenta una riproduzione geometrica 1:18 del modello a grande scala. Alcune grandezze fisiche però potrebbero non seguire la scala geometrica, così lo stesso fenomeno analizzato nei due modelli simili può subire variazioni a causa dei cosiddetti effetti di scala. È il caso della presenza della turbina che causa una perdita di carico, il Power Take Off (PTO) e dell'interazione acqua-aria, che comporta la dinamica di due fluidi che interagiscono reciprocamente.

4.3.1. Modello a grande scala

Gli esperimenti a grande scala sono stati condotti presso l'Università di Hannover nel Grosse Wellenkanal (GWK) nel periodo marzo/aprile 2014 nell'ambito del progetto Hydralab IV (Allsop et al., 2014), che coinvolge diversi partner internazionali. L'importanza del progetto è evidenziata proprio dalla scarsità di analisi di dati a grande scala in letteratura.

Gli esperimenti sono stati condotti nel canale GWK lungo circa 300m, largo 5m e profondo 7m. Il dispositivo testato rappresenta un modello in scala 1:8-1:9, se si considerano le condizioni ondose dei mari del Nord-Europa; la scala è invece 1:3-1:4 rispetto ad un eventuale prototipo da collocare nel Mediterraneo.

Ad una distanza pari a circa 97m dal battitore, su di una rampa con pendenza 1:6 alta 1,92m e lunga 11,2m, è stato installato il dispositivo OWC costituito da tre cassoni, uno disposto in posizione centrale rispetto alla larghezza del canale e gli altri due laterali (Figura 4.1).

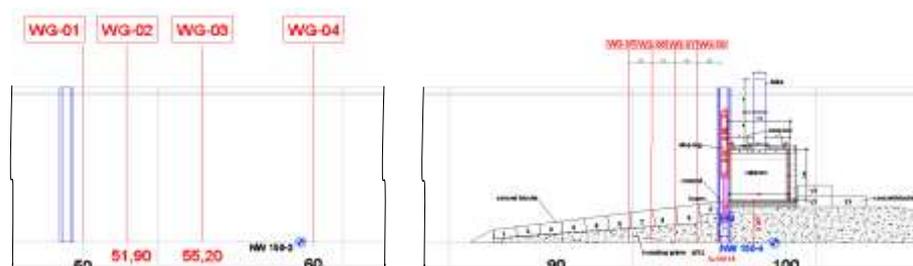


Figura 4.1: Sezione longitudinale del canale GWK di Hannover, con rappresentazione del dispositivo OWC testato.

I tre cassoni hanno una larghezza trasversale $B_t=1,44\text{m}$ e longitudinale $B=2,45\text{m}$, al netto degli spessori delle pareti. La profondità dell'acqua in condizione di quiete h , misurata rispetto al fondo del canale, è stata variata tra 3 e 3,5 m, di conseguenza anche la profondità dell'acqua nel cassone d e la sommergenza della parete frontale a sono variate. In Figura 4.2 è rappresentato uno schema del dispositivo OWC testato nel GWK e l'indicazione dei parametri geometrici utilizzati, riportati in Tabella 4.1 con i rispettivi valori testati durante gli esperimenti.

Inoltre, i cassoni presentano un'apertura della parete anteriore $h_i=1\text{m}$ e al centro di ciascun cassone è posto un condotto verticale alto 3m con diametro 0,5m, a metà del quale è disposto un orifizio che simula la turbina (Figura 4.2). L'orifizio è costituito da un piatto forato, in cui le dimensioni del foro d_o sono state variate. È stato anche testato il caso di foro chiuso. I diametri dell'orifizio testati sono stati $d_o=0-0,005-0,01-0,02-0,03\text{m}$, con corrispondente area relativa $A_o/A_c=0\%-0,1\%-0,2\%-0,9\%-2,0\%$, in cui $A_o=\pi d_o^2/4$ è l'area dell'orifizio e $A_c=B \cdot B_t$ è l'area della sezione orizzontale della camera interna.

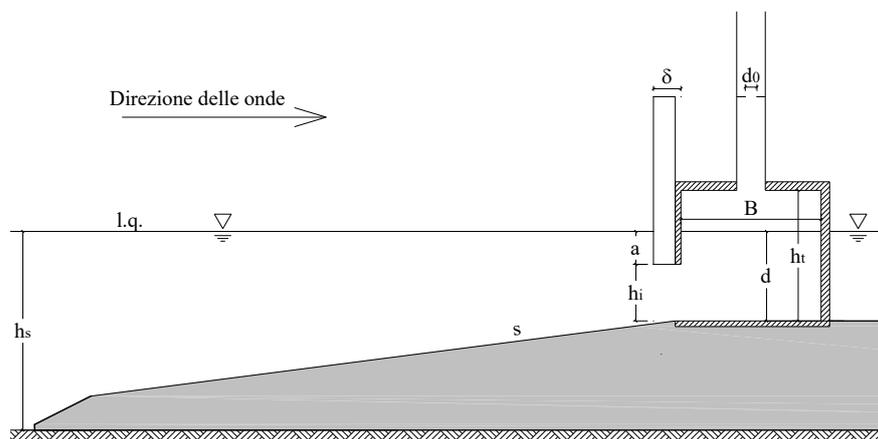


Figura 4.2: Schematizzazione del cassone OWC con le indicazioni dei parametri geometrici.

Tabella 4.1: Descrizione dei parametri geometrici negli esperimenti condotti nel cassone OWC del GWK.

Parametri geometrici	Simbolo	[m]
Larghezza del cassone	B	2,45
Larghezza trasversale del cassone	B_t	1,44
Altezza del cassone	h_t	2,30
Altezza dell'apertura della parete frontale	h_i	1,00
Spessore della parete frontale	δ	0,50
Diametro dell'orifizio variabile	d_0	0,00-0,05-0,10- 0,20-0,30
Profondità dell'acqua, misura del fondo del canale	h	3,50-3,00
Profondità dell'acqua al cassone	d	1,08-1,58
Altezza dell'aria	$h_a = h_t - d$	0,72
Sommergenza della parete frontale	a	0,08-0,58

La strumentazione di misura impiegata è costituita da:

- 13 sonde di livello che misurano la sopraelevazione dell'onda (4 sonde di fronte al battitore e 4 sonde di fronte al cassone OWC, riportate in Figura 4.1; 5 dentro il cassone centrale, come si vede in Figura 4.3);
- 13 trasduttori di pressione, disposti tutti attorno al cassone OWC (parete anteriore, nel tetto e parete posteriore in Figura 4.3);
- 1 misuratore di pressione differenziale, disposto nel condotto verticale del cassone centrale (Figura 4.3);
- 1 misuratore della velocità del flusso d'aria, disposto nel condotto verticale del cassone centrale (Figura 4.3).

Le sonde poste di fronte al battitore sono utili per la valutazione del coefficiente di riflessione con il metodo delle 3 o 4 sonde (Mansard e Funke 1980, Faraci et al. 2015).

I dati delle sopraelevazioni dell'onda, della pressione differenziale e della velocità del flusso d'aria sono stati registrati a 100Hz, mentre quelli delle pressioni a 1000Hz con il fine di cogliere i valori impulsivi della stessa.

Le prove sono state condotte per le onde regolari con altezza d'onda H compresa tra 0,26m e 1,61m e periodo dell'onda T compreso tra 3s e 6s, per le onde irregolari con altezze d'onda significative incidenti $H_{m0,i}$ comprese tra 0,26m e 1,2m e periodo di picco T_p compreso tra 3s e 6,5s. Esse sono state effettuate in modo da avere:

- Variazione dell'altezza d'onda e del periodo;
- Variazione della profondità dell'acqua;
- Variazione della dimensione del foro dell'orifizio.

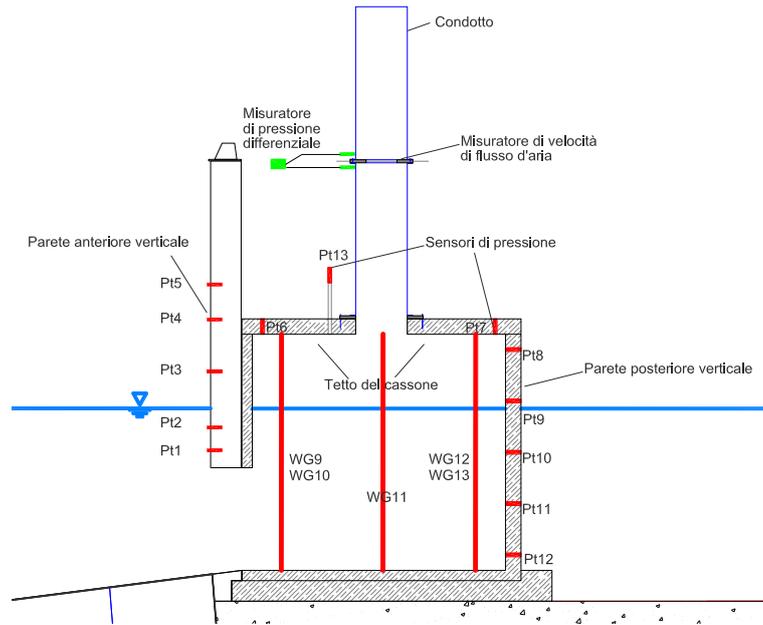


Figura 4.3: Dettaglio del cassone OWC con indicazione degli strumenti di misura installati.

4.3.2. Modello a piccola scala

La campagna sperimentale a piccola scala è stata condotta presso il laboratorio dell'Università degli Studi di Catania, nel periodo ottobre-dicembre 2015, scalando geometricamente con un fattore 1:18 il dispositivo testato nel GWK. La vasca del laboratorio dell'Università di Catania è lunga 18m ed è stata utilizzata una partizione della vasca stessa, larga 1m e alta 1,2m (Figura 4.4). Le grandezze geometriche sono state scalate linearmente e, a causa dei limiti fisici di laboratorio, non è stato possibile adottare la scala di Weber per quanto esposto nel precedente paragrafo 4.2. Si è invece progettata una configurazione geometrica con un'altezza h_t della camera maggiore rispetto a quella ottenuta scalando linearmente il parametro, con lo scopo di valutare l'influenza dell'altezza della camera d'aria nel sistema.

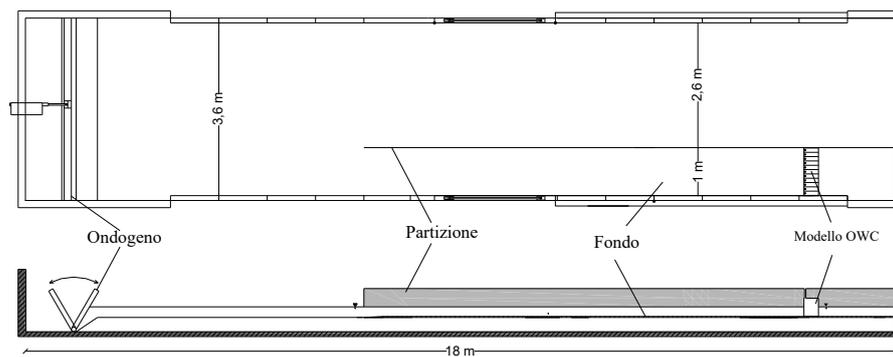


Figura 4.4: Vasca del Laboratorio di Idraulica dell’Università di Catania (CT) con il modello OWC a piccola scala posto in una partizione del canale: (a) vista dall’alto; (b) sezione longitudinale.

Le configurazioni adottate per il confronto con i dati a grande scala sono due e sono riportate in Tabella 4.2. In tale tabella sono presenti le descrizioni dei parametri geometrici e i corrispondenti valori testati nel GWK e negli esperimenti a piccola scala condotti presso l’Università di Catania, secondo la Figura 4.2.

Tabella 4.2: Descrizione dei parametri geometrici del dispositivo OWC utilizzato negli esperimenti del GWK e riprodotti in scala ridotta presso il Laboratorio di Idraulica dell’Università di Catania.

Parametri geometrici	Simbolo	GWK	Catania
Pendenza della rampa	s	1:6	1:6
Larghezza del cassone	B	2,45m	0,14m
Larghezza trasversale del cassone	B_t	1,44m	0,08m
Altezza del cassone	h_t	2,30m	0,13-0,28m
Profondità dell’acqua, misurata dal fondo del canale	h	3,50m	0,19m
Profondità dell’acqua al cassone	d	1,58m	0,09m
Altezza dell’aria	$h_a = h_t - d$	0,72m	0,04-0,19m
Sommergenza della parete frontale	a	0,58m	0,03m
Altezza dell’apertura della parete frontale	h_i	1,00m	0,06m
Diametro dell’orifizio	d_o	0,20m	0,01m

Il dispositivo in scala ridotta è stato posto su una rampa con pendenza 1:6 ed è costituito da una parte fissa e altre parti mobili. La parte fissa (Figura 4.5) è quella che va a costituire le pareti laterali delle 11 camere OWC ed è composta da una piastra di fondo, una parete verticale nella zona posteriore e 12 transetti verticali che formano 11 camere.



Figura 4.5: Parte fissa del modello di laboratorio posta su una rampa di pendenza s 1:6.

Una seconda parte del modello costituisce la parete anteriore della camera con una lastra opportunamente sostituita in funzione della variazione dell'altezza della camera (Figura 4.6).



Figura 4.6: Parte anteriore del modello.

La terza parte del modello è costituita dal tetto della camera attraverso 11 profili a C asimmetrici. Il tetto delle camere ospitano un foro in cui sono posti i pezzi

che simulano il condotto verticale che ospita l'orifizio d_0 . Si precisa che uno dei pezzi che costituisce l'orifizio è stato tagliato a sezione rettangolare pari a $0,02 \times 0,007 \text{ m}$ corrispondente a un'area A_0 prossima a quella testata con $d_0 = 0,01 \text{ m}$ (Figura 4.7). La presenza dell'orifizio rettangolare è resa necessaria in quanto si è inserita nel cassone una sonda resistiva in grado di restituire la variazione del livello dell'acqua dentro la camera stessa.



Figura 4.7: Condotto posto sopra il tetto del cassone con l'orifizio.

Una quarta parte è costituita dalla parete verticale posteriore delle camere. Essa è composta da 11 pistoni dotati di una barra filettata che vengono inseriti nelle camere, in modo tale da variare all'occorrenza la larghezza longitudinale delle camere stesse. In particolare, la barra filettata consente di far scorrere i pistoni permettendo di gestire la variazione della larghezza della camera B , in questo caso fissata a $0,14 \text{ m}$. Gli 11 pistoni sono stati realizzati in due serie di diverse altezze, corrispondenti alle due altezze della camera h_t , in modo da essere intercambiabili in funzione delle configurazioni da testare $h_t = 0,13 \text{ m} - 0,28 \text{ m}$.

In Figura 4.8 è mostrato il modello in fase di montaggio in cui è possibile vedere i profilati che con la barra filettata costituiscono i pistoni, il tetto del cassone e il condotto verticale. Il modello è stato progettato in maniera versatile per valutare sia le configurazioni sugli effetti di scala che l'influenza dei parametri geometrici sull'ottimizzazione del cassone.

Si precisa che, al fine di rendere stagna la camera d'aria, ad ogni cambio di configurazione la stessa è stata sigillata con del nastro telato per natanti.



Figura 4.8: Modello in fase di montaggio.

Gli esperimenti sono stati monitorati con sei sonde resistive, in grado di restituire la variazione del livello dell'acqua e tre sonde di pressione, che consentono di stimare le azioni sulla parete e la perdita di carico dell'aria attraverso l'orifizio (Figura 4.9). I dati sono stati acquisiti a 1000Hz.

Tre sonde resistive (WG01-WG02-WG03) sono state poste ad una distanza dal modello maggiore di due lunghezze d'onda: $x_{12}=0,185$ m e $x_{13}=0,345$ m, rispettivamente la distanza tra la prima e la seconda sonda resistiva e la prima e la terza sonda resistiva. Tali sonde sono necessarie per ricavare l'altezza d'onda riflessa e il coefficiente di riflessione attraverso il metodo delle tre sonde di Mansard e Funke (1980).

Due sonde (WG04-WG05) sono state poste davanti la parete anteriore del modello al fine di trarre delle considerazioni sull'interazione onda-struttura ed una sonda resistiva (WG06) è stata posta all'interno di uno dei cassoni centrali, al fine di trarre delle informazioni sull'idrodinamica dentro la camera.

Due sonde di pressione (P01-P02) sono state inglobate nella parte frontale della veletta del modello in modo da fornire la variazione di pressione sulla parete anteriore e quindi valutare gli impatti sulla struttura in corrispondenza della parte inferiore della parete anteriore e del pelo libero dell'acqua. A causa del loro ingombro e delle ridotte dimensioni del modello, è stato necessario collocare le due sonde in una delle camere laterali per non influenzare le altre misurazioni. La

terza sonda di pressione P03 è stata posta al tetto del cassone, nella parte centrale del modello, in modo da fornire la variazione di pressione dell'aria dentro la camera.

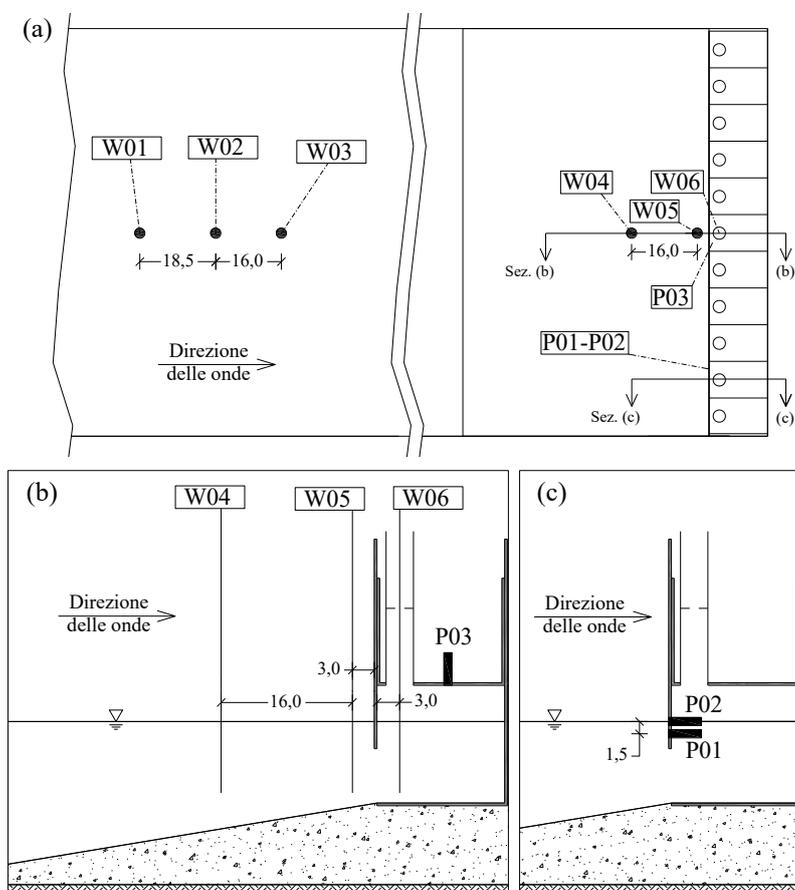


Figura 4.9: Schematizzazione del modello OWC testato con la localizzazione delle sonde resistive e i sensori di pressione: (a) vista dall'alto; (b) sezione longitudinale della camera centrale dove sono acquisite la pressione dell'aria e la variazione interna della sopraelevazione dell'acqua; (c) sezione longitudinale della camera laterale in cui sono inseriti i sensori di pressione. Tutte le dimensioni sono in cm.

Per le configurazioni geometriche descritte, sono state eseguite diverse prove con onde irregolari e caratteristiche dell'onda incidente differenti. Tali condizioni ondose sono state scelte sulla base delle prove eseguite nel GWK e

opportunamente scalate secondo Froude 1:18, per il confronto tra i risultati a grande e piccola scala, riportate in Tabella 4.3. In particolare in tabella sono riportate le altezze d’onda incidenti $H_{m0,i}$, il periodo di picco T_p , l’altezza d’onda relativa, pari al rapporto tra l’altezza d’onda incidente e la profondità dell’acqua, $H_s^* = H_{m0,i} / h$ e la ripidità dell’onda $S = 2\pi H_{m0,i} / g T_p^2$.

Le onde sono state generate, in entrambi i laboratori, applicando lo spettro JONSWAP medio che fornisce onde irregolari simili alle onde di mare reali.

Tabella 4.3: Descrizione delle condizioni di moto ondoso incidente testate al GWK e riprodotte a Catania.

Num.	GWK					Catania				
	$H_{m0,i}$ [m]	T_p [s]	H_s^*	B/L_p	S	$H_{m0,i}$ [m]	T_p [s]	H_s^*	B/L_p	S
1	0,400	4,000	0,114	0,123	0,016	0,02	0,9	0,105	0,131	0,016
2	0,540	5,000	0,154	0,093	0,014	0,03	1,2	0,158	0,091	0,013
3	0,400	6,500	0,114	0,068	0,006	0,02	1,5	0,105	0,070	0,006
4	0,390	3,000	0,111	0,187	0,028	0,02	0,7	0,105	0,191	0,026
5	0,520	3,000	0,149	0,187	0,037	0,03	0,7	0,158	0,191	0,039
6	0,600	4,000	0,171	0,123	0,024	0,03	0,9	0,158	0,131	0,024
7	0,800	4,000	0,229	0,123	0,032	0,04	0,9	0,211	0,131	0,032
8	0,810	5,000	0,231	0,093	0,021	0,05	1,2	0,263	0,091	0,022
9	1,000	6,000	0,286	0,075	0,018	0,06	1,4	0,316	0,076	0,020

4.4. Configurazione geometrica ottimale

Gli esperimenti a scala ridotta, condotti presso il Laboratorio di Idraulica dell’Università di Catania, hanno compreso una fase ulteriore rispetto alla riproduzione della configurazione geometrica del GWK. In questa seconda fase sono stati indagati i principali parametri geometrici per l’ottimizzazione del sistema e sono state eseguite le opportune valutazioni sul comportamento dello stesso sistema, con particolare riferimento all’idrodinamica e alle azioni sulla struttura.

Il dispositivo, già schematizzato in Figura 4.2, è posto su una rampa e la profondità d'acqua al battitore è $h=0,19\text{m}$, con corrispondente altezza dell'acqua al cassone $d=0,09\text{m}$. I principali parametri da investigare sono la larghezza della camera $B=0,05\text{-}0,10\text{-}0,14\text{m}$, l'altezza della camera $h_t=0,13\text{-}0,28\text{m}$ e la sommergenza $a=0,015\text{-}0,03\text{-}0,05\text{m}$ della parete anteriore rispetto al livello di quiete. Durante gli esperimenti di laboratorio condotti con le configurazioni geometriche aventi larghezza della camera B più stretta, è stato rilevante valutare la variazione del diametro dell'orifizio $d_0=0,006\text{-}0,01\text{m}$, corrispondente ad un'area relativa $A_0/A_c=0,71\%\text{-}1,96\%$.

Si è ritenuto opportuno testare il diametro più piccolo dell'orifizio in corrispondenza della camera più stretta al fine di cercare di mantenere costante il rapporto A_0/A_c e quindi di poter testare la condizione di orifizio prossimi a quello ottimale. La variazione dei parametri B , h_t , a e d_0 , riportate in Tabella 4.4, hanno consentito di ottenere un totale di 22 configurazioni geometriche differenti.

Tabella 4.4: Descrizione dei parametri geometrici del cassone OWC scelti per valutare la configurazione ottimale sui tests riprodotti a Catania.

Parametri geometrici	Simboli	Valori testati
Pendenza della rampa	s	1:6
Larghezza del cassone	B	0,05-0,10-0,14m
Profondità trasversale del cassone	B_t	0,08m
Altezza del cassone	h_t	0,13-0,28m
Profondità dell'acqua, misura del fondo del canale	h	0,19m
Profondità dell'acqua dentro il dispositivo	d	0,09m
Sommergenza della parete frontale	a	0,015-0,03-0,05m
Altezza dell'apertura della parete frontale	h_i	0,04-0,06-0,075m
Diametro dell'orifizio	d_0	0,006-0,01m

Il modello fisico testato è quello descritto nel precedente paragrafo 4.3.2: grazie alla versatilità di progettazione dei pezzi che lo compongono, è possibile far variare le configurazioni geometriche e i rispettivi parametri da indagare. Si

precisa che anche l'orifizio tagliato a sezione rettangolare, per l'inserimento della sonda resistiva, è stato ridotto nel caso di minore apertura dell'orifizio.

La lastra anteriore che costituisce la parete anteriore della camera è stata alzata e abbassata in modo da far variare la sommergenza a rispetto al livello di quiete.

I dati sono stati acquisiti a 1000Hz e il modello è stato monitorato con gli stessi strumenti di misura descritti nel precedente paragrafo 4.3.2, mantenendo le stesse posizioni della Figura 4.9, a meno della sonda di pressione P02. Tale sonda di pressione è stata infatti spostata per ogni configurazione in funzione della variazione della sommergenza, in modo da mantenere la corrispondenza con il pelo libero dell'acqua ad ogni variazione della sommergenza. Le onde testate sulle ventidue configurazioni sono quelle della precedente Tabella 4.3.

4.5. Studio di fattibilità

La terza ed ultima fase di laboratorio ha previsto gli esperimenti per il caso studio di Giardini Naxos, riprodotti in scala 1:75 rispetto al modello reale.

A differenza delle configurazioni precedenti, il modello è stato posto direttamente al fondo del canale e non su di una rampa, per cercare di sfruttare a pieno le potenzialità del laboratorio. Inoltre, è stata fissata la larghezza della camera, pari a quella più piccola $B=0,05\text{m}$, e l'altezza della camera $h_t=0,28\text{m}$. Si è ritenuto opportuno valutare in questo caso la variazione del diametro dell'orifizio $d_o=0,006-0,01\text{m}$ e della sommergenza $a=0,05-0,085-0,12-0,155\text{m}$.

Gli strumenti di misura adoperati, il loro posizionamento e le caratteristiche del moto ondoso simulate, sono invariati rispetto a quanto già detto. I dettagli del modello di laboratorio testato per il caso studio vengono forniti più avanti nel paragrafo 8.4.

5. RISULTATI DEL MODELLO A GRANDE SCALA

5.1. Generalità

Le valutazioni dell'interazione tra le onde e l'OWC sono state condotte mediante l'analisi dei dati delle prove condotte a grande scala dal gruppo di ricerca del prof. D. Vicinanza presso il canale GWK di Hannover, nell'ambito del progetto di ricerca europeo HYDRALAB IV.

In particolare, sulla base dei dati disponibili sono qui valutati i coefficienti di riflessione per onde regolari e irregolari, queste ultime aventi spettro simile a quello delle onde di mare generate localmente dal vento. Nel dettaglio, per le prove condotte con onde irregolari sono stati valutati il coefficiente di riflessione spettrale, le pressioni e le forze agenti sull'OWC ed in particolare sulla sua parete frontale, al tetto della camera pneumatica e sulla parete posteriore della camera stessa. Inoltre, per alcune di queste prove è stato valutato anche il periodo proprio di oscillazione. Tale parametro è infatti particolarmente significativo del comportamento olistico del dispositivo e verrà utilizzato anche nella successiva analisi dei fattori di scala.

L'idrodinamica della colonna d'acqua oscillante è stata investigata mediante formulazioni teoriche presenti in letteratura. È stata inoltre sviluppata una nuova formulazione empirica in grado di correlare gli andamenti delle pressioni dell'aria e dell'elevazione di superficie all'interno della camera pneumatica.

I risultati del modello a grande scala sono in parte riportati nell'articolo "Large-scale experiments on the behaviour of a generalised Oscillating Water Column

under random waves” pubblicato sulla rivista *Renewable Energy* nel dicembre 2016 (Viviano et al., 2016).

5.2. Valutazioni sulla riflessione

Il fenomeno della riflessione del moto ondoso davanti all’OWC è stato studiato per mezzo del coefficiente di riflessione, ottenuto a partire dai segnali di elevazione di superficie registrati da quattro sonde collocate lungo il canale tra il generatore delle onde e il modello e già mostrate in Figura 4.1. Le registrazioni sono avvenute a 1000Hz, dopo opportuna calibrazione. Per poter applicare i noti metodi precedentemente descritti, le sonde sono state numerate dal battitore verso il modello e poste a distanza $x_{12}=1,9\text{m}$, $x_{13}=5,2\text{m}$ and $x_{14}=10\text{m}$, rispettivamente la distanza tra la prima e la seconda sonda, tra la prima e la terza e tra la prima e la quarta sonda. Tali distanze tra le sonde sono state scelte in modo da non rientrare nei limiti dei metodi da applicare.

Il coefficiente di riflessione sul modello a grande scala è stato valutato, nel caso di onde irregolari, con i noti metodi delle due-sonde (Goda e Suzuki, 1976), delle tre-sonde (Mansard e Funke, 1980) e con il metodo delle quattro-sonde (Faraci et al., 2015). Dal loro confronto è emerso che il metodo delle due sonde si discosta notevolmente dagli altri due metodi, che invece forniscono valori simili, come si evince dalla Figura 5.1, attestando la validità del metodo più recente. Nella presente analisi si è quindi scelto di fare riferimento solo al metodo delle quattro sonde e i valori del coefficiente di riflessione C_r sono stati analizzati in funzione dei parametri che ne influenzano la variazione, come la larghezza della camera B e la lunghezza dell’onda L , nel caso di onde regolari, e lunghezza dell’onda di picco L_p , nel caso di onde irregolari ottenuta iterativamente dal periodo di picco T_p .

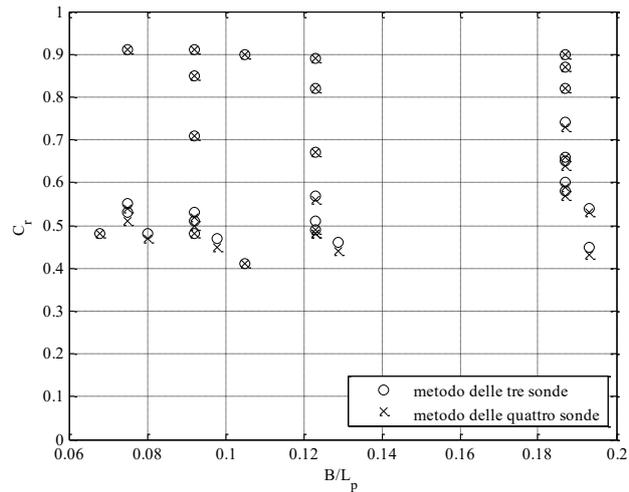


Figura 5.1: Confronto del coefficiente di riflessione C_r con il metodo delle tre e quattro sonde in funzione di B/L_p : onde irregolari e diametro dell'orifizio d_0 variabile.

5.2.1. Onde irregolari

Gli esperimenti condotti con onde irregolari, mostrati in Tabella 5.1, consentono di analizzare l'influenza dell'orifizio, ossia del PTO, sul sistema OWC. Tali prove sono state realizzate per la maggior parte con profondità dell'acqua costante pari a $h=3,5\text{m}$ ed in cui sono stati fatti variare i diametri dell'orifizio. Solo sul diametro definito come ottimale, sono state eseguite 5 prove con profondità dell'acqua pari a $h=3\text{m}$.

Le altezze d'onda significative $H_{m0,i}$ sono state fatte variare tra 0,26m e 1,2m e il periodo di picco T_p tra 3s e 6,5s. È possibile definire dei parametri caratteristici adimensionali, come l'altezza relativa $H_s^* = H_{m0,i}/h$, la larghezza relativa B/L_p , in cui L_p è la lunghezza dell'onda ottenuta iterativamente dal periodo di picco T_p , la sommergenza relativa a/d e l'area relativa dell'orifizio A_0/A_c . L'area relativa dell'orifizio è definita come il rapporto tra l'area dell'orifizio A_0 e l'area della camera A_c :

$$\frac{A_0}{A_c} = \frac{\pi(d_0/2)^2}{BB_t} \quad (5.1)$$

Tabella 5.1: Prove realizzate sul sistema OWC testato a grande scala e relativi parametri caratteristici.

N.test	$H_{m0,i}$ [m]	T_p [s]	h [m]	B/L _p	H _s *	a [m]	d [m]	a/d	d ₀ [m]	A ₀ /A _c
1	0,26	3,00	3,50	0,19	0,07	0,58	1,58	0,37	0,00	0,00%
2	0,52	3,00	3,50	0,19	0,15	0,58	1,58	0,37	0,00	0,00%
3	0,60	4,00	3,50	0,12	0,17	0,58	1,58	0,37	0,00	0,00%
4	0,54	5,00	3,50	0,09	0,15	0,58	1,58	0,37	0,00	0,00%
5	0,26	4,50	3,50	0,11	0,07	0,58	1,58	0,37	0,00	0,00%
6	0,67	6,00	3,50	0,07	0,19	0,58	1,58	0,37	0,00	0,00%
7	0,26	3,00	3,50	0,19	0,07	0,58	1,58	0,37	0,05	0,10%
8	0,40	4,00	3,50	0,12	0,11	0,58	1,58	0,37	0,05	0,10%
9	0,54	5,00	3,50	0,09	0,15	0,58	1,58	0,37	0,05	0,10%
10	0,26	3,00	3,50	0,19	0,07	0,58	1,58	0,37	0,10	0,20%
11	0,40	4,00	3,50	0,12	0,11	0,58	1,58	0,37	0,10	0,20%
12	0,54	5,00	3,50	0,09	0,15	0,58	1,58	0,37	0,10	0,20%
13	0,26	3,00	3,50	0,19	0,07	0,58	1,58	0,37	0,20	0,90%
14	0,40	4,00	3,50	0,12	0,11	0,58	1,58	0,37	0,20	0,90%
15	0,54	5,00	3,50	0,09	0,15	0,58	1,58	0,37	0,20	0,90%
16	0,26	4,50	3,50	0,11	0,07	0,58	1,58	0,37	0,20	0,90%
17	0,40	6,50	3,50	0,07	0,11	0,58	1,58	0,37	0,20	0,90%
18	0,39	3,00	3,50	0,19	0,11	0,58	1,58	0,37	0,20	0,90%
19	0,52	3,00	3,50	0,19	0,15	0,58	1,58	0,37	0,20	0,90%
20	0,60	4,00	3,50	0,12	0,17	0,58	1,58	0,37	0,20	0,90%
21	0,80	4,00	3,50	0,12	0,23	0,58	1,58	0,37	0,20	0,90%
22	0,81	5,00	3,50	0,09	0,23	0,58	1,58	0,37	0,20	0,90%
23	1,00	6,00	3,50	0,07	0,29	0,58	1,58	0,37	0,20	0,90%
24	0,26	3,00	3,50	0,19	0,07	0,58	1,58	0,37	0,30	2,00%
25	0,40	4,00	3,50	0,12	0,11	0,58	1,58	0,37	0,30	2,00%
26	0,54	5,00	3,50	0,09	0,15	0,58	1,58	0,37	0,30	2,00%
27	0,67	6,00	3,50	0,07	0,19	0,58	1,58	0,37	0,30	2,00%
28	0,26	3,00	3,00	0,19	0,09	0,08	1,08	0,07	0,20	0,90%
29	0,52	3,00	3,00	0,19	0,17	0,08	1,08	0,07	0,20	0,90%
30	0,60	4,00	3,00	0,13	0,20	0,08	1,08	0,07	0,20	0,90%
31	0,54	5,00	3,00	0,10	0,18	0,08	1,08	0,07	0,20	0,90%
32	0,67	6,00	3,00	0,08	0,22	0,08	1,08	0,07	0,20	0,90%

In Figura 5.2(a) si vuole valutare l'influenza della variazione del diametro d_0 sul coefficiente di riflessione C_r rispetto a B/L_p . Si osserva che per $d_0=0$ il comportamento del sistema è assimilabile ad una parete verticale: il coefficiente di riflessione è pari a 0,9 in accordo ai valori ottenuti da Allsop et al. (1994 e 1999) per onde irregolari davanti a una parete verticale. Questo dimostra che la camera dell'OWC non dissipa l'energia dell'onda in assenza di deflusso dell'aria. Inoltre si osserva che, al crescere del d_0 , il coefficiente di riflessione diminuisce, fino a raggiungere il minimo per $A_0/A_c=0,9\%$ che corrisponde a $d_0=0,2m$. Ulteriori incrementi del d_0 portano il coefficiente di riflessione a crescere, invertendo la sua tendenza. Quindi è possibile definire un rapporto ottimale A_0/A_c per cui si ha il minimo coefficiente di riflessione, che Thiruvankatasamy e Neelamani (1997) e recentemente Ashlin et al. (2016) valutano compreso tra 0,6% e 0,9%. In accordo con quanto ottenuto dai dati analizzati, il minimo coefficiente di riflessione, pari a 0,4, si ottiene per $A_0/A_c=0,9\%$.

Un'apertura di orifizio minore di quella ottimale causa maggiore pressione dell'aria all'interno della camera, che raggiunge il suo massimo valore per orifizio chiuso, con conseguenti minori oscillazioni della superficie d'acqua nella camera stessa. Ne segue una riduzione dell'efficienza del sistema OWC, come rilevato anche da Ashlin et al. (2016). Per l'apertura dell'orifizio maggiore di quella ottimale, la pressione relativa dell'aria diminuisce causando la riduzione dell'efficienza, nonostante l'aumento dell'oscillazione della superficie libera all'interno della camera, similmente a quanto suggerito da Thiruvankatasamy & Neelamani (1997).

L'ottimizzazione dell'orifizio, al fine di minimizzare il coefficiente di riflessione, consente di definire anche la massima efficienza del dispositivo. In particolare, il coefficiente di riflessione e l'efficienza del dispositivo risultano essere inversamente proporzionali, sulla base di bilanci energetici proposti da Tseng et al. (2000).

Quando si raggiunge il rapporto ottimale di A_0/A_c , l'andamento del C_r tende prima a diminuire fino a raggiungere un valore minimo in corrispondenza di $B/L_p=0,11$, in accordo con McConnell et al. (1996) e Faraci et al. (2015), e successivamente tende a crescere lievemente.

In Figura 5.2(b) è riportata l'influenza della sommergenza a rispetto alla profondità d'acqua al cassone d per $A_0/A_c=0,9\%$. Nel dettaglio, si osserva che al diminuire della profondità, si ha un coefficiente di riflessione minore per $B/L_p>0,11$, cioè per onde più corte. La spiegazione fisica può essere data dal fatto che le onde con periodo più piccolo hanno orbitale di velocità che diminuisce più rapidamente verso il fondo.

L'influenza delle altezze d'onda incidenti sul coefficiente di riflessione C_r ha rilevato un cambiamento di tendenza per $H_s^*>0,15$, meglio visibile e valutabile sugli effetti della forza agente sul sistema, come mostrato nel paragrafo successivo.

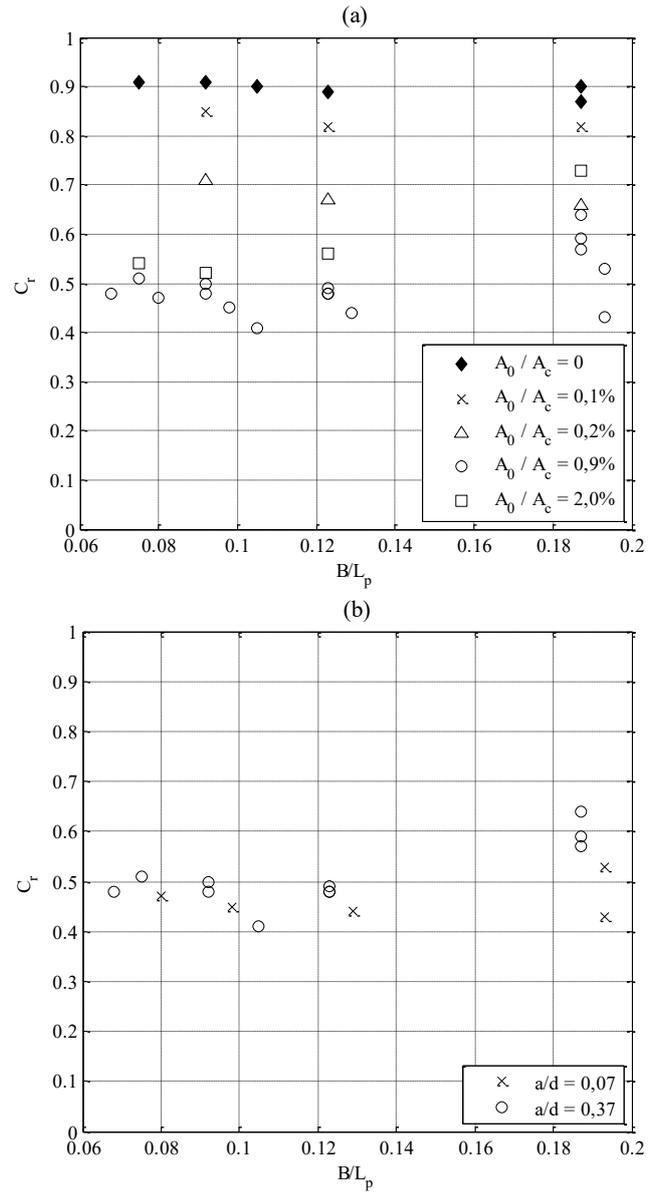


Figura 5.2: Rappresentazione del coefficiente di riflessione C_r in funzione di B/L_p : (a) valutazione dell'influenza del diametro dell'orifizio come area relativa A_0/A_c ; (b) valutazione influenza della sommergenza relativa del parete frontale a/d per $A_0/A_c=0,9\%$.

Il coefficiente di riflessione spettrale $C_r(f)$, per tutte le configurazioni testate, presenta un minimo per B/L compreso tra 0,11-0,15, in accordo con McConnel et al. (1996). L'influenza di $H_{m0,i}$ e T_p sono riportate in Figura 5.3 dove viene mostrato il $C_r(f)$ per il caso ottimale con $A_0/A_c = 0,9\%$. Nel dettaglio, la Figura 5.3(a) mostra gli esperimenti con fissato $H_s^* = 0,11$ e diversi B/L_p , e quindi l'influenza della variazione del periodo dell'onda. Il valore di H_s^* è stato scelto come valore medio tra quelli testati e riproducibili a piccola scala in cui non si verifica il frangimento dell'onda. È possibile osservare che per $B/L < 0,12$ l'andamento dei dati è più ripido per T_p più piccoli, invece per $B/L > 0,12$ l'andamento è più ripido per T_p più grandi. Nella Figura 5.3(b) sono mostrati gli esperimenti con $B/L_p = 0,12$ e diversi H_s^* . L'andamento dei coefficienti di riflessione è simile ma i valori minimi di $C_r(f)$ si hanno per H_s^* decrescenti.

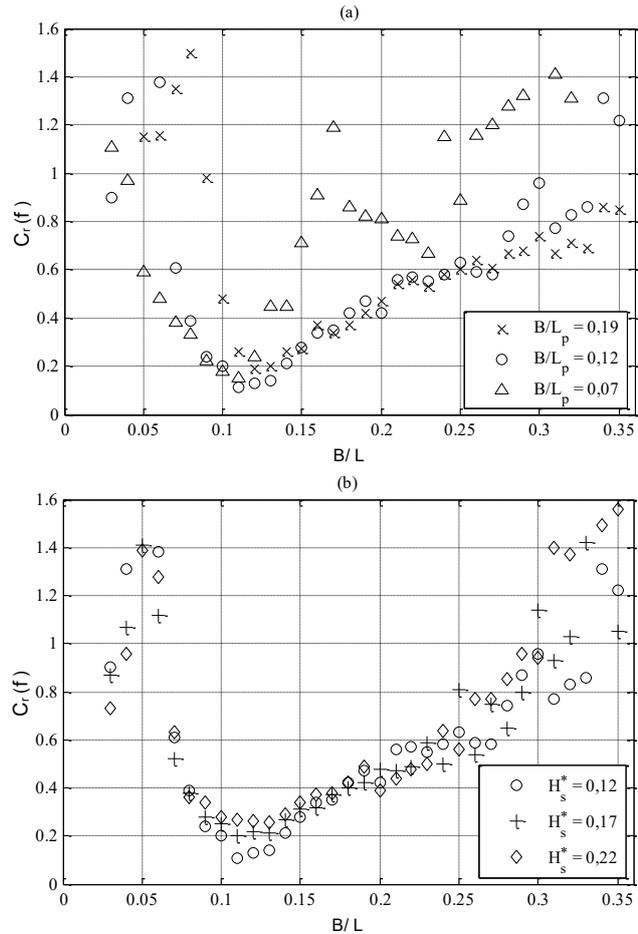


Figura 5.3: Rappresentazione del coefficiente di riflessione spettrale $C_r(f)$ in funzione di B/L : (a) influenza del periodo relativo di picco B/L_p per $H_s^*=0,11$; (b) influenza dell'altezza dell'onda incidente relativa H_s^* per $B/L_p=0,12$.

Dai risultati mostrati emerge che tutte le prove condotte forniscono valori di $C_r(f)$ maggiori di 1. Tale risultato sembrerebbe non avere una spiegazione fisica ed essere dovuto ad un errore. Tuttavia questo comportamento potrebbe essere indice di un trasferimento di energia tra le frequenze d'onda. La conversione di energia è funzione del moto oscillante dell'acqua dentro la camera e della conseguente compressione ed espansione dell'aria. Il comportamento è simile a

una sorgente oscillante con una frequenza che dipende dalla sua geometria e dal movimento d'onda. L'aria agisce come da filtro alle frequenze dell'onda che vengono convertite in frequenze del ciclo di compressione ed espansione dell'aria. L'onda incidente potrebbe non trovarsi in fase con il flusso d'aria e all'arrivo dell'onda l'aria regola istantaneamente la sua pressione, ma più lentamente la sua frequenza. Al contrario, l'onda potrebbe essere in fase con il flusso d'aria e quindi subisce l'energia della pressione memorizzata nella camera d'aria e non ancora convertita in energia cinetica. In questo caso, l'ampiezza della componente dell'onda riflessa è maggiore di quella incidente e il coefficiente spettrale $C_{r(f)}$ è maggiore di 1 e l'energia è immagazzinata all'interno del cassone mediante l'energia potenziale della pressione dell'aria.

5.2.2. Onde regolari

Il coefficiente di riflessione C_r è stato valutato anche per le prove con onde regolari, con le stesse caratteristiche geometriche del cassone OWC e con altezza d'onda H compresa tra 0,26m e 1,61m e periodo dell'onda T compreso tra 3s e 6s.

In Figura 5.4 viene mostrata l'influenza del diametro dell'orifizio sul C_r . Anche in questo caso, al crescere del d_0 il coefficiente di riflessione diminuisce, fino a raggiungere il valore minimo per $A_0/A_c = 0,9\%$, oltre il quale un ulteriore incremento del d_0 porta il coefficiente di riflessione a crescere, invertendo la sua tendenza. In funzione di quanto ottenuto, il minimo C_r si ha per B/L circa pari a 0,12.

In generale, il C_r è maggiore rispetto a quanto ottenuto con le onde irregolari. I valori maggiori di C_r si hanno per le condizioni geometriche che tendono alla configurazione di parete verticale, raggiungendo addirittura valori maggiori di 0,9 nel caso di apertura minima dell'orifizio. Per le onde irregolari, il C_r pari a 0,9 si ha nelle condizioni di orifizio chiuso. Tale risultato è affidabile in quanto

per onde regolari il C_r tende idealmente all'unità nella condizione di parete verticale.

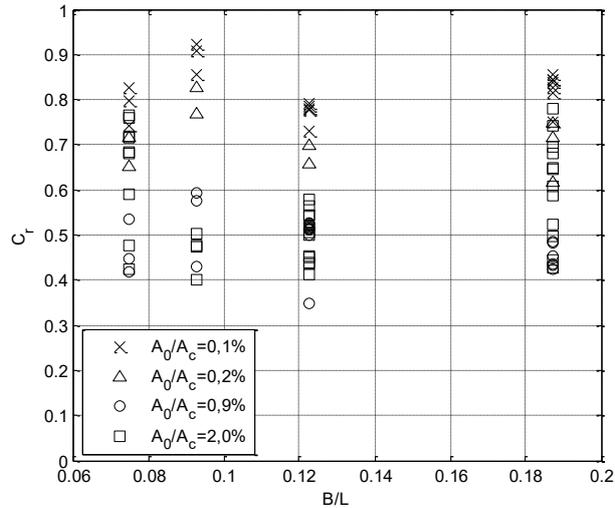


Figura 5.4: Rappresentazione del coefficiente di riflessione C_r in funzione di B/L : valutazione dell'influenza del diametro dell'orificio come area relativa A_0/A_c .

5.3. Misura delle pressioni e forze estreme

Le valutazioni sulle pressioni e sulle forze sono state eseguite sulla base delle sonde di pressione collocate secondo la disposizione di Figura 4.3. Sono stati utilizzati 13 sensori di pressione sia fuori che all'interno del cassone, con lo scopo di stimare la pressione in diversi punti rappresentativi della struttura. In particolare, cinque sensori di pressione sono posti all'esterno, sulla parete frontale del sistema, gli altri sono collocati all'interno della camera, di cui tre al tetto e cinque lungo la parete posteriore.

Il segnale della pressione è stato registrato a 1000 Hz, con lo scopo di esaminare gli effetti impulsivi sulla struttura. Preliminarmente all'analisi dei dati è stato necessario "pulire" il segnale mediante filtri numerici appositamente sviluppati. In alcuni punti, il segnale di pressione presenta una forte variazione di valori

attorno allo zero a causa della contemporanea presenza di aria e acqua nel sensore.

I valori delle pressioni considerati nell'analisi sono valutati a partite da un treno di 1000 onde e sono ottenuti come media dei primi 4 massimi valori, in modo da effettuare un'analisi 1/250 (Cuomo et al., 2010). Tale analisi è statisticamente più attendibile rispetto alla valutazione del massimo assoluto.

Considerando i punti di pressione delle sonde, sono stati ottenuti i diagrammi delle pressioni dell'acqua e quindi dell'onda che agisce sulla struttura. La sopraelevazione dell'onda di fronte al cassone è ottenuta interpolando linearmente i valori di sopraelevazione rilevati dalle sonde resistive appositamente collocate di fronte la struttura. Integrando la pressione nell'area di influenza attribuita alla rispettiva sonda è stata ottenuta la forza 1/250 agente sulle pareti del dispositivo.

La pressione, valutata su condizioni di onda selezionate con $A_0/A_c=0,90\%$, sono rappresentate in termini adimensionali rispetto a $\rho g H_{m0,i}$ in funzione del livello relativo dei trasduttori di pressione z/d e x/d .

In Figura 5.5 è riportata la pressione agente sulla parete frontale della camera valutando sia l'influenza del periodo di picco dell'onda con B/L_p che l'altezza delle onde incidenti con H_s^* . Inoltre la pressione registrata, riportata in figura con i simboli, è confrontata con la formulazione estesa di Goda (Takahashi et al., 1994), mostrata in figura con linee spesse. Il diagramma delle pressioni è valutato dall'imboccatura della camera dell'OWC fino al punto di impatto dell'onda sulla parete frontale, in cui la pressione tende a quella atmosferica.

La valutazione dell'influenza del periodo dell'onda, per $H_s^*=0,11$ in Figura 5.5 (a), mostra una buona corrispondenza tra le distribuzioni di pressione misurate con quelle stimate, con un valore massimo vicino al livello dell'acqua, cioè a $z/d=0$, soprattutto per $B/L_p=0,12$. Si osserva una lieve sovrastima rispetto ai valori misurati per piccoli $B/L_p=0,07$. La valutazione dell'influenza delle

altezze delle onde per $B/L_p = 0,12$ è eseguita in Figura 5.5. **L'origine riferimento non è stata trovata.** (b). In particolare, per piccole altezze dell'onda ($H_s^* \leq 0,12$) si ottiene una buona corrispondenza tra le distribuzioni di pressione misurate con quelle calcolate. Al crescere dell'altezza delle onde, i valori misurati tendono a spostare il massimo di pressione verso l'alto $z/d > 0$, quindi le pressioni ottenute dalla formulazione estesa di Goda sono sottostimate rispetto a quelle misurate.

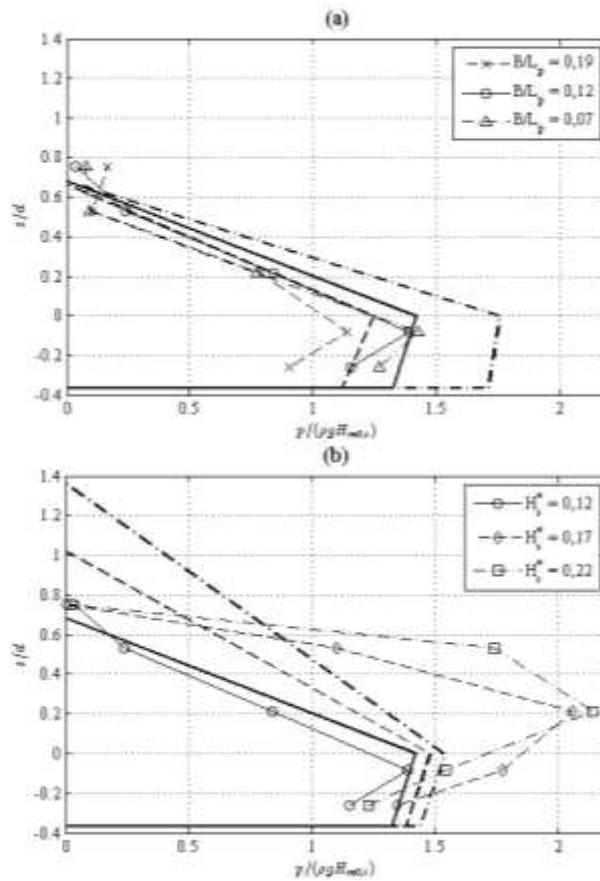


Figura 5.5: Distribuzione di pressione massima adimensionale ($1/250$) registrata e stimata sulla parte anteriore della camera: (a) influenza del periodo di picco dell'onda mediante B/L_p per $H_s^*=0,12$; (b) influenza dell'altezza dell'onda incidente relativa H_s^* per $B/L_p=0,12$.

Le misurazioni di pressione sulla parete verticale interna sono mostrate in Figura 5.6 insieme ai valori stimati, valutando sia l'influenza del periodo di picco dell'onda con B/L_p che l'altezza delle onde incidenti con H_s^* . In questo caso, la formulazione impiegata è quella di Takahashi e Shimosako (1994) sviluppata per la valutazione dei carichi all'interno di un cassone forato. Le pressioni stimate, nonostante le differenze tra i due cassoni considerati, colgono qualitativamente bene le misurazioni: le pressioni tendono ad aumentare dal fondo verso il livello $z/d=0$ dove raggiungono il massimo e poi tendono nuovamente a diminuire verso il tetto del cassone. Si osserva che le distribuzioni di pressione misurate e quelle stimate hanno lo stesso andamento qualitativo della parete frontale. La valutazione dell'influenza del periodo dell'onda, Figura 5.6 (a), mostra che i valori stimati sono maggiori di quelli misurati. Anche osservando l'influenza delle altezze d'onda, Figura 5.6**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** (b), si osserva che per $H_s^* \leq 0,12$ le pressioni stimate sono maggiori di quelle misurate; la tendenza si inverte se le condizioni dell'onda diventano impulsive per $H_s^* \geq 0,17$, per cui i massimi valori di pressione vengono sottostimati dalle formulazioni applicate.

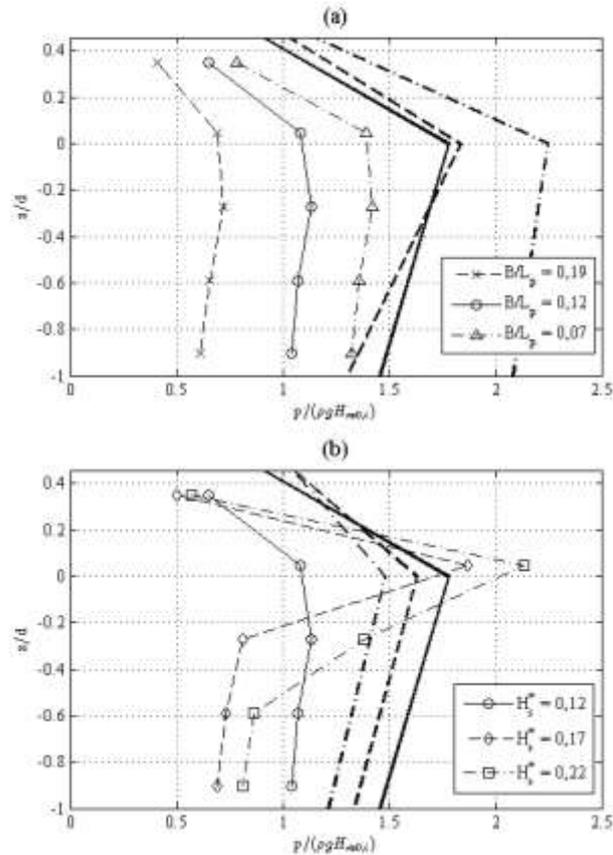


Figura 5.6: Distribuzione di pressione massima adimensionale (1/250) registrata e stimata sulla parte interna posteriore della camera: (a) influenza del periodo di picco dell'onda mediante B/L_p per $H_s^* = 0,12$; (b) influenza dell'altezza dell'onda incidente relativa H_s^* per $B/L_p = 0,12$.

Le distribuzioni della pressione adimensionali sul tetto della camera sono rappresentate in Figura 5.7, rispetto alla posizione relativa delle sonde, ed in particolare è misurata l'aria compressa nella parte superiore della camera. La Figura 5.7 (a) mostra che le pressioni sono inversamente proporzionali a B/L_p , ma poco influenzate dal periodo di picco dell'onda, dunque possono essere considerate costanti. L'influenza dell'altezza d'onda, mostrata in Figura 5.7 (b), diventa importante per $H_s^* > 0,12$. Per $H_s^* = 0,12$ l'andamento delle pressioni è costante, al di sopra di questo valore si osserva un picco di pressione all'angolo

posteriore del tetto. Questo è probabilmente causato dal getto d'acqua che colpisce la parete posteriore e influenza la pressione dell'aria al tetto. Tale getto è attribuibile alle turbolenze che avvengono dentro la camera e che possono causare problemi alla turbina ad aria da installare nel sistema.

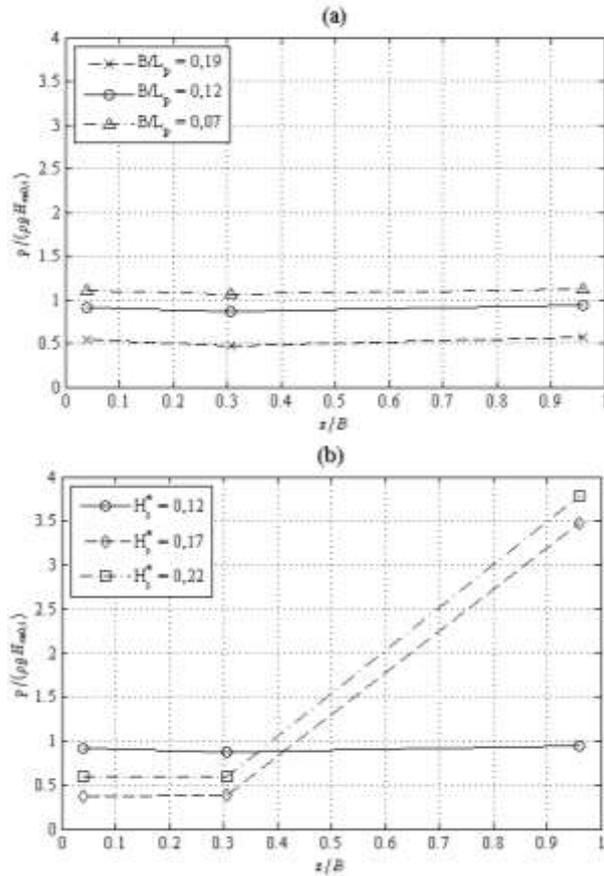


Figura 5.7: Distribuzione di pressione massima adimensionale (1/250) registrata al tetto della camera. (a) influenza del periodo di picco dell'onda mediante B/L_p per $H_s^* = 0.12$; (b) influenza dell'altezza dell'onda incidente relativa H_s^* per $B/L_p = 0.12$.

In definitiva, sulle pressioni ciò che maggiormente influenza l'andamento sono le altezze d'onda incidenti, soprattutto quando $H_s^* > 0,12$ in cui si risente di valori di pressione impulsivi.

Le forze massime misurate, definite con l'analisi 1/250 dei massimi delle forze che agiscono sul cassone, sono riportate in rapporto a quelle stimate $F_{\text{misurata}}/F_{\text{stimata}}$ considerando l'influenza dell'altezza d'onda incidente H_s^* e del diametro dell'orifizio come A_0/A_c .

Come per le pressioni, le forze agenti sulla parete frontale del cassone, sono state confrontate con quelle stimate dal metodo esteso di Goda (Figura 5.8). La linea continua orizzontale rappresenta la corrispondenza tra le forze misurate e quelle previste: i punti al di sotto di tale linea corrispondono ai casi in cui i valori misurati sono minori dei valori stimati; i punti sopra la linea corrispondono ai casi in cui i valori misurati sono maggiori di quelli stimati. Le forze massime sono inversamente proporzionali alla apertura dell'orifizio e maggiori per la condizione $A_0/A_c = 0,90\%$, in cui sono state testate più condizioni d'onda. L'errore relativo è inferiore al 40% quando $H_s^* < 0,2$, indipendentemente dall'apertura dell'orifizio.

In particolare, la formulazione estesa di Goda sovrastima la forza misurata per $H_s^* = 0,12$ ($F_{\text{misurata}}/F_{\text{stimata}} < 1$), cioè per le onde non impulsive, in accordo con quanto mostrato in Figura 5.5 (b). Quando aumenta H_s^* , la pressione supera le stime effettuate per mezzo della formula di Goda poiché gli effetti impulsivi sono maggiori. Per $0 < H_s^* < 0,12$ si mostra quindi una sottostima delle misurazioni rispetto alle formulazioni di Goda, probabilmente legato agli effetti di scala. Tuttavia, le pressioni e le forze sulla parete frontale aumentano sempre con H_s^* e in modo particolare per $H_s^* > 0,2$ le forze aumentano repentinamente e le stime diventano incerte. Per la configurazione ottimale $A_0/A_c = 0,90\%$ l'altezza d'onda incidente relativa $H_s^* = 0,16$ provoca una inversione di tendenza: per $H_s^* < 0,16$ le forze predette con la formula di Goda sovrastimano lievemente le forze

misurate, mentre per $H_s^* > 0,16$ le forze predette sottostimano quelle misurate. Tale valore di altezza incidente si ritrova anche nelle sezioni successive e rappresenta un valore da tenere presente per il sistema.

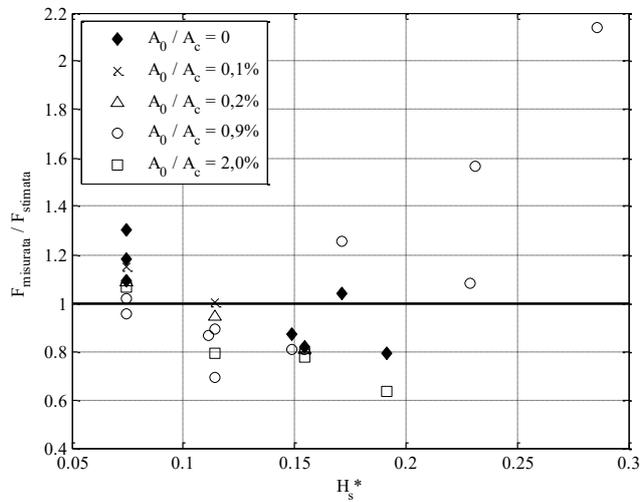


Figura 5.8: Rapporto $F_{\text{misurata}}/F_{\text{stimata}}$ tra forze misurate e quelle stimate (1/250) della parete frontale esterna del cassone, influenza dell'altezza dell'onda incidente relativa H_s^* e dell'apertura dell'orifizio A_0/A_c .

Nella Figura 5.9 è rappresentato il rapporto tra le forze misurate e quelle stimate rispetto alle formulazioni di Takahashi e Shimosako (1994) per la parete posteriore, anche queste in funzione dell'altezza d'onda incidente H_s^* e della variazione dell'apertura dell'orifizio A_0/A_c . Le forze sono generalmente inversamente proporzionali all'apertura dell'orifizio e le forze misurate sono generalmente maggiori rispetto a quelle stimate. In particolare, per la dimensione ottimale dell'orifizio ($A_0/A_c=0,90\%$) il metodo sovrastima i valori di forza misurati.

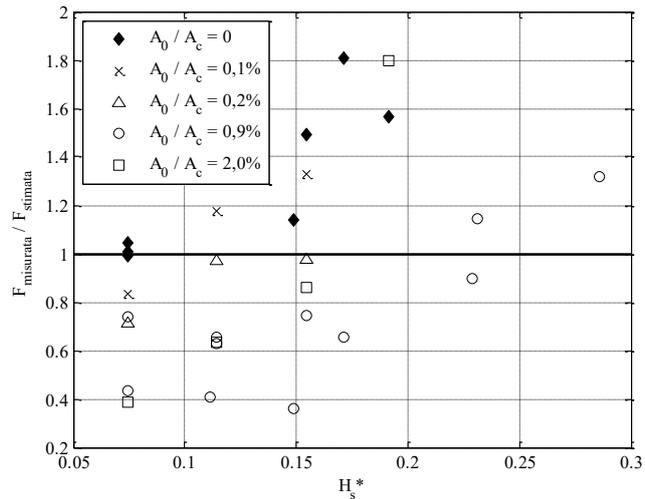


Figura 5.9: Rapporto $F_{\text{misurata}}/F_{\text{stimata}}$ tra forze misurate (1/250) e quelle stimata sulla parete interna posteriore del cassone; influenza dell'altezza dell'onda incidente relativa H_s^* e dell'apertura dell'orifizio A_0/A_c .

In Figura 5.10, sono rappresentate le forze massime misurate (1/250) al tetto del cassone, valutando l'influenza di H_s^* e A_0/A_c . Tali forze sono rese adimensionali rispetto all'altezza d'onda incidente significativa H_{si} , la larghezza della camera B e quella trasversale B_t . L'andamento è generalmente crescente al crescere di H_s^* . L'apertura dell'orifizio ottimale sembra avere carichi interni significativamente inferiori per $H_s^* < 0,16$, rispetto alle altre aperture dell'orifizio testate. Inoltre, il valore maggiore si ha con apertura dell'orifizio maggiore tra quelli testati, piuttosto che in condizioni di orifizio chiuso. Questo potrebbe essere dovuto al fatto che in condizioni di orifizio chiuso c'è poco movimento dell'acqua all'interno della camera. Tale condizione contrasta la formazione di getti d'acqua che causano i massimi di pressione e forza sul lato posteriore del tetto della camera.

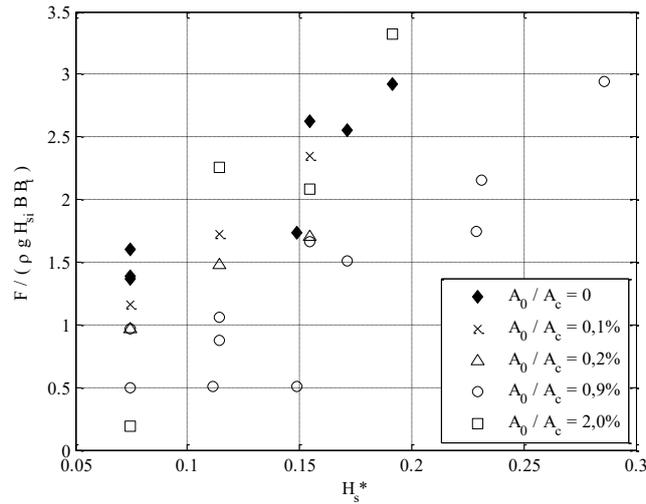


Figura 5.10: Forze massime misurate (1/250) adimensionali al tetto del cassone, influenza dell'altezza dell'onda incidente relativa H_s^* e dell'apertura dell'orificio A_0/A_c .

In definitiva, l'influenza dell'altezza d'onda H_s^* è significativa per le pressioni e diventa particolarmente importante per le forze esterne agenti sulla parete frontale e per il tetto del cassone. In particolare, per $H_s^* = 0,16$ si ha il valore che indica un cambio di tendenza nel comportamento del sistema. La dimensione dell'orificio ha più influenza sulle forze interne e sul tetto della camera, piuttosto su quelle esterne all'OWC.

5.4. Valutazioni sul periodo proprio di oscillazione

Il ritardo temporale T^* tra il flusso all'interno della camera q e la pressione esercitata dall'onda Δp sulla parte più bassa della parete anteriore, all'imboccatura della camera, è qui valutato secondo quanto proposto da Boccotti (2007). Essendo il periodo proprio del sistema funzione della dimensione della camera, è stata valutata la lunghezza naturale di oscillazione del sistema L^* ottenuta iterativamente dalla seguente espressione:

$$L^* = \frac{g(4T^*)^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L^*}\right) \quad (5.2)$$

L'equazione (5.2) è ottenuta applicando la nota legge di dispersione lineare, espressa in funzione della lunghezza L^* considerando la profondità di imbasamento del dispositivo e come periodo proprio il periodo T^* .

In Figura 5.11 viene riportato, per la configurazione con diametro ottimale, il coefficiente di risonanza R in funzione di B/L^* . Il sistema funziona vicino alle condizioni di risonanza solo in determinate condizioni per rapporti di B/L^* molto piccoli.

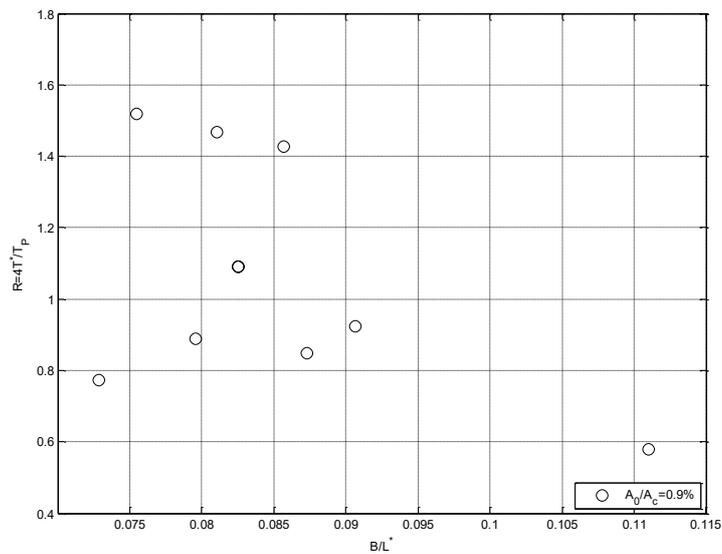


Figura 5.11: Rappresentazione del coefficiente di risonanza R in funzione del rapporto B/L^* .

5.5. Idrodinamica della colonna d'acqua oscillante

I risultati del modello fisico a grande scala, relativi alle prove condotte con onde regolari, sono stati utilizzati per studiare l'interazione l'idrodinamica all'interno della camera pneumatica dell'OWC. Il fine ultimo è quello di

descrivere e stimare i meccanismi in atto all'interno della camera all'interfaccia aria-acqua.

L'attenzione si è concentrata sul legame tra la elevazione di superficie η e la pressione p all'interno della camera. La formulazione teorica adottata prende spunto dal modello proposto da Takahashi (1988), ma in più il processo di trasformazione dell'aria viene qui ipotizzato isotermico; di conseguenza non viene tenuta in considerazione l'equazione (3.17) riportata nel precedente Capitolo 3. Il legame esistente tra l'elevazione di superficie e la pressione dell'aria nella camera è stato investigato al variare dell'apertura dell'orifizio, utilizzato negli esperimenti per simulare l'efflusso d'aria attraverso la turbina.

L'analisi è stata condotta considerando la media delle pressioni registrate al tetto della camera dalle tre sonde P06, P07 e P13. Tale operazione è giustificabile in quanto l'analisi condotta sulle pressioni a grande scala all'interno della camera mostra un andamento costante delle pressioni al tetto per onde non impulsive, come mostrato nel paragrafo precedente. Essendo le pressioni registrate a 1000Hz, prima di valutare la derivata nel tempo dp/dt delle pressioni è stato applicato un filtro. Analogamente sono state considerate le sopraelevazioni registrate dalle sonde poste all'interno della camera, in particolare è stata considerata la sonda centrale WG11. Il segnale di sopraelevazione è stato filtrato e successivamente derivato.

Nel caso di orifizio chiuso, il rapporto tra l'area dell'orifizio e la sezione trasversale della camera $\varepsilon = A_o/A_c=0$ e l'equazione (3.17) si riduce a:

$$\frac{dp^*}{dt} = \gamma \frac{p + p_0}{h_a - \eta} \frac{d\eta}{dt} \quad (5.3)$$

Si precisa che nell'altezza della camera d'aria h_a è stata considerata la somma tra l'altezza della camera d'aria e l'equivalente altezza del condotto verticale.

Le variabili presenti nella formulazione presa in esame, relativamente ad una prova su modello fisico eseguita con onde regolari, sono riportate in Figura 5.12.

In particolare, l'andamento nel tempo delle pressioni e della elevazione di superficie dentro la camera sono in fase, così come le loro derivate. Tale risultato è valido per tutte le condizioni d'onda testate in laboratorio, nel caso di orifizio chiuso.

Tale andamento è giustificato dal fatto che, nel caso di orifizio chiuso, l'aumento della elevazione di superficie dentro la camera riduce il volume dell'aria e causa un istantaneo aumento della pressione. Viceversa, una diminuzione della elevazione di superficie fa aumentare il volume d'aria e ridurre la pressione. Per tale ragione i segnali di pressione relativa d'aria e elevazione di superficie sono sincroni.

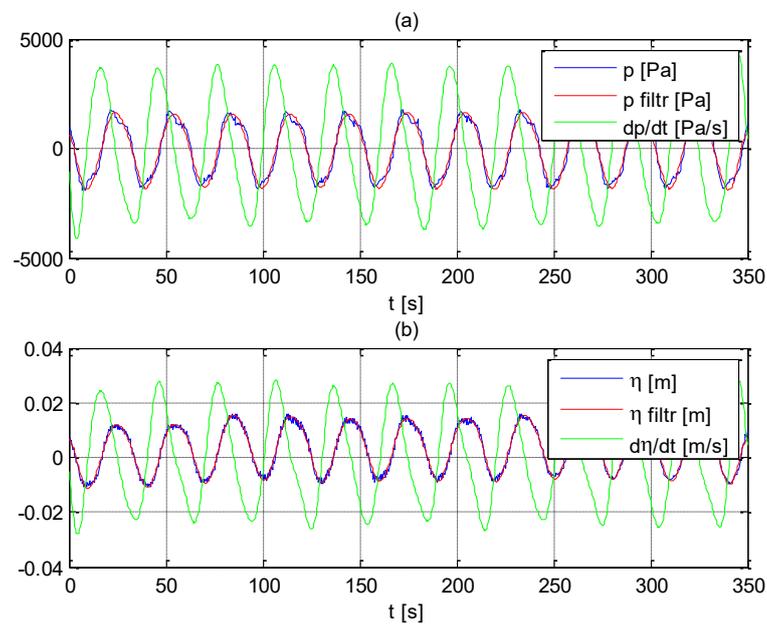


Figura 5.12: Andamento dei segnali registrati dentro la camera, con orifizio chiuso $A_0/A_e=0\%$, per onde incidenti regolari aventi altezza $H=0,26\text{m}$ e periodo $T=3\text{s}$: (a) pressioni registrate nella camera (segnale blu), pressioni filtrate (segnale rosso) e derivata delle pressioni nel tempo (segnale verde); (b) elevazione di superficie η dentro la camera (segnale blu), segnale di η filtrato (in rosso) e derivata nel tempo della elevazione di superficie (segnale verde).

La Figura 5.13 mostra che la variazione di pressione dentro la camera è in buon accordo con la formulazione teorica presa in esame sia in termini di ampiezza che di fase della variabile dp^*/dt . Anche questo risultato è valido per le diverse condizioni d'onda testate in laboratorio.

Dal confronto tra i dati registrati e quanto ottenuto dalla formulazione presa in esame, è possibile procedere alla calibrazione del modello numerico ed in particolar modo del parametro γ , esponente della politropica. Tale parametro è considerato compreso tra 1 e 1,4 (Falcao e Henriques, 2014). Variando opportunamente tale parametro in questo range di valori è possibile fare in modo che la sovrapposizione dei due segnali sia la più simile possibile. Nel caso in cui si consideri il parametro γ pari ad 1,4, con la formulazione si ottengono dei valori leggermente superiori della variazione di pressione rispetto a quelli registrati. Viceversa, se si considera γ pari ad 1 la formulazione in esame fornisce valori inferiori rispetto a quelli registrati di dp^*/dt . I risultati della formulazione proposta si adattano molto bene ai dati forniti dagli esperimenti quando il rapporto tra i calori specifici è compreso tra 1,1 e 1,2. Per le considerazioni successive è stato fissato γ pari ad 1,1.

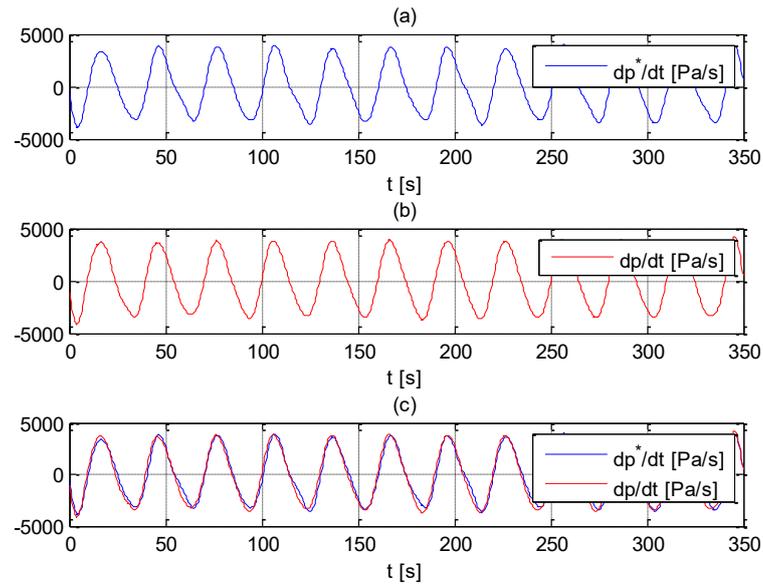


Figura 5.13: Andamento della variazione istantanea di pressione dentro la camera, con orifizio chiuso $A_0/A_c=0\%$, nelle condizioni $H=0,26\text{m}$ e $T=3\text{s}$: (a) modello di Takahashi dp^*/dt (segnale blu); (b) segnale registrato all'interno della camera dp/dt (segnale rosso); (c) confronto tra il modello numerico e il segnale registrato.

Una volta calibrato il parametro γ , il modello di Takahashi è stato testato nel caso di orifizio aperto.

Osservando l'andamento dei segnali registrati dentro la camera nel tempo, mostrati in Figura 5.14, si nota che l'elevazione di superficie non è più in fase con la pressione ma risulta essere in anticipo. Si nota, inoltre, che la derivata della elevazione di superficie è in fase con il segnale di pressione. Si può quindi dedurre che l'accelerazione dell'elevazione di superficie sarà in fase con la derivata della pressione.

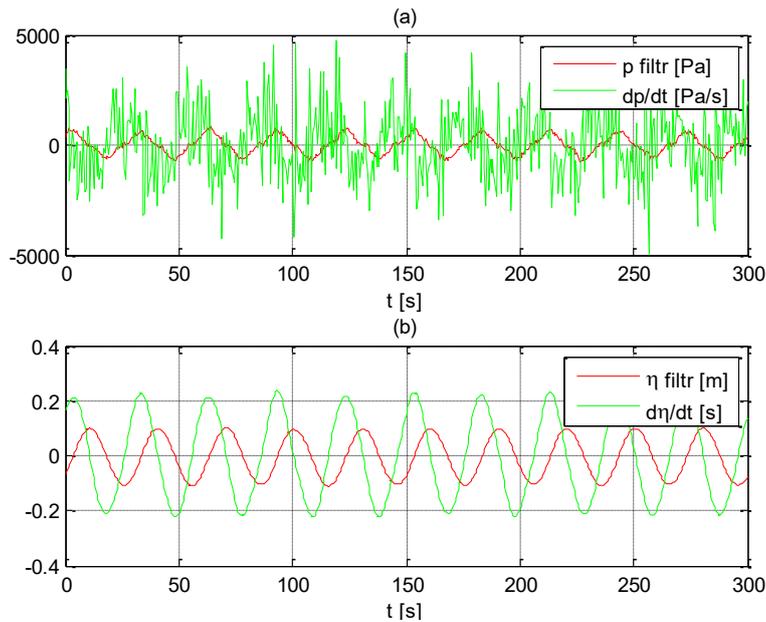


Figura 5.14: Andamento dei segnali registrati dentro la camera, con orifizio ottimale $A_0/A_c=0,9\%$, nelle condizioni $H=0,26\text{m}$ e $T=3\text{s}$: (a) pressioni filtrate (segnale rosso) e derivata delle pressioni nel tempo (segnale verde); (b) sopraelevazioni dell'onda filtrate (segnale rosso) e derivata delle sopraelevazioni dell'onda (segnale verde).

Quando l'orifizio è aperto, la formulazione teorica di Takahashi a cui fare riferimento è quella espressa nel Capitolo 3 (eq. 3.17). Il termine contenente il rapporto di apertura dell'orifizio ε , non è più trascurabile anzi diventa predominante rispetto al primo termine dell'equazione. I valori di dp^*/dt ottenuti dall'espressione di Takahashi non sono più confrontabili con i risultati del modello fisico (Figura 5.15) poiché risultano essere più grandi di un ordine di grandezza e per di più sfasati rispetto ai valori registrati.

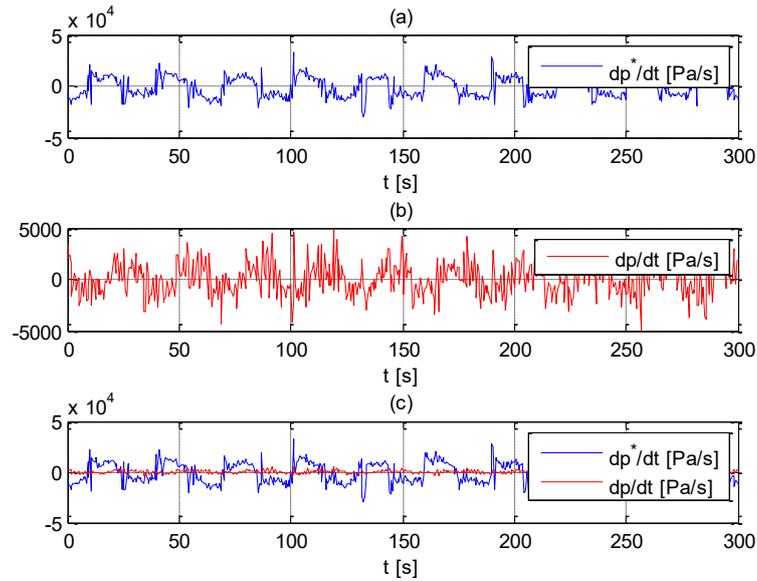


Figura 5.15: Andamento della variazione istantanea di pressione dentro la camera, con orifizio ottimale $A_0/A_c=0,9\%$, nelle condizioni $H=0,26\text{m}$ e $T=3\text{s}$: (a) modello di Takahashi dp^*/dt (segnale blu); (b) segnale registrato all'interno della camera dp/dt (segnale rosso); (c) confronto tra il modello numerico e il segnale registrato.

5.5.1. Proposta di una formulazione empirica

L'analisi dei dati registrati dentro la camera, nel corso degli esperimenti condotti con orifizio aperto, ha fatto emergere che la derivata della pressione non è in fase con la derivata prima dell'elevazione di superficie e quindi con la velocità dell'acqua dentro la camera, bensì è in fase con la derivata seconda della sopraelevazione dell'onda, ossia con l'accelerazione del flusso d'acqua (Figura 5.16 a e b).

Si è dunque proceduto alla formulazione di un modello numerico semplice che lega la pressione con la sopraelevazione dell'onda all'interno della camera. Tenendo conto di quanto osservato dal confronto con i dati, si può scrivere:

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{owc} = k_p \left(\frac{d^2\eta}{dt^2}\right) \quad (5.4)$$

Assimilando il comportamento della camera a quello di una molla, è possibile definire k_p una costante ottenuta dalla media del valore assoluto della derivata delle pressioni:

$$k_p = \text{media} \left| \left(\frac{dp}{dt} \right) \right| \quad (5.5)$$

La applicazione di questa formulazione è mostrato in Figura 5.16 (c). La formulazione così ottenuta descrive bene ciò che avviene nella camera, in accordo con quanto ottenuto da Sheng et al. (2013): (i) quando l'accelerazione $\frac{d^2\eta}{dt^2}$ è maggiore di zero il moto è accelerato e diretto verso l'alto, così come la pressione; (ii) quando $\frac{d^2\eta}{dt^2}$ è negativo il moto è decelerato e diretto verso il basso. Si nota inoltre che la fase di passaggio tra l'accelerazione e la decelerazione è repentina. I due comportamenti del sistema quando è chiuso o meno sono diversi. Quando l'orifizio è chiuso la variazione di superficie provoca istantaneamente una variazione di pressione. Ad orifizio aperto, la variazione dell'elevazione di superficie potrebbe non essere sufficiente a provocare una variazione di pressione oltre che di efflusso d'aria, nel caso limite di moto stazionario. La variazione della velocità dell'acqua dentro la camera causa una variazione di velocità di efflusso d'aria e quindi della pressione dell'aria stessa.

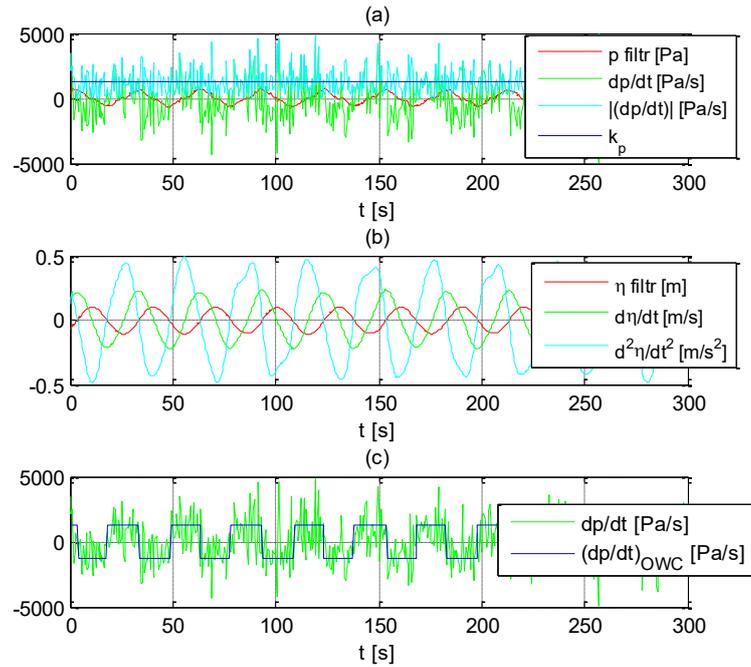


Figura 5.16: Andamento dei segnali registrati dentro la camera, con orifizio ottimale $A_0/A_c=0,9\%$, nelle condizioni $H=0,26\text{m}$ e $T=3\text{s}$: (a) pressioni filtrate (segnale rosso), derivata delle pressioni nel tempo (segnale verde), pressioni in valore assoluto (segnale ciano) e valore medio (segnale blu); (b) sopraelevazioni dell'onda filtrate (segnale rosso), derivata delle sopraelevazioni dell'onda (segnale verde) e derivata seconda delle sopraelevazioni dell'onda (segnale ciano); (c) formulazione empirica proposta.

In Figura 5.17 sono mostrate le variazioni di pressione istantanee in funzione delle condizioni ondose in ingresso, al variare dell'apertura dell'orifizio. Si osserva che la variazione istantanea di pressione cresce al crescere dell'altezza d'onda e i valori maggiori si raggiungono per orifizio diverso da quello ottimale, ossia per $A_0/A_c=0,9\%$.

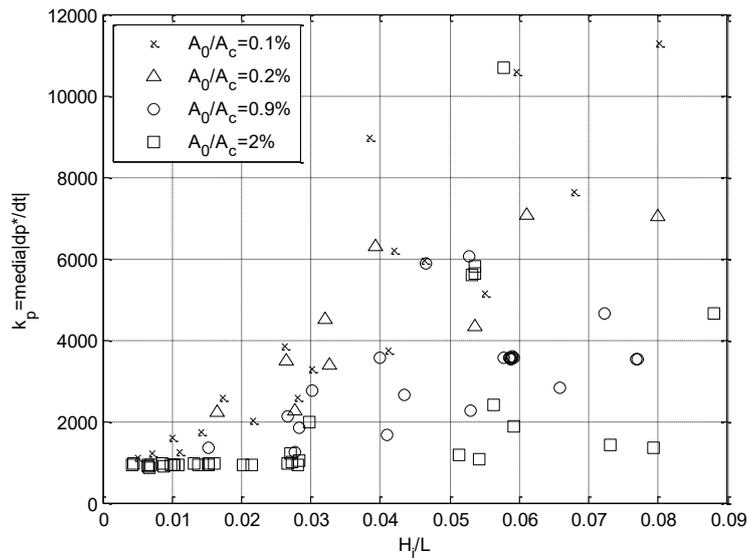


Figura 5.17: Andamento del coefficiente k_p , rispetto all'altezza dell'onda, per i diversi diametri testati.

Inoltre, nel caso di orifizio ottimale l'andamento del modello numerico si adatta bene a quello registrato dalle pressioni, mentre non è così per le altre aperture dell'orifizio (Figura 5.18 e Figura 5.19).

Nella Figura 5.18 si mostra l'apertura dell'orifizio minore di quella ottimale. In questo caso il sistema si trova in una condizione intermedia tra l'orifizio chiuso e quello ottimale, quindi il modello empirico che possa definire l'andamento della variazione istantanea di pressione sarà intermedio tra il modello proposto da Takahashi (1988) e l'eq. (5.4). Si osserva, di fatto, un lieve sfasamento tra la variazione istantanea di pressione e il modello proposto in eq. (5.4).

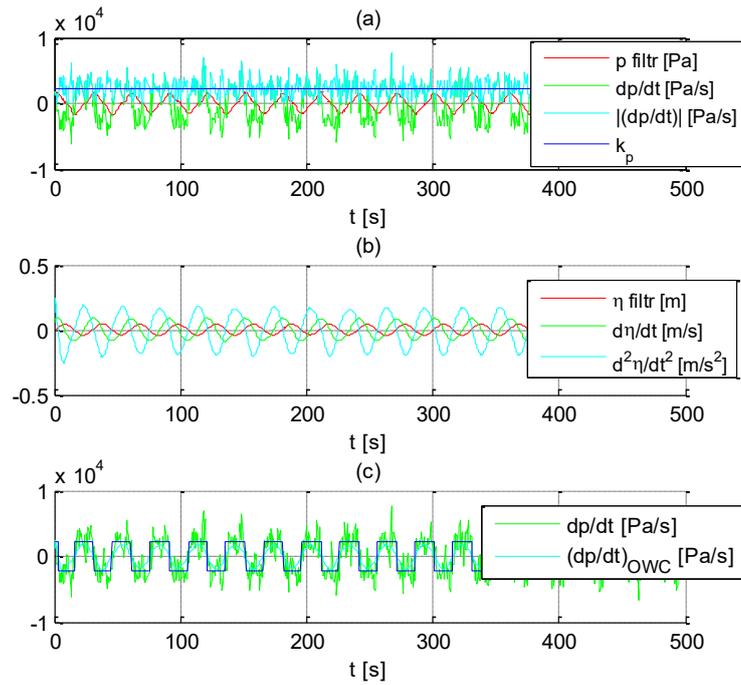


Figura 5.18: Andamento dei segnali registrati dentro la camera, con orifizio $A_0/A_c=0,1\%$, nelle condizioni $H=0,26\text{m}$ e $T=3\text{s}$: (a) pressioni filtrate (segnale rosso), derivata delle pressioni nel tempo (segnale verde), pressioni in valore assoluto (segnale ciano) e valore medio (segnale blu); (b) sopraelevazioni dell'onda filtrati (segnale rosso), derivata delle sopraelevazioni dell'onda (segnale verde) e derivata seconda delle sopraelevazioni dell'onda (segnale ciano); (c) formulazione empirica proposta.

Nella Figura 5.19 si mostra l'apertura dell'orifizio maggiore di quella ottimale. In questo caso la variazione istantanea di pressione non si adatta al modello proposto in eq. (5.4), sono necessarie ulteriori indagini per definire bene tale l'andamento.

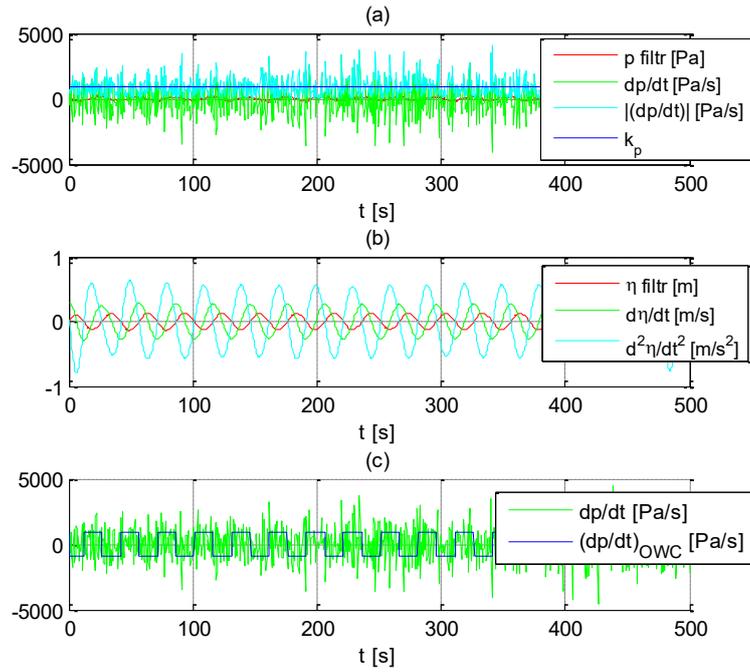


Figura 5.19: Andamento dei segnali registrati dentro la camera, con orifizio $A_0/A_c=2\%$, nelle condizioni $H=0,26\text{m}$ e $T=3\text{s}$: (a) pressioni filtrate (segnale rosso), derivata delle pressioni nel tempo (segnale verde), pressioni in valore assoluto (segnale ciano) e valore medio (segnale blu); (b) sopraelevazioni dell'onda filtrate (segnale rosso), derivata delle sopraelevazioni dell'onda (segnale verde) e derivata seconda delle sopraelevazioni dell'onda (segnale ciano); (c) formulazione empirica proposta.

6. ANALISI DEGLI EFFETTI DI SCALA

6.1. Generalità

Nel presente capitolo vengono valutati gli effetti di scala relativi alla modellazione fisica di un OWC, con riferimento al suo periodo proprio di oscillazione, alla riflessione del moto ondoso, alle azioni delle onde sul dispositivo. In particolare, vengono confrontati il dispositivo a grande scala testato nel canale GWK dell'Università di Hannover e due modelli a piccola scala testati nel Laboratorio di Idraulica dell'Università di Catania. Le caratteristiche geometriche di tali modelli sono descritte nel Capitolo 4. Tutte le prove prese in considerazione in questa analisi sono state condotte con onde irregolari al fine di investigare il comportamento del dispositivo in condizioni realistiche. I risultati della presente attività sono in parte oggetto di un articolo dal titolo “Scale effects in physical modelling of a generalized OWC” sottomesso per la pubblicazione sulla rivista internazionale Ocean Engineering.

6.2. Periodo proprio di oscillazione

L'approccio olistico proposto da Boccotti (2007) per la valutazione del periodo T^* è stato applicato al modello a grande scala e a quello a piccola scala, sulla base dell'espressione (3.1).

Per valutare gli effetti di scala sull'idrodinamica del sistema, si è scelto di esprimere T^* attraverso la lunghezza naturale di oscillazione del sistema L^* ottenuta iterativamente dalla equazione (5.2). I risultati ottenuti sono mostrati in Figura 6.1 in termini del parametro adimensionale B/L^* e in funzione del numero di Froude definito da Sheng et al. (2014):

$$Fr = \frac{\pi H_{m0,i}/T_p}{\sqrt{gB}} \quad (6.1)$$

dove g è l'accelerazione di gravità e B è la larghezza della camera.

Per ogni configurazione testata si nota un differente asintoto orizzontale, per valori crescenti di Fr . Questa tendenza è evidenziata dalle interpolazioni iperboliche applicate sui risultati. In particolare, la piccola scala presenta valori asintotici di B/L^* pari a circa 1,1-1,2 e minori rispetto alla grande scala, pari a 1,5. Questo comportamento è legato alla grande perdita di energia della piccola scala che riduce la velocità del fluido all'interno della camera e aumenta il periodo proprio delle oscillazioni della colonna d'acqua. Tale perdita di energia è maggiore per la configurazione a piccola scala con la camera più alta. Nella piccola scala l'incremento dell'altezza della camera provoca la riduzione del valore asintotico di B/L^* di circa il 10% rispetto alla camera con altezza minore. È possibile spiegare il fenomeno pensando che la colonna d'acqua si oppone alla pressione dell'aria come una molla. Se aumenta il volume d'aria, la colonna d'acqua è meno opposta dalla pressione dell'aria, come una molla più debole. Aumenta così il periodo proprio di oscillazione della colonna d'acqua e si riduce B/L^* .

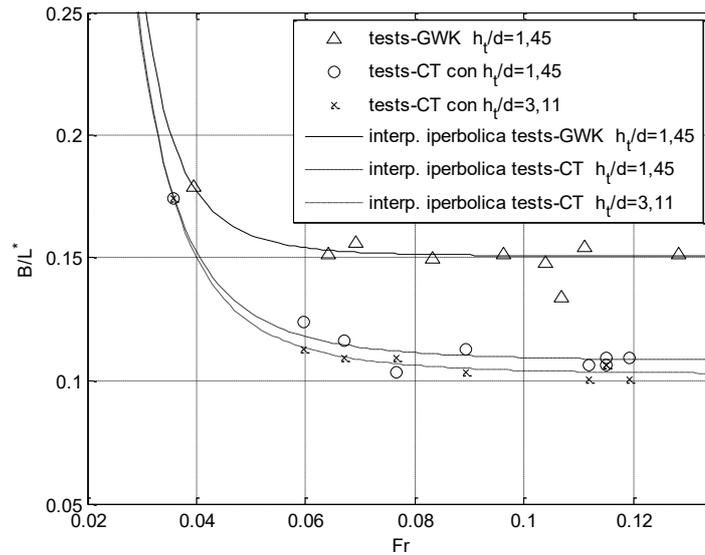


Figura 6.1: Rappresentazione della larghezza della camera B rispetto alla lunghezza naturale di oscillazione del sistema L^* in funzione del numero di Froude.

6.3. Moto ondosso

L'interazione tra il moto ondosso e l'OWC può essere valutata attraverso il coefficiente di riflessione. Tale coefficiente è stato ottenuto, per il modello a grande scala, con il metodo delle quattro sonde di Faraci et al. (2015), mentre per il modello a piccola scala è impiegato il metodo delle tre sonde formulato da Mansard e Funke (1980). Avendo dimostrato nel Capitolo precedente che i due metodi forniscono gli stessi risultati, il confronto del coefficiente di riflessione con i due metodi è ritenuto affidabile.

I metodi forniscono gli spettri di energia dell'onda incidente e riflessa in funzione della frequenza f di ciascuna componente dell'onda. In tal modo è stato possibile analizzare per ogni valore di f il coefficiente di riflessione spettrale $C_r(f)$, come rapporto tra lo spettro riflesso e quello incidente sulla base dell'espressione (3.4), e il coefficiente di riflessione totale C_r , come rapporto delle aree sottese dallo spettro riflesso e quello e incidente sulla base della (3.5).

La configurazione geometrica considerata è quella di Tabella 4.2 ed il confronto del C_r ottenuto in funzione di B/L_p dalla grande e piccola scala è mostrato in Figura 6.2. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, dove i simboli asterisco rappresentano i risultati estrapolati per il GWK con $A_0/A_c=0,90\%$, triangolo e rombo rappresentano invece i risultati ottenuti nel Laboratorio di Idraulica dell'Università di Catania per $A_0/A_c=0,70\%$. Si precisa che, a causa delle approssimazioni eseguite sui parametri geometrici in fase di realizzazione del modello a piccola scala, il rapporto B/L_p tra i due modelli non coincide esattamente. La Figura 6.2 riporta un'extrapolazione lineare del C_r a grande scala rispetto al rapporto B/L_p .

In particolare, si fa riferimento alla configurazione ottimale ottenuta dagli esperimenti eseguiti nel GWK con $A_0/A_c=0,90\%$, $a/d=0,37$ e $h_i/d=1,45$, e le due configurazioni testate in piccola scala con le diverse altezze della camera d'aria, con $A_0/A_c=0,70\%$, $a/d=0,33$, $h_i/d=1,45$ e $h_i/d=3,11$.

Per le prove selezionate, gli esperimenti su larga scala mostrano C_r compreso in un intervallo tra 0,48 e 0,6 con valore minimo per $B/L_p = 0,09$, mentre per esperimenti a piccola scala C_r è compreso tra 0,4-0,5 con un minimo per $B/L_p = 0,13$, in entrambe le configurazioni con diversa altezza.

Dal confronto emerge che C_r è maggiore per la larga scala e minore per la piccola scala, in accordo con quanto ottenuto per una diga a scogliera da Delmonte (1972), Wilson e Cross (1972) e Shimada et al. (1986). Tale risultato è invece in disaccordo con quanto ottenuto da Altomare et al. (2013) per un cassone antiriflettente con cella riempita di massi.

Inoltre per le configurazioni considerate, il C_r converge a circa 0,5 per piccoli rapporti di B/L_p , mentre tende ad allontanarsi al crescere di B/L_p . La spiegazione è da cercare nella relazione tra il periodo di picco e la lunghezza dell'onda: maggiore è T_p maggiore è la lunghezza dell'onda L_p tale che l'onda non subisce l'influenza della camera, indipendentemente dalla scala. La lunghezza dell'onda

L_p è prossima alla larghezza della camera fino al punto che per $B/L_p = 0,07$ i valori di C_r possono considerarsi uguali per le configurazioni considerate. Al diminuire di T_p la lunghezza dell'onda L_p si riduce fino a risentire della presenza della camera ed aumenta la differenza tra i valori di C_r .

In particolare, i valori di C_r ottenuti per la camera con $h/d=3,11$ (rombi) sono lievemente superiori rispetto a quelli ottenuti con $h/d=1,45$ (triangoli), altezza della camera scalata geometricamente. Questo lascerebbe pensare che con un'altezza dell'aria della camera pari a quella del modello a grande scala, o con un volume di aria pari a quello della camera a grande scala, i valori di C_r avrebbero potuto raggiungere i valori ottenuti a grande scala, in accordo con Weber (2007). In Figura 6.2 è rappresentato il C_r ottenuto con l'estrapolazione lineare dei dati delle configurazioni di piccola scala, considerando l'altezza dell'aria h_a pari a quella del modello a grande scala, cioè 0,72.

L'estrapolazione consente di aumentare i coefficienti di riflessione ottenuti dal modello a piccola scala. Tuttavia, non vengono raggiunti i valori di C_r ottenuti nel modello a grande scala. Le curve interpolanti del coefficiente di riflessione della grande scala e quelli ottenuti dall'estrapolazione lineare evidenziano come tali risultati si discostino nel range di $B/L_p = 0,1-0,15$ in cui si ottiene il minimo C_r . Questi valori di B/L_p sono vicini ai valori di B/L^* trovati nella sezione precedente. È possibile affermare che gli effetti di scala sono più importanti sulla riflessione delle onde per onde incidenti che hanno il periodo di picco vicino al periodo di oscillazione naturale del OWC.

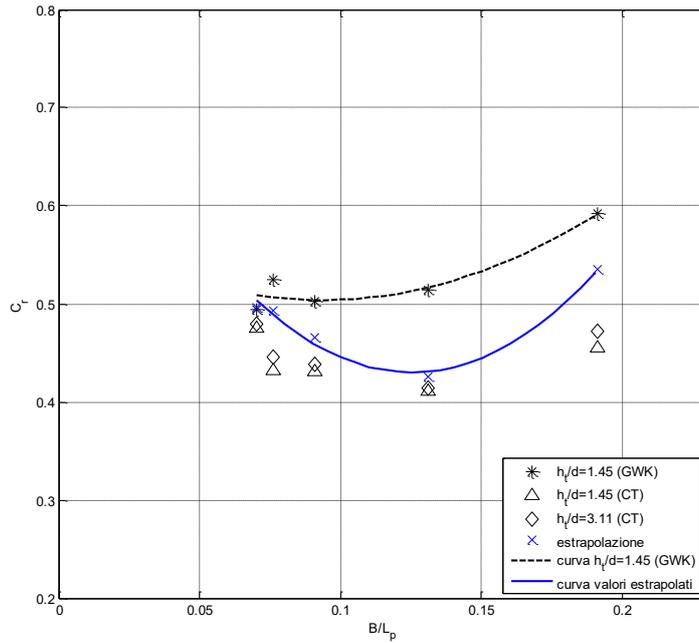


Figura 6.2: Rappresentazione del coefficiente di riflessione C_r rispetto al rapporto di B/L_p : valutazioni dell' altezza relativa della camera h_i/d sui test effettuati a grande scala (GWK), quelli a piccola scala (CT) nelle due configurazioni e le estrapolazione rispetto all'altezza dell'aria della camera invariata.

Analogamente, si osserva in Figura 6.3 che il rapporto tra il coefficiente di riflessione C_r ottenuto nel GWK e quello ottenuto a piccola scala è compreso in un range da 1 a 1,3, con valore medio 1,19 per le prove con $h_i/d=1,45$ e 1,17 per $h_i/d=3,11$. Pertanto, quando il dispositivo funziona vicino alla risonanza i modelli di piccola scala mostrano un coefficiente di riflessione ridotto di circa il 20% rispetto alla configurazione a grande scala. Questo risultato è in accordo con Wilson e Cross (1972) che, con esperimenti a piccola scala 1:20 su diga a scogliera, trova un fattore di rapporto di scala di 1,1-1,21.

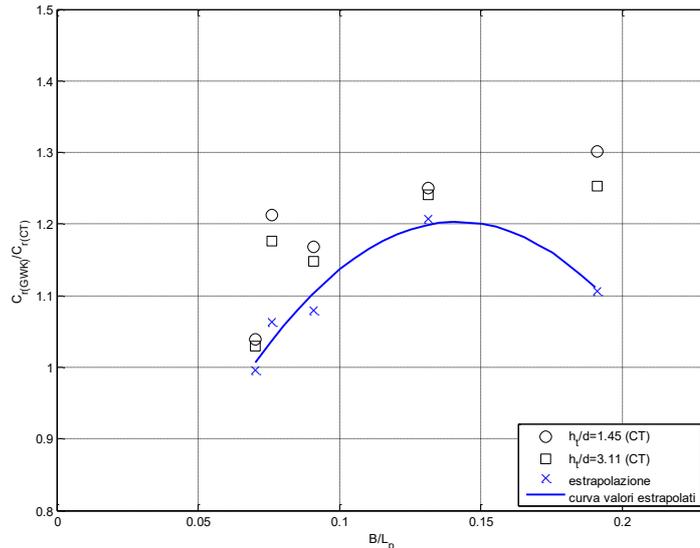


Figura 6.3: Rappresentazione del rapporto del coefficiente di riflessione C_r a grande scala e a piccola scala, rispetto al rapporto di B/L_p .

Per meglio comprendere il differente comportamento tra le prove con $h_t/d=1,45$ e $h_t/d=3,11$, il coefficiente di riflessione è studiato come coefficiente di riflessione spettrale $C_r(f)$ in funzione di B/L , definito per ogni frequenza onda f . In Figura 6.4 è riportato l'andamento medio delle nove condizioni d'onda testate. Nei valori estremi di B/L si ha $C_r(f)$ maggiore dell'unità, tale fenomeno è indice del trasferimento di energia tra le frequenze delle onde. In particolare, per la grande scala a $B/L > 0,3$ si ha $C_r(f) > 1$, quindi l'energia viene spostata a B/L più alti. Tale comportamento, è spiegabile dall'interazione aria-acqua all'interno della camera. Questo effetto è significativamente ridotto nei modelli a piccola scala poiché $C_r(f)$ è sempre inferiore a 1 e le componenti dell'onda riflessa sono sempre inferiori a quelle incidenti.

Il valore minimo di $C_r(f)$ è compreso in un intervallo di $0,1-0,15 B/L$, in accordo con McConnel et al. (1996).

L'andamento di $C_r(f)$ diminuisce rapidamente con incremento di B/L fino al valore minimo di $C_r(f)$ dopo il quale aumenta lentamente. In dettaglio, nella prima

parte l'andamento dei risultati è simile per entrambe le scale, fino al minimo di $C_r(f)$ per $B/L = 0,12$. Dopo il minimo, la tendenza degli esperimenti su larga scala aumenta più velocemente degli esperimenti a piccola scala. Così il $C_r(f)$ per la grande scala devia il suo andamento, rispetto ai dati a piccola scala, al crescere di B/L . Ciò è imputabile alle differenze nell'apparato sperimentale dei due laboratori, nonostante siano state riprodotte sempre onde irregolari con spettro di tipo JONSWAP medio. I risultati del $C_r(f)$ degli esperimenti a piccola scala hanno invece tra loro lo stesso andamento.

È inoltre determinata la funzione estrapolante che per $B/L < 0,15$, cioè per periodo d'onda maggiore al periodo proprio di oscillazione della colonna d'acqua, presenta valori vicini al modello a grande scala. Nonostante l'estrapolazione, i modelli a piccola scala forniscono valori di $C_r(f)$ più piccoli rispetto alle prove su grande scala per componenti d'onda con un periodo più piccolo del periodo di oscillazione proprio.

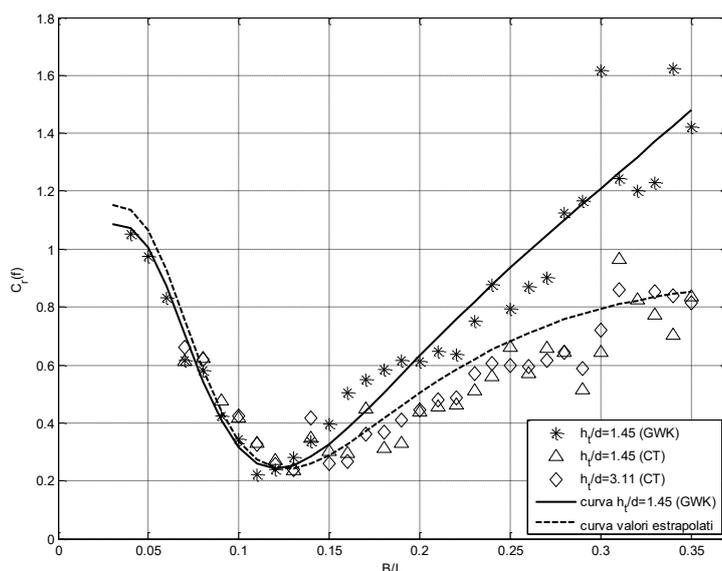


Figura 6.4: Rappresentazione del coefficiente di riflessione spettrale $C_r(f)$ rispetto al rapporto di B/L : confronto tra le prove a grande scala, a piccola scala, estrapolazione di dati dalla piccola scala ed interpolazione dei risultati.

In Figura 6.5 è rappresentato il coefficiente di riflessione spettrale $C_r(f)$ della grande scala rispetto al coefficiente di riflessione spettrale della piccola scala per $h_t/d = 1,45$ (asterisco) e $h_t/d = 3,11$ (quadrato). Si possono individuare tre zone: la prima in cui i valori di $C_r(f)$ sono molto piccoli ed uguali per entrambi i casi di h_t/d ; nella seconda area i valori di $C_r(f)$ hanno un andamento vicino bisettrice per $h_t/d = 1,45$, per cui sono più vicini ai valori del GWK; infine, l'ultima area, i valori sono lontani dalla bisettrice, con andamento instabile, per cui non è possibile definire quale caso di h_t/d dia valori prossimi alla grande scala.

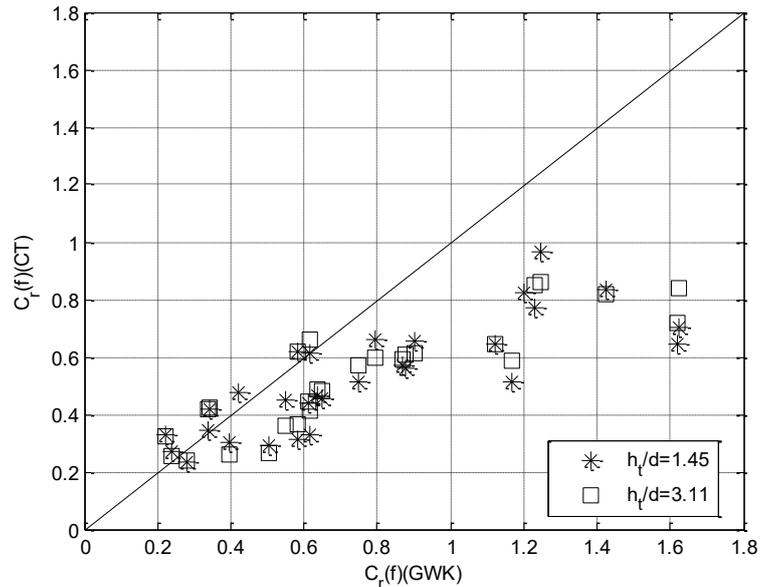


Figura 6.5: Rappresentazione del coefficiente di riflessione spettrale $C_r(f)$ della grande scala rispetto al coefficiente di riflessione spettrale della piccola scala.

In definitiva, nella configurazione con altezza della camera maggiore, i risultati della piccola scala si avvicinano alla grande scala, ma non sufficientemente da fornire risultati sempre affidabili. Tale comportamento è evidente quando le condizioni di funzionamento del sistema si avvicinano alle condizioni di risonanza.

6.4. Azioni sul dispositivo

Negli esperimenti condotti sia a grande che a piccola scala è stata misurata la pressione sulla parete anteriore della camera, in quanto rappresenta la parte strutturalmente più critica dell'OWC. In entrambi i casi, le pressioni sono state registrate con una frequenza di 1000Hz per valutare i picchi di carichi impulsivi. Dalle pressioni registrate puntualmente nella parete frontale è possibile ricavare il profilo di pressione e, successivamente integrando per l'area sottesa, ottenere i carichi agenti sulla parete.

I sensori di pressione posti nella parete frontale erano cinque, negli esperimenti a grande scala, mentre negli esperimenti a piccola scala la pressione è stata misurata solo in due punti a causa delle elevate dimensioni del sensore (lungo 10cm con diametro di 3cm) di pressione e di quelle ridotte del modello. Il diagramma delle pressioni è stato tracciato considerando un ulteriore punto noto: il punto in cui l'onda impatta sulla struttura ed in cui la pressione è quella atmosferica. Tale punto è possibile ottenerlo grazie alle due sonde resistive poste di fronte alla struttura, che restituiscono la sopraelevazione dell'onda, con un'extrapolazione lineare. Tra tutti gli istanti registrati, si sceglie l'altezza dell'onda che causa la massima pressione sulla struttura, ottenuta dall'analisi dei dati 1/250 su 1000 onde considerando la media dei valori tra i quattro massimi. L'ultimo punto, per semplicità, si considera un valore costante di pressione tra la sonda posta più in basso e il bordo inferiore della parete frontale.

La pressione è resa adimensionale dividendo per $\rho g H_{max}$. In cui H_{max} è pari alla somma dell'altezza d'onda incidente e quella riflessa. L'andamento della pressione adimensionale sulla parete frontale dell'OWC è rappresentata in Figura 6.6 in funzione della quota relativa z/d delle sonde poste sulla parete frontale. Il caso rappresentato è quello con ripidità dell'onda intermedia S , pari a 0,24 (Tabella 4.3). Dall'analisi dei dati di pressione è stato necessario scartare le due prove con altezza d'onda incidente maggiore, in quanto i segnali di pressione

sono stati tagliati poiché superavano il fondo scala di misura delle sonde di pressione. Essendo il segnale tagliato nei valori massimi, non è possibile utilizzarlo perché si avrebbe un'analisi sottostimata delle pressioni.

I risultati mostrano che i valori di pressione registrati nel caso della grande scala sono maggiori di quelli registrati nella piccola scala, mentre tra le due configurazioni a piccola scala le differenze sono trascurabili. In particolare, i valori ottenuti per la camera con altezza maggiore sono più grandi nel punto in cui l'onda impatta la parete frontale.

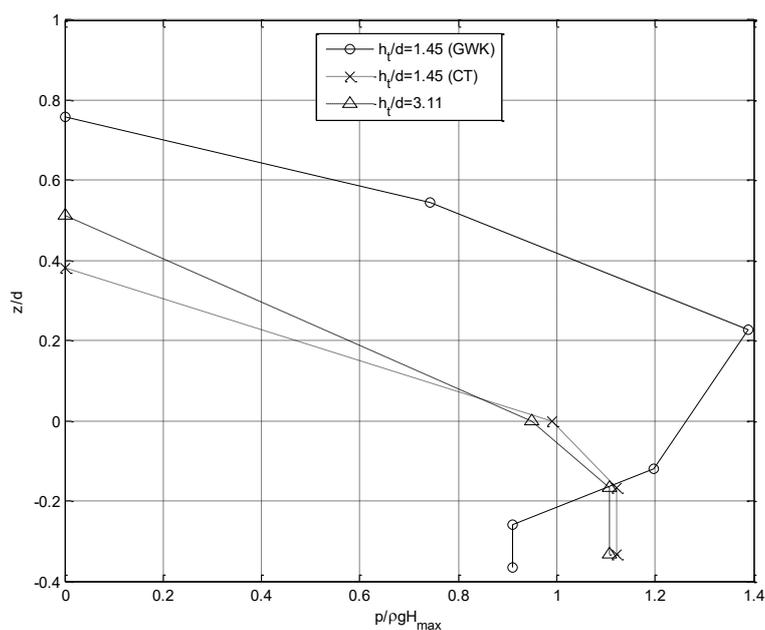


Figura 6.6: Andamento delle pressioni lungo la parete anteriore della camera OWC per la prova con ripidità dell'onda $S=0,24$. Valutazione degli effetti di scala mediante comparazione tra i risultati dei modelli a grande e piccola scala.

Dal diagramma delle pressioni e considerando per ogni sonda una determinata aria di influenza, sono state ricavate le forze agenti sul sistema. Anche la forza, come le pressioni, è stata valutata come la media tra i quattro valori massimi registrati in un treno di 1000 onde, quindi è stata eseguita un'analisi 1/250 dei

valori. La forza è rappresentata in forma adimensionale $\rho g a H_{m0,i}$ tramite l'altezza d'onda incidente e la sommergenza. In Figura 6.7, tale parametro adimensionale ottenuto per entrambe le configurazioni a piccola scala è confrontato con i valori della grande scala. Si osserva che i valori più vicini alla bisettrice si hanno per $h/d = 3,11$ solo in corrispondenza di onde con altezza elevata.

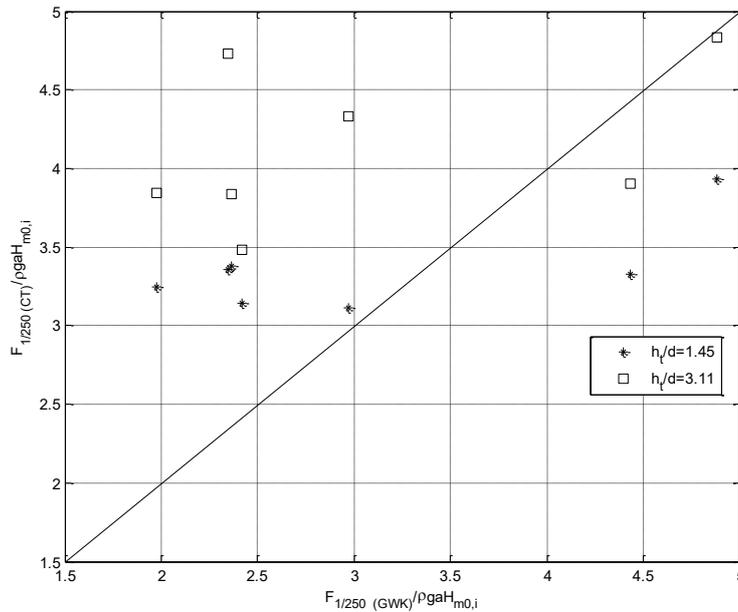


Figura 6.7: Rappresentazione delle forze $F_{1/250}$ adimensionali per la grande e la piccola scala.

In Figura 6.8 è mostrata l'influenza di H_s^* sul rapporto relativo tra le forze a grande e piccola scala $F_{1/250}(GWK)/\rho g a H_{m0,i} / F_{1/250}(CT)/\rho g a H_{m0,i}$. La linea continua orizzontale rappresenta l'esatta corrispondenza tra le forze misurate a grande scala e quelle a piccola scala: i punti al di sotto di tale linea corrispondono ai casi in cui i valori a grande scala adimensionalizzati sono minori di quelli a piccola scala; i punti sopra la linea corrispondono ai casi in cui i dati a grande scala sono maggiori di quelli misurati a piccola scala. Gli effetti di scala sulle forze agenti sulla parete frontale del cassone variano in un range molto ampio compreso tra

0,5 e 1,4. In base alle caratteristiche delle onde, possono essere sottostimate per la grande scala di un fattore pari a 1,4 rispetto alla piccola scala, in altri casi però le forze potrebbero essere sovrastimate.

È possibile osservare che l'altezza d'onda incidente relativa $H_s^* = 0,16$ provoca una inversione di tendenza: per $H_s^* < 0,16$ il rapporto tra le forze sono minori dell'unità e per $H_s^* > 0,16$ il rapporto tra le forze aumenta sopra l'unità. Il valore più prossimo all'unità è proprio per $H_s^* \approx 0,16$, oltre il quale l'influenza del fenomeno del frangimento fa risentire i suoi effetti sulle forze. Dall'influenza di B/L_p mostrata in Figura 6.9, si osserva che i valori con $H_s^* > 0,16$ hanno $B/L_p \approx 0,12$. Tale valore si avvicina a quello degli asintoti di B/L^* ottenuti nel paragrafo 6.2. Di conseguenza, la massima sottostima delle azioni sull'OWC da parte dei modelli a piccola scala si ha quando L_p è prossimo a L^* , ossia quando il dispositivo lavora in condizioni di risonanza.

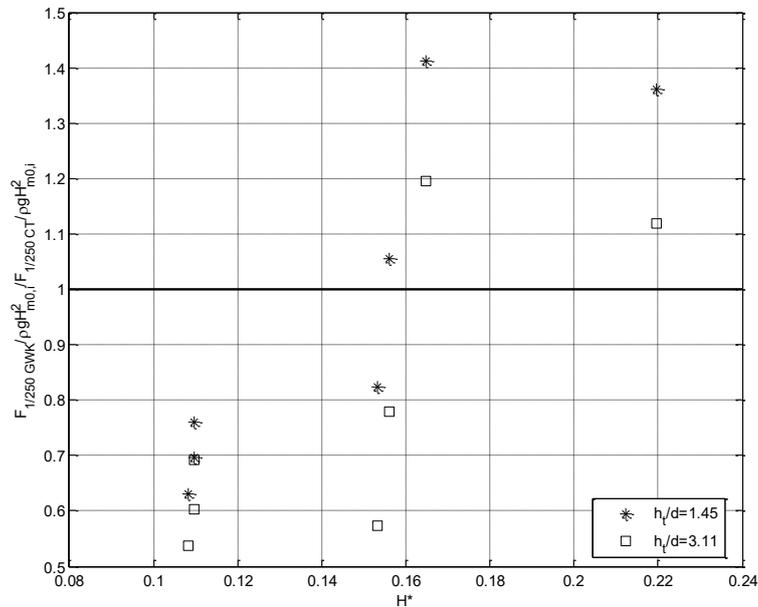


Figura 6.8: Rappresentazione del rapporto relativo tra le forze $F_{1/250(GWK)}/\rho g a H_{m0,i} / F_{1/250(CT)}/\rho g a H_{m0,i}$ in funzione di H_s^* .

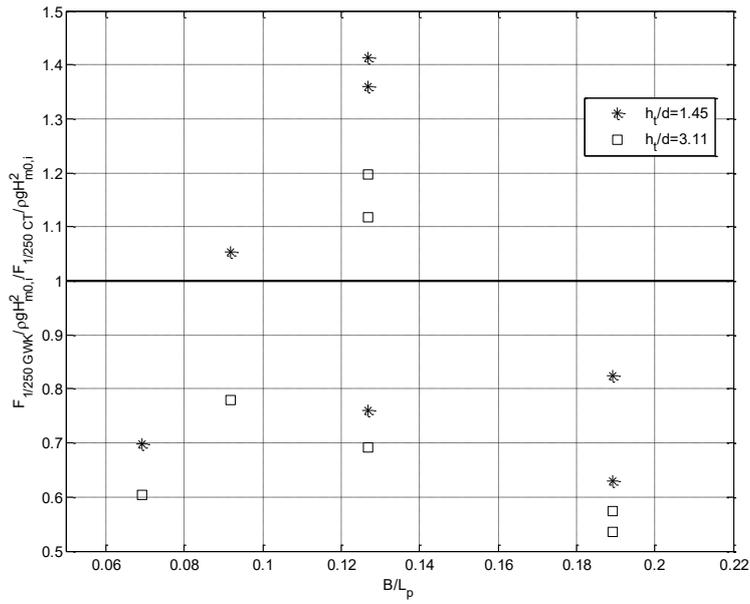


Figura 6.9: Rappresentazione del rapporto relativo tra le forze $F_{1/250(GWK)}/\rho g a H_{m0,i} / F_{1/250(CT)}/\rho g a H_{m0,i}$ in funzione di B/L_p .

7. OTTIMIZZAZIONE DEL SISTEMA

7.1. Generalità

L'ottimizzazione del sistema è stata eseguita mediante la variazione di differenti parametri che influenzano le prestazioni del sistema stesso. Nel dettaglio sono stati quindi fatti variare la larghezza della camera B , l'altezza della camera h , la sommergenza a e il diametro dell'orifizio d_0 . Tali parametri sono stati modificati uno alla volta, ottenendo un totale di 22 configurazioni geometriche differenti.

L'influenza di tali parametri è analizzata tenendo in considerazione il coefficiente di riflessione. Inoltre, la distribuzione della pressione sul dispositivo viene qui esaminata nella configurazione valutata come ottimale.

7.2. Coefficiente di riflessione

L'influenza dei parametri geometrici sul coefficiente di riflessione C_r è sufficiente per definire la configurazione ottimale del sistema OWC. L'efficienza del dispositivo OWC è strettamente legata al coefficiente di riflessione, in quanto essi hanno un comportamento opposto (Tseng et al., 2000). È possibile affermare che il minor C_r indica maggiore efficienza del sistema e quindi maggiore energia che il sistema può convertire.

Il coefficiente di riflessione C_r è stato valutato in funzione della larghezza relativa della camera B/L_p , in cui la lunghezza d'onda di picco L_p è ottenuta iterativamente dal periodo di picco T_p . Tale valutazione del C_r ha fornito le indicazioni sull'ottimizzazione geometrica del sistema. Le grandezze geometriche variate e adimensionali sono riportate in Tabella 7.1. Il modello, precedentemente descritto nel paragrafo 4.4, è stato posto su una rampa con pendenza 1:6 e la profondità dell'acqua al cassone d è pari a 0,09m.

Si precisa che la larghezza minore della camera è, tra quelle testate, quella che più realisticamente può essere applicata in un dispositivo posto all'interno di un frangiflutti a parete verticale, grazie alle sue ridotte dimensioni.

Tabella 7.1: Descrizione dei parametri geometrici del cassone OWC scelti per valutare la configurazione ottimale sui test riprodotti a Catania.

Descrizione	Simbolo	Valori testati	
Larghezza del cassone	B	0,05-0,10-0,14m	0,05
Altezza del cassone	h_t	0,13-0,28m	0,13-0,28m
Sommergenza della parete frontale	a	0,015-0,03-0,05m	0,015-0,03-0,05m
Diametro dell'orifizio	d_0	0,01m	0,006m
Altezza relativa del cassone	h/d	1,44-3,11	1,44-3,11
Sommergenza relativa	a/d	0,17-0,33-0,55	0,17-0,33-0,55
Area relativa dell'orifizio	A_0/A_c	1,96%-0,98%-0,70%	0,71%

Le valutazioni sul coefficiente di riflessione C_r sulla larghezza della camera possono essere dedotte dal confronto tra la Figura 7.1, la Figura 7.2 e la Figura 7.3, in cui si valuta l'influenza della sommergenza della parete frontale per le diverse altezze della camera. Dalle configurazioni emerge che il coefficiente di riflessione C_r cresce al ridursi della larghezza della camera B passando da valori compresi tra 0,4 e 0,6 a valori compresi tra 0,45 e 0,7.

Il coefficiente di riflessione tende a crescere e il comportamento dell'OWC si avvicina a quello della parete verticale quando si riduce la larghezza della camera e la sommergenza è massima. Al diminuire della sommergenza, la camera genera degli effetti dissipativi sull'onda che risente della sua influenza e il coefficiente di riflessione C_r diminuisce. Tuttavia, al diminuire ancora della sommergenza si osserva il massimo C_r , indipendentemente da B . Questo è possibile in quanto la sommergenza è veramente così piccola che l'onda non risente della presenza

della camera e il comportamento dell'OWC tende di nuovo a quello della parete verticale.

Il minimo di C_r è ottenuto, dunque, per la configurazione con sommergenza intermedia testata ed è compreso in un range di 0,1 e 0,15 B/L_p (Figura 7.1 e Figura 7.2), in accordo con McConnel et al. (1996).

Si osserva ancora nella Figura 7.3 che il minor C_r si ha per la sommergenza maggiore e non quella intermedia, ma è plausibile ipotizzare che in questa configurazioni il C_r sia fortemente influenzato dalla ridotta dimensione di B , piuttosto che dalla sommergenza.

Dunque, il minor coefficiente di riflessione C_r è pari a circa 0,3 (Figura 7.2) e si ha per intermedia larghezza della camera e sommergenza testate ($B=0,10\text{m}$ e $a=0,03\text{m}$), mentre il valore maggiore pari circa a 0,7 (Figura 7.3) si ha per minore larghezza della camera e sommergenza testate ($B=0,05\text{m}$ e $a=0,015\text{m}$).

Il coefficiente di riflessione C_r per $h_t = 0,28\text{m}$, a parità delle altre condizioni, è lievemente maggiore rispetto alla condizione con altezza della camera minore, finchè la larghezza della camera $B > 0,05\text{m}$ e h_t diventa ininfluyente.

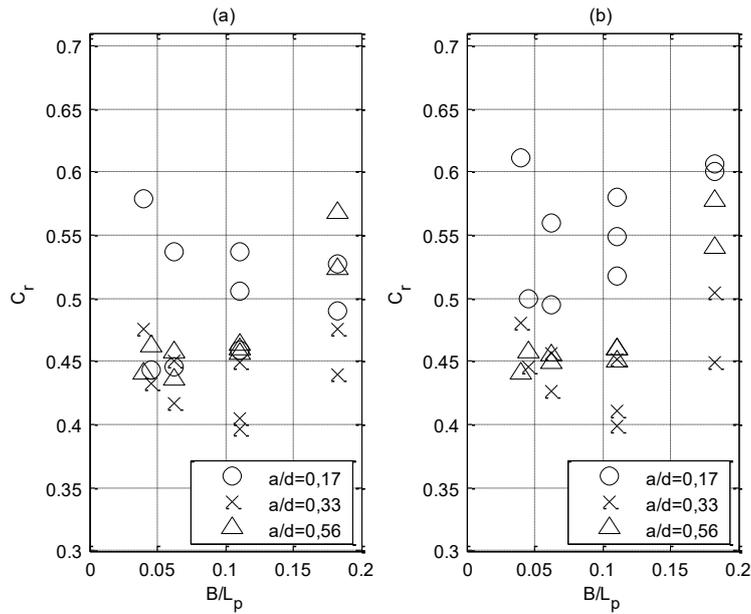


Figura 7.1: Rappresentazione del coefficiente di riflessione C_r rispetto al rapporto di B/L_p . Valutazione della sommergenza a per $A_0/A_c=0,70\%$: (a) $h/d=1,44$; (b) $h/d=3,11$.

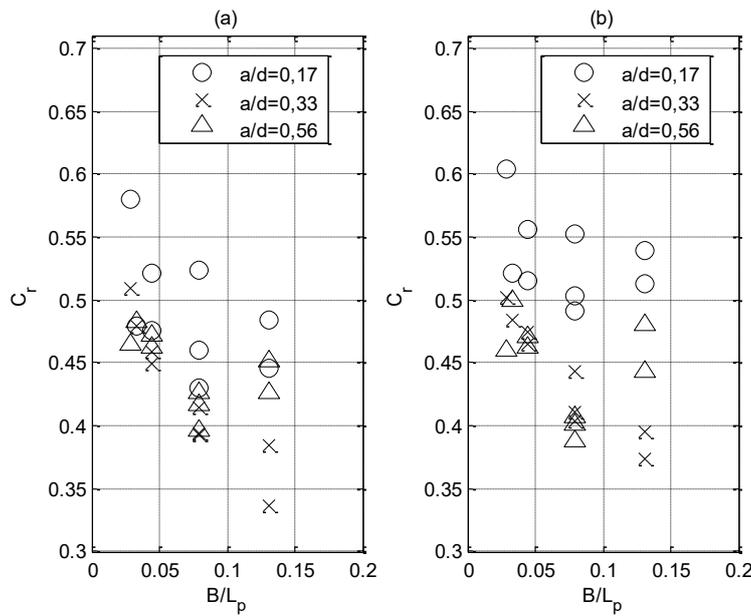


Figura 7.2: Rappresentazione del coefficiente di riflessione C_r rispetto al rapporto di B/L_p . Valutazione della sommergenza a per $A_0/A_c=0,98\%$: (a) $h/d=1,44$; (b) $h/d=3,11$.

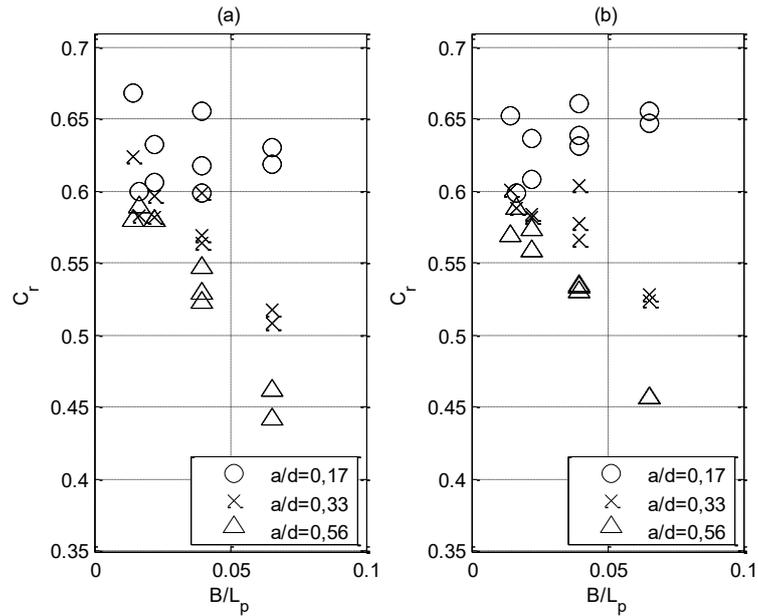


Figura 7.3: Rappresentazione del coefficiente di riflessione C_r rispetto al rapporto di B/L_p . Valutazione della sommergenza a per $A_0/A_c=1,96\%$: (a) $h_0/d=1,44$; (b) $h_0/d=3,11$.

L'ultimo dei parametri indagati, nella condizione di $B = 0,05\text{m}$, è stato l'effetto della variazione del diametro dell'orifizio $d_0 = 0,006-0,01\text{m}$. Al diminuire di B/L_p il coefficiente di riflessione tende a convergere al valore $0,65$. In Figura 7.4 è mostrata la configurazione con sommergenza intermedia tra quelle testate, in quanto le altre due, come visto, tendono a far avvicinare il comportamento del sistema OWC a quello di una diga a parete verticale.

Da quest'analisi emerge che l'andamento del coefficiente di riflessione C_r non è influenzato dalla variazione del diametro dell'orifizio. La camera testata è molto stretta e i due diametri dell'orifizio non sono tali da influenzare il coefficiente di riflessione.

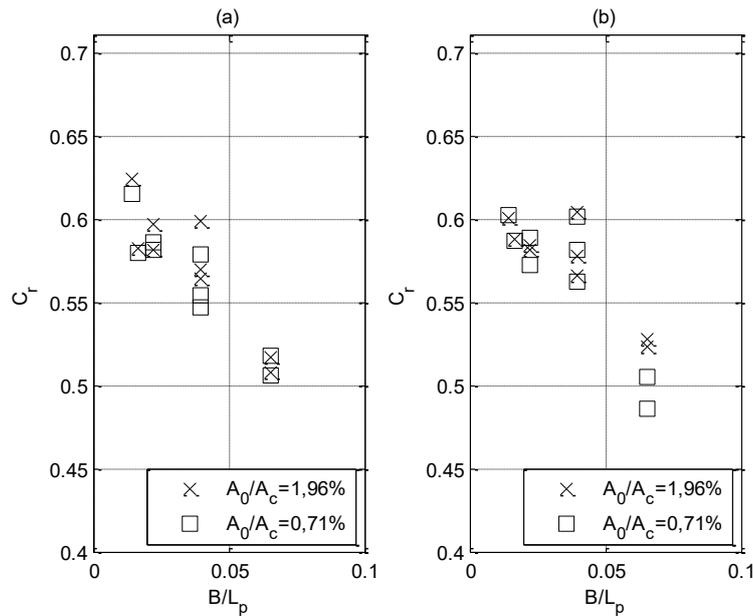


Figura 7.4: Rappresentazione del coefficiente di riflessione C_r rispetto al rapporto di B/L_p . Valutazione del diametro d_0 per fissata sommersenza $a/d=0,33$: (a) $h_i/d=1,44$; (b) $h_i/d=3,11$.

Dalle analisi eseguite sul sistema a piccola scala è emerso che il minor valore di coefficiente di riflessione C_r è compreso tra 0,1 e 0,15 B/L_p . Il minor valore di C_r è ottenuto per larghezza della camera $B = 0,10\text{m}$, a parità delle altre condizioni, probabilmente perché è la condizione che si avvicina di più all'orifizio ottimale. È anche possibile che tale fenomeno sia dovuto alla oscillazione naturale del dispositivo, che è prossima a quella del periodo testato solo per la larghezza intermedia del dispositivo. Tuttavia, se tale dimensione della camera venisse riportata in scala reale, risulterebbe impossibile da realizzare strutturalmente all'interno di una diga portuale e il sistema risulterebbe con ogni probabilità antieconomico. La larghezza della camera da tenere in considerazione per l'applicazione è quindi $B = 0,05\text{m}$.

Inoltre, per quanto riguarda l'altezza della camera h_i , è emerso che una camera più alta restituisce coefficienti di riflessione lievemente maggiori. Quando la

camera testata ha la larghezza più stretta, pur risentendo dell'effetto dell'altezza della camera h_t , l'influenza sul C_r si riduce. Le valutazioni sul d_0 sono strettamente legate alla larghezza della camera.

L'effetto della sommergenza sul C_r è importante: è bene che la sommergenza non sia né troppo piccola, prossima al livello dell'acqua, né troppo grande, prossima al fondo. In entrambi i casi il sistema tenderebbe alla condizione di parete verticale. È possibile affermare che esiste una sommergenza ottimale per ciascuna configurazione in funzione del rapporto di B/L_p .

In definitiva, la configurazione da ritenere energeticamente ottimale per il sistema è quella per cui si ottengono i seguenti valori dei parametri adimensionali: $a/d = 0,33$, $h_t/d = 3,11$ e $A_0/A_c = 0,71\%$.

7.3. Pressioni e forze

L'ottimizzazione del cassone ha come scopo finale la massimizzazione dell'efficienza del dispositivo. È possibile valutare la maggiore efficienza del dispositivo attraverso il minor C_r (Tseng et al., 2000). Quindi è maggiormente utile concentrare l'analisi delle pressioni e delle forze solo alle configurazioni scelte che presentano un coefficiente di riflessione minore.

La configurazione presa in esame presenta $a/d = 0,33$, $h_t/d = 3,11$ e $A_0/A_c = 0,71\%$ ($B = 0,05\text{m}$, $h_t = 0,28\text{m}$, $a = 0,03\text{m}$ e $d_0 = 0,06\text{m}$). Si è scelto di valutare una condizione intermedia di onda dalla Tabella 4.3, cioè la prova con ripidità dell'onda $S = 2\pi H_{m0.i}/gT_p^2 = 0,024$.

Le pressioni sulla parete anteriore del sistema OWC sono rese adimensionali rispetto a $\rho g H_{max}$, in cui l'altezza H_{max} è pari alla somma dell'altezza d'onda incidente e riflessa, e rappresentate in funzione del livello relativo dei trasduttori di pressione z/d .

In Figura 7.5 sono confrontate le pressioni ottenute dalla configurazione ottimale della piccola scala, con quelle relative al il dispositivo testato a grande scala nel

GWK e la corrispondente configurazione ridotta a piccola scala con altezza della camera maggiore. Come già visto nella valutazione degli effetti di scala, le pressioni registrate nel caso della grande scala sono maggiori di quelli registrati nella piccola scala. La corrispondente configurazione ridotta a piccola scala, con altezza della camera maggiore, presenta anche essa valori maggiori di pressione rispetto alla configurazione ottimale. Inoltre, la configurazione a piccola scala ottimale presenta valori più stabili di pressione agente sulla parete anteriore. Non vi sono valori impulsivi di pressione agenti sulla parete frontale, ciò a vantaggio della stabilità strutturale del sistema.

Le analisi sulle pressioni per le altre configurazioni non sono state approfondite in quanto ritenuto già sufficiente il risultato ottenuto dal coefficiente di riflessione per la valutazione della configurazione ottimale.

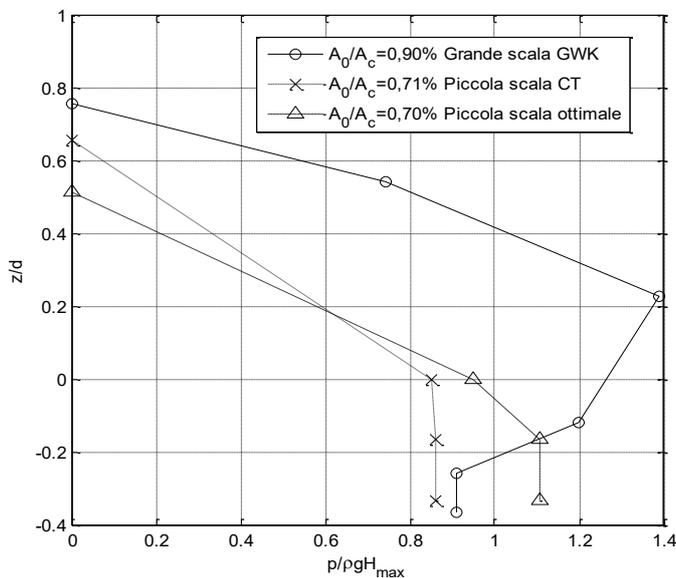


Figura 7.5: Confronto tra la pressione adimensionale, per il test con ripidità dell'onda $S=0,24$, tra OWC a grande scala (cerchio), la configurazione OWC a scala ridotta (croce) e quella a piccola scala con camera più alta (triangolo).

8. IMPLEMENTAZIONE DEL SISTEMA OWC AL CASO STUDIO

8.1. Generalità

Il fine principale del lavoro di ricerca svolto è teso a valutare la fattibilità strutturale ed economica dei sistemi WEC nell'ambito delle infrastrutture portuali del Mediterraneo. È stato scelto come sito pilota il porto di Giardini Naxos, posizionato sulla costa ionica settentrionale della Sicilia. La scelta del WEC è ricaduta sull'OWC. L'applicazione al sito di interesse si è rilevata molto interessante nell'ottica di un potenziale utilizzo su larga scala di tale sistema. L'area in esame è infatti caratterizzata da una bassa quantità di energia d'onda annuale e lo studio di un dispositivo WEC applicabile e conveniente in tale sito dimostrerebbe la sua applicazione in molti altri porti del Mediterraneo.

Il sistema è stato ottimizzato da un punto di vista energetico e verificato da un punto di vista strutturale mediante un modello fisico di piccola scala, i cui risultati sono esposti nel presente capitolo. Sulla base di dati di letteratura sono stati stimati il rendimento e il rumore prodotto dalla turbina ad aria. È stata inoltre progettata una camera di attenuazione per ridurre tale rumore a livelli accettabili. Infine, l'analisi economica consente una valutazione del periodo di recupero dell'investimento.

Da tale applicazione è stato pubblicato un articolo negli atti di convegno Proceedings of 35th Conference on Coastal Engineering, Antalya, Turkey, 2016, con il titolo “Feasibility study of a WEC integrated in the port of Giardini Naxos, Italy” in cui sono esposti una parte dei risultati ottenuti (Naty et al., 2016). Un'altra parte dei risultati ottenuti dagli esperimenti a piccola scala per il porto

di Giardini Naxos sono raccolti nell'articolo "Wave energy exploitation system integrated in the coastal structure of a Mediterranean port" pubblicato sulla rivista *Sustainability* nel dicembre 2016 (Naty et al., 2016).

8.2. Scelta del sito

Il porto di Giardini Naxos, situato nella costa orientale della Sicilia (Figura 8.1 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), è attualmente oggetto di riqualificazione e ampliamento. Nell'ottica, ampiamente esposta nei paragrafi precedenti, di contribuire scientificamente alla ricerca a scala di prototipo nel settore dei sistemi di produzione di energia dal moto ondoso, si è valutata la possibilità di integrare nella struttura portuale di sopraflutto un sistema WEC.

L'installazione di un sistema che converte energia dal moto ondoso in un porto modifica l'ottica di inquadramento classica dei porti, come riparo alle navi da eventi tempestosi, in infrastrutture verdi in grado di produrre energia limitandone così l'impatto energetico e l'emissione di CO₂, rientrando così negli obiettivi comunitari dettati dall'Europa, ed in particolare dalla Conferenza sui cambiamenti climatici di Parigi del 2015.

Nel caso in esame, il porto turistico di Giardini Naxos può diventare un'infrastruttura verde impiegando l'energia prodotta dal sistema WEC per l'illuminazione del porto, limitando così l'impatto energetico e l'emissione di CO₂. In particolare, esiste un progetto di allargamento del porto, in cui la parte terminale del molo di sopraflutto esistente viene inglobata nella parte iniziale della nuova opera, come mostrato in Figura 8.1. In tale figura il rettangolo rosso indica il molo di sopraflutto, dove si vuole inserire il dispositivo WEC oggetto presente studio.

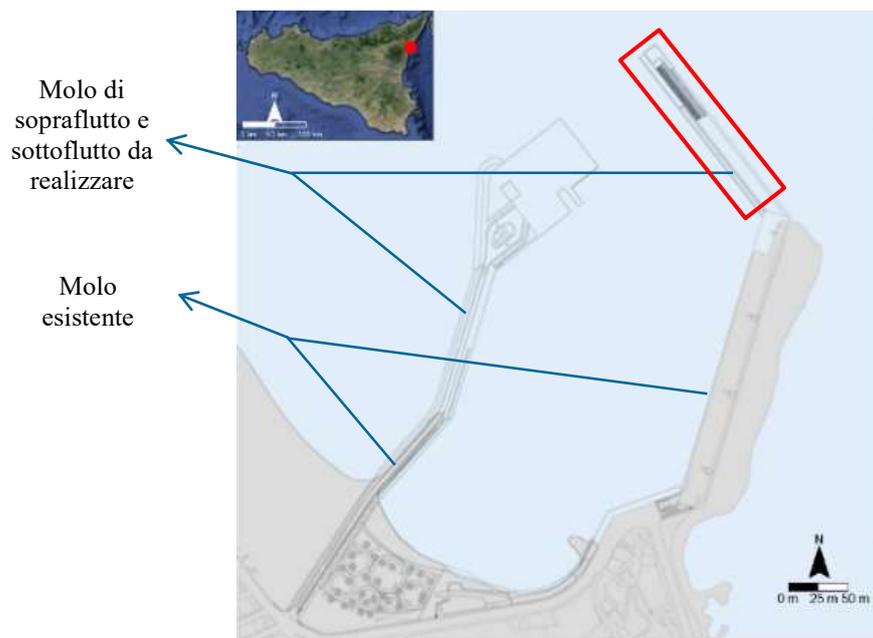


Figura 8.1: Localizzazione del porto di Giardini Naxos (puntino rosso) nella Sicilia. Pianta del porto di Giardini Naxos con il molo esistente e quelli da realizzare: molo di sopraflutto oggetto del presente studio (rettangolo rosso).

Per favorire tale applicazione sono necessari degli studi approfonditi sul sito in esame in modo da utilizzare la maggiore quantità di energia disponibile nella zona e massimizzare il rendimento del sistema.

Il primo passo per il sito di interesse è scegliere opportunamente il sistema da installare. Tale scelta è correlata alla disponibilità del sito di installazione. Il sito di interesse del porto di Giardini Naxos prevede una diga a parete verticale per la protezione del moto ondoso.

Si è ipotizzata l'installazione di tre tipi di WEC, ovvero OWC, U-OWC e OBREC, che sono già stati introdotti nel paragrafo 2.5. L'applicabilità di ciascun sistema è stata valutata sulla base della schematizzazione mostrata in Figura 8.2.

Il sistema OBREC e il sistema U-OWC vengono speditamente scartati in quanto le attività del porto richiedono l'approdo delle navi anche dal lato offshore, in condizioni di calma. L'OBREC richiederebbe la presenza di un pendio per il suo

principio di funzionamento e quindi necessiterebbe di un basamento che si estenderebbe per diversi metri data l'elevata profondità dell'acqua (oltre i 14m). L'U-OWC non può essere utilizzato a causa del condotto ad U sommerso che impedirebbe alle grandi navi di attraccare.

Al contrario, la scelta del classico sistema OWC non richiede molte modifiche alla sezione prevista per il molo di sopraflutto. La forma e la massima altezza del molo rimangono invariati. Le analisi svolte si seguito valutano gli aspetti idrodinamici, strutturali ed economici dell'integrazione del dispositivo scelto nella diga portuale.

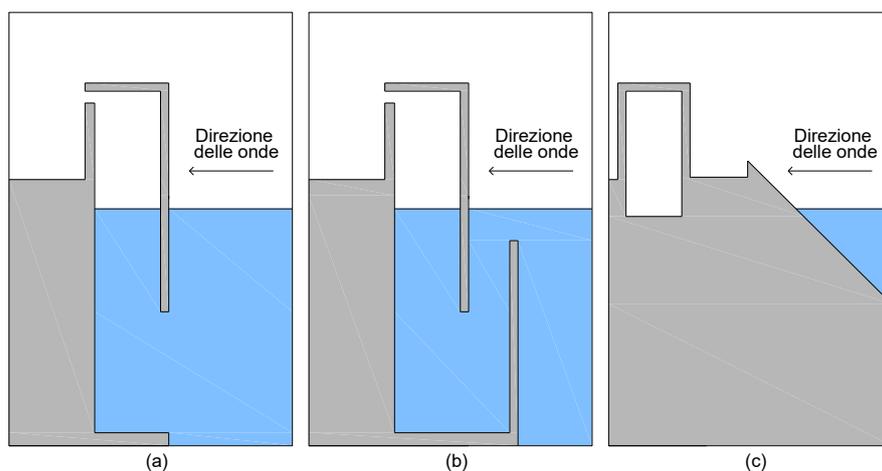


Figura 8.2: Sezioni trasversali schematiche del lato *offshore* della diga frangiflutti del porto di Giardini Naxos, con tre diversi sistemi WEC: (a) OWC; (b) U-OWC; (c) OBREC.

8.3. Energia disponibile

Il lavoro svolto per le valutazioni del caso ha richiesto sul luogo un apposito studio sul moto ondoso. Il fetch geografico ha una lunghezza massima di circa 1600km e quello efficace di circa 360km (Figura 8.3). La propagazione del moto ondoso verso riva, alla batimetria -20 m, è ottenuta mediante un modello spettrale i cui dati a largo sono forniti dall'ECMWF. La Figura 8.4 mostra che la principale direzione di provenienza del moto ondoso è Est-Sud-Est.

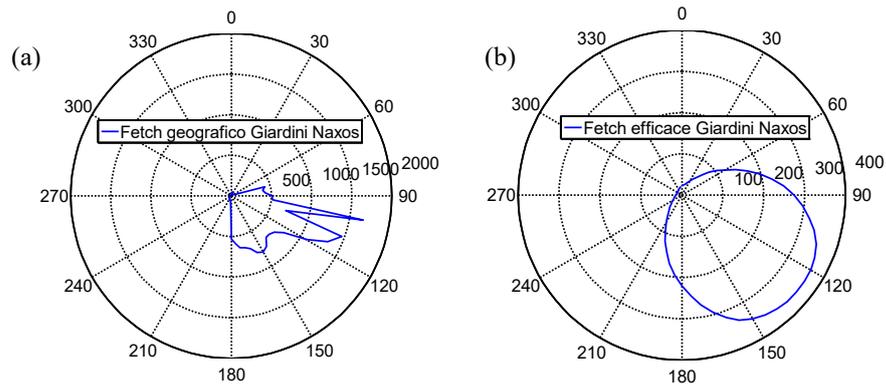


Figura 8.3: Fetch di Giardini Naxos: (a) fetch geografico; (b) fetch efficace.

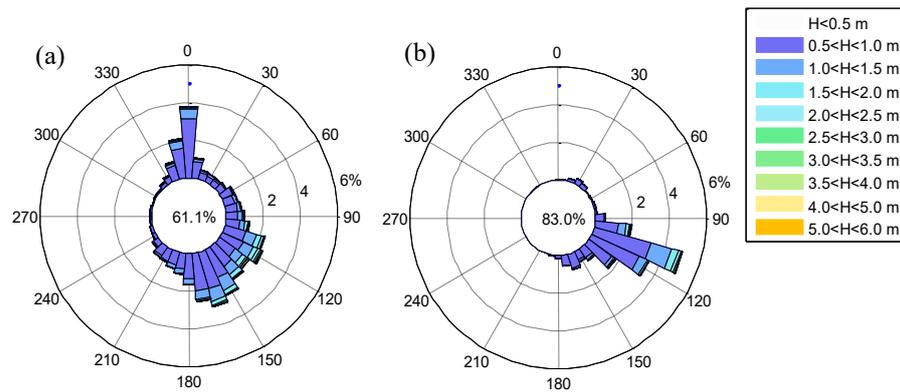


Figura 8.4: Rosa del clima ondoso medio annuo davanti al porto di Giardini Naxos: (a) a largo; (b) sottocosta.

Dallo studio del moto ondoso condotto da Iuppa et al, (2015), è stato possibile valutare il flusso medio di energia a largo pari a 1,75kW/m, corrispondente a circa 15MWh/m annui di energia; il quale si riduce sottocosta fino a 0,76kW/m, pari a 6,6MWh/m annui di energia (Figura 8.5).

Nella Figura 8.6 e nella Figura 8.7 è riportata la schematizzazione dell'energia del moto ondoso del porto di Giardini Naxos rispettivamente a largo e sottocosta in funzione dell'altezza d'onda significativa H_{m0} e del periodo energetico T_e .

Tali valori di energia sono davvero molto piccoli se confrontati con quelli degli oceani; ad una prima analisi apparirebbe dunque svantaggiosa l'applicazione di

un WEC in un questo sito. Allo stesso tempo, da Liberti et al. (2013) si ottengono valori di COV minori di 0,25, indice di condizioni più stabili dell'energia e favorevoli alla sua conversione.

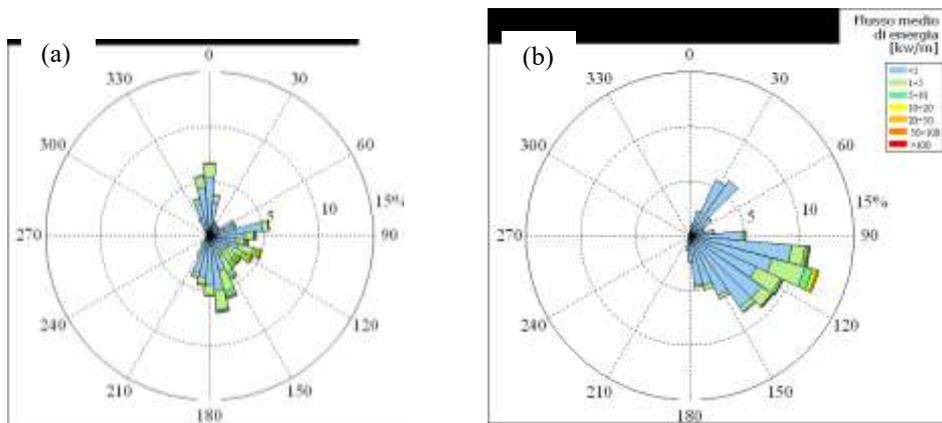


Figura 8.5: Rosa del flusso di energia del moto ondoso davanti al porto di Giardini Naxos: (a) a largo; (b) e sottocosta.

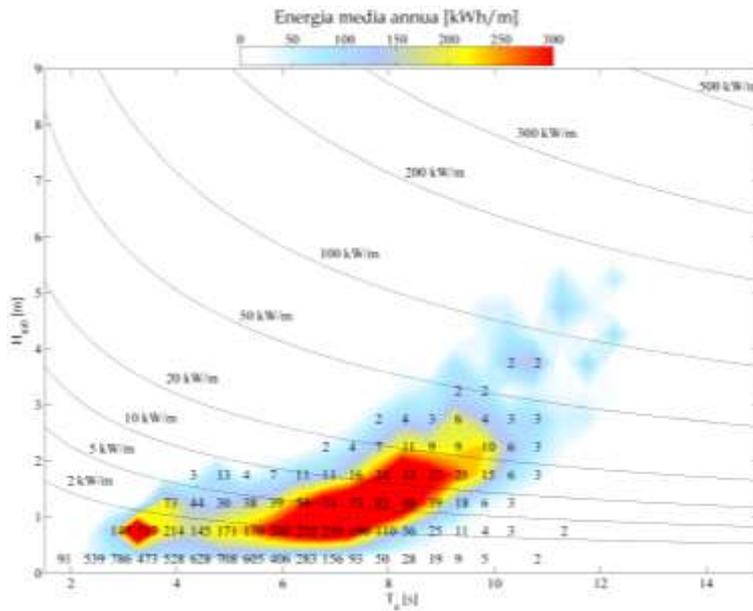


Figura 8.6: Energia del moto ondoso al largo del porto di Giardini Naxos in funzione dell'altezza d'onda significativa H_{m0} e del periodo energetico T_e .

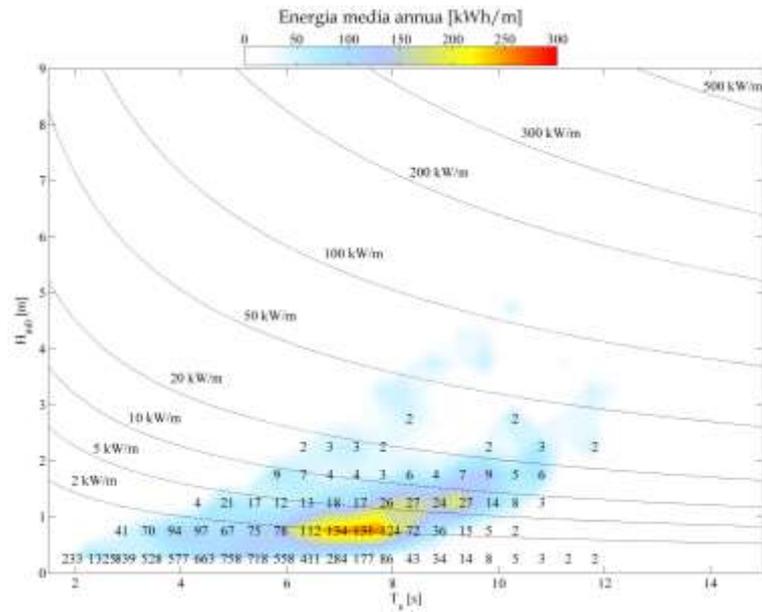


Figura 8.7: Energia del moto ondoso sottocosta, davanti al porto di Naxos in funzione dell'altezza d'onda significativa H_{m0} e del periodo energetico T_e .

8.4. Modellazione fisica

La modellazione fisica dell'OWC che si vuole installare nel porto di Giardini Naxos è stata eseguita nel laboratorio di Idraulica dell'Università di Catania, successivamente ai modelli a piccola scala per valutare gli effetti di scala e l'ottimizzazione del sistema, come ultima delle tre fasi di laboratorio svolte.

Il modello è stato riprodotto a scala 1:75 e il dispositivo OWC, corrispondente a quello precedentemente descritto nel Capitolo 4, è stato poggiato sul fondo del canale di laboratorio a circa 16m dal battitore. La profondità del piede dell'OWC rispetto al livello di quiete è $h = 0,19m$. Fissati la larghezza della camera B pari a 0,05m e l'altezza della camera h_t pari a 0,28m, sono stati variati opportunamente i parametri da investigare, come la sommergezza $a = 0,05-0,085-0,12-0,155m$ della parete anteriore, rispetto al livello di quiete. Un altro parametro da investigare è il diametro dell'orifizio $d_0 = 0,006-0,01m$, con area relativa

$A_0/A_c = 0,71\%-1,96\%$ in cui $A_0 = d_0^2 \cdot \pi/4$ è l'area dell'orifizio e $A_c = B \cdot B_t$ è l'area della sezione orizzontale della camera interna. In questo caso le configurazioni di interesse sono otto e i parametri fissi e variabili sono riportati in Tabella 8.1.

Tabella 8.1: Descrizione dei parametri geometrici del cassone OWC scelti per riprodurre il sistema da installare nel porto di Giardini Naxos.

Parametri geometrici	Simbolo	Valori testati
Larghezza del cassone	B	0,05m
Profondità trasversale del cassone	B_t	0,08m
Altezza del cassone	h_t	0,28m
Profondità dell'acqua, misura del fondo del canale	h	0,19m
Altezza dell'aria	$h_a = h_t - h$	0,09m
Sommergenza della parete frontale	a	0,05-0,085-0,12-0,155m
Sommergenza relativa	a/h	0,26-0,45-0,63-0,82
Altezza dell'apertura della parete frontale	h_i	0,035-0,07-0,105-0,14m
Diametro dell'orifizio	d_0	0,006-0,01m
Area relativa	A_0/A_c	0,71%-1,96%

Gli esperimenti sono stati monitorati, come gli altri esperimenti condotti a piccola scala, con sei sonde resistive e tre sonde di pressione. Le distanze tra le tre sonde resistive (WG01-WG02-WG03) sono rimaste invariate: $x_{12} = 0,185\text{m}$ e $x_{13} = 0,345\text{m}$. Le altre tre sonde sono state poste davanti la parete anteriore del modello (WG04-WG05) e all'interno di uno dei cassoni centrali (WG06). Le sonde di pressione (P01-P02) sono state poste lateralmente e sono state fatte variare insieme alla sommergenza della parete frontale. La terza sonda di pressione P03 è stata posta nel cassone centrale al tetto (Figura 8.8 e Figura 8.9). I dati sono stati acquisiti a 1000Hz.

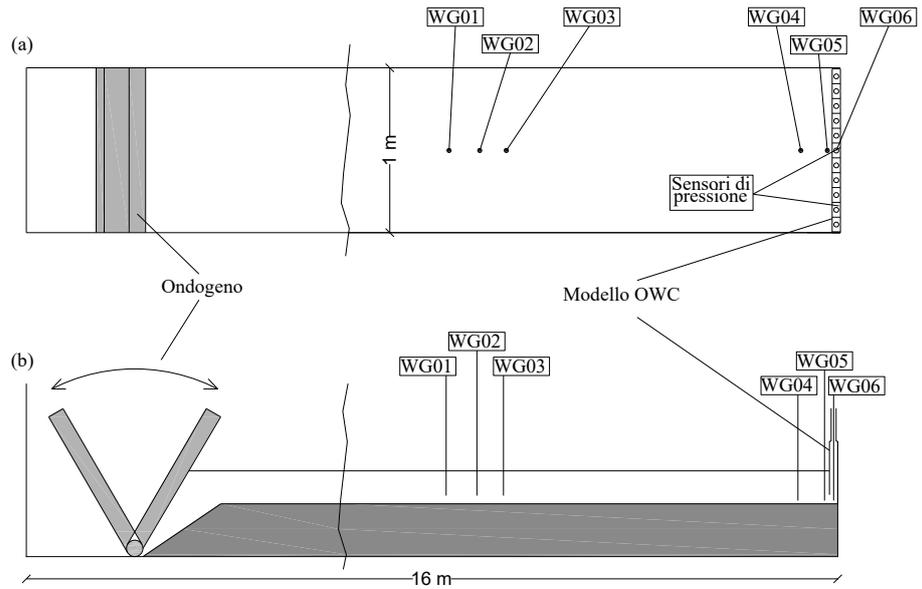


Figura 8.8: Schematizzazione del canale in cui sono state eseguite le prove, con il modello OWC testato per il porto di Giardini Naxos. Indicazione delle sonde resistive (WG01-06) e dei sensori di pressione: (a) vista dall'alto; (b) sezione longitudinale.

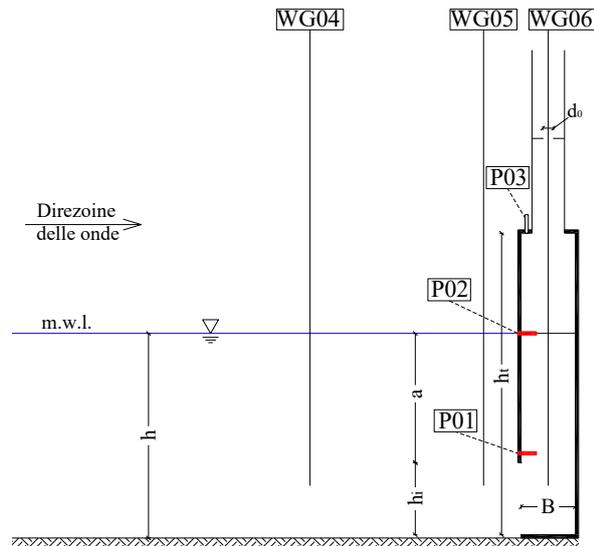


Figura 8.9: Dettaglio della sezione del modello OWC testato per il porto di Giardini Naxos con indicazione dei parametri geometrici e delle sonde resistive (WG04-06) e i sensori di pressione (P01-P03).

Le condizioni del moto ondoso testate in laboratorio sono prossime alle condizioni del sito di interesse in scala 1:75. In particolare, sono state scelte onde irregolari che rispettano le condizioni d'onda testate nei precedenti modelli a piccola scala. Le caratteristiche delle onde, riprodotte con spettro JONSWAP medio, sono riportate in Tabella 8.2.

Tabella 8.2: Descrizione delle condizioni di moto ondoso incidente testate sul modello OWC di Giardini Naxos.

Numero test	$H_{m0,i}$ [m]	T_p [s]	H_s^*	B/L_p	S
1	0,02	0,9	0,105	0,131	0,016
2	0,03	1,2	0,158	0,091	0,013
3	0,02	1,5	0,105	0,070	0,006
4	0,02	0,7	0,105	0,191	0,026
5	0,03	0,7	0,158	0,191	0,039
6	0,03	0,9	0,158	0,131	0,024
7	0,04	0,9	0,211	0,131	0,032
8	0,05	1,2	0,263	0,091	0,022
9	0,06	1,4	0,316	0,076	0,020

8.5. Analisi dei parametri caratteristici

Le analisi dei dati ottenuti dalle prove su modello fisico sono espone di seguito. Per valutare gli effetti principali dell'interazione tra l'onda e il sistema OWC, sono stati condotti esperimenti variando la configurazione geometrica del sistema e generando condizioni d'onda rappresentative del sito di Giardini Naxos. In particolare, è stata studiata la variabilità, in termini relativi, della sommergenza della parete frontale a/h e dell'apertura dell'orifizio A_0/A_c . Per tutte le configurazioni prese in esame, sono stati valutati il periodo proprio di oscillazione, il coefficiente di riflessione e i carichi agenti sulla struttura. È stato così possibile definire una configurazione ottimale del sistema per la progettazione nel sito in esame.

8.5.1. Periodo proprio di oscillazione

Il periodo proprio di oscillazione della colonna d'acqua è stato stimato mediante l'approccio olistico di Boccotti (2007) descritto nel paragrafo 3.3 ed è importante per trovare la configurazione geometrica ottimale del sistema.

Per stimare il ritardo temporale T^* tra il flusso all'interno della camera q e la pressione esercitata dall'onda Δp sulla parte più bassa della parete anteriore, all'imboccatura della camera, è stata applicata la correlazione riportata in precedenza nella eq. (3.1).

Far funzionare il sistema nella condizione ideale per massimizzare la conversione dell'energia dell'onda, vuol dire essere nelle condizioni di risonanza: il coefficiente di risonanza R espresso dalla eq. (3.2) è in questo caso vicino all'unità.

Per le prove di laboratorio effettuate, i valori ricavati di T^* sono mostrati in Figura 8.10 in funzione del numero di Froude definito dall'eq. (6.1).

Per le configurazioni con sommergenza relativa a/h pari a 0,45 e 0,82, il valore medio di T^* è rispettivamente di circa 0,15 s e 0,22 s. Di conseguenza, l'aumento della sommergenza provoca valori più alti di T^* . Tali prove con sommergenza relativa a/h pari a 0,45 e 0,82 sono state scelte in quanto danno rispettivamente il minor e il maggior coefficiente di riflessione.

Tali risultati, ottenuti per il periodo proprio di oscillazione della colonna d'acqua all'interno della camera, forniscono utili informazioni per la progettazione del OWC nel porto di Giardini Naxos.

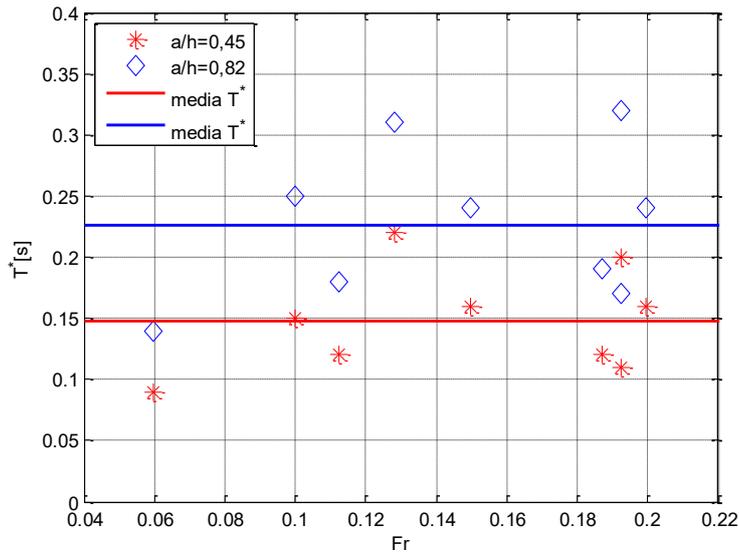


Figura 8.10: Ritardo temporale T^* in funzione del numero di Froude Fr .

8.5.2. Coefficiente di riflessione

Il coefficiente di riflessione è stimato mediante il metodo delle tre sonde di Mansard e Funke (1980). Per tale applicazione sono state utilizzate le tre sonde poste tra il generatore delle onde (battitore) e il modello (WG01, WG02 e WG03), come desumibile dallo schema di Figura 8.8.

La valutazione del coefficiente di riflessione sul cassone progettato per il porto di Giardini Naxos è stata effettuata rispetto alla sommergenza relativa a/h della parete frontale per due condizioni $A_0/A_c = 0,71\%-1,96\%$. La Figura 8.11 mostra l'andamento di C_r in funzione di B/L_p , larghezza della camera interna e la lunghezza d'onda di picco. Si osserva che il range analizzato di B/L_p è più piccolo rispetto ai casi analizzati precedentemente per la grande scala, proprio per le ridotte dimensioni della camera più simile ai casi reali.

Il C_r è compreso nell'intervallo 0,55 – 0,9 e tende a convergere verso il valore 0,7 quando B/L_p diminuisce, indipendentemente dalla geometria di OWC. La variabilità del diametro dell'orifizio non influenza notevolmente il coefficiente di

riflessione, poiché i diametri dell'orifizio testati sono vicini al valore ottimale e meno influenti della larghezza della camera.

Al crescere del rapporto di B/L_p , il C_r tende verso 0,9 per sommergenza crescente e diametro dell'orifizio più piccolo. In tale condizione l'OWC si avvicina alla condizione di parete verticale e la conversione dell'energia ondosa è molto bassa. L'influenza della sommergenza della parete frontale gioca un ruolo chiave sul coefficiente di riflessione quando $B/L_p > 0,02$. In particolare, il minimo di C_r si ha nella configurazione con $a/h = 0,45$, indipendentemente dal diametro dell'orifizio. Pertanto, questo valore di sommergenza relativa rappresenta la condizione ottimale per il dispositivo testato e può essere utilizzato per progettare l'OWC da installare nel sito oggetto di studio.

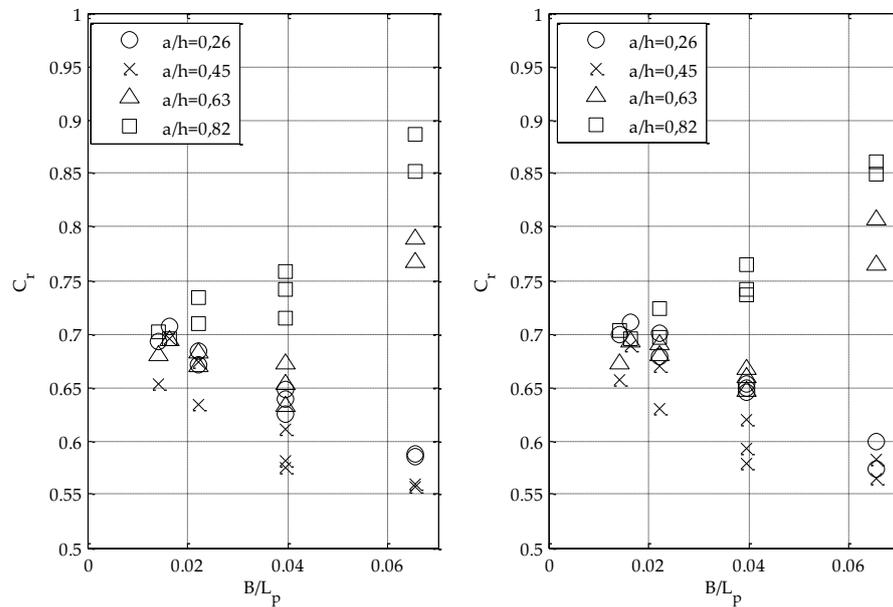


Figura 8.11: Coefficiente di riflessione C_r in funzione della larghezza relativa della camera pneumatica dell'OWC B/L_p , influenza della sommergenza relativa della parete frontale a/h : (a) apertura relativa dell'orifizio $A_0/A_c = 0,71\%$, corrispondente a $d_0 = 0,006\text{m}$; (b) apertura relativa dell'orifizio $A_0/A_c = 1,96\%$, vale a dire $d_0 = 0,01\text{m}$.

Nella Figura 8.12 sono mostrati gli andamenti del coefficiente di riflessione rispettivamente per sommergenza relativa pari a 0,45 e 0,82, che danno rispettivamente i valori massimi e quelli minimi del coefficiente di riflessione. Per sommergenza maggiore, il C_r ha un andamento crescente con il crescere di B/L_p , mentre per sommergenza minore tende a diminuire.

Il confronto tra i coefficienti di riflessione così ottenuti e quelli ottenuti dalla grande scala fa emergere che, per analoghi B/L_p , il coefficiente di riflessione è più grande di circa il 10% rispetto agli esperimenti a grande scala. Tale differenza è stata considerata accettabile per le prove effettuate in piccola scala per il sito di Giardini Naxos.

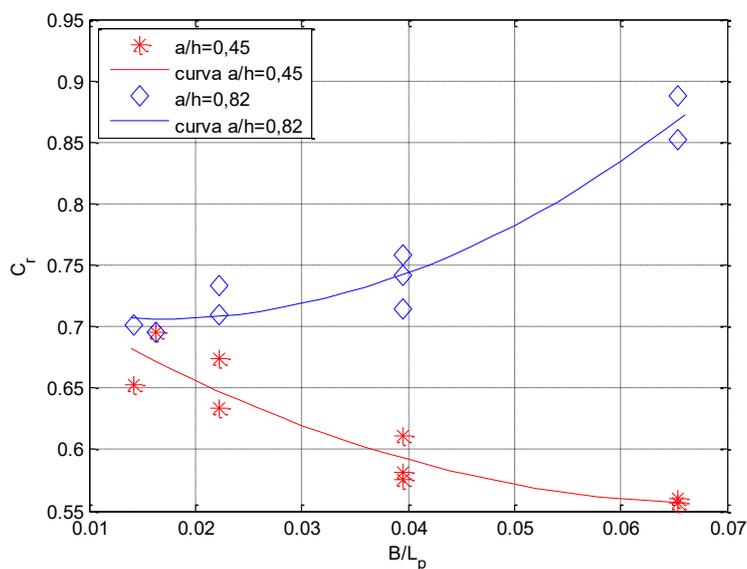


Figura 8.12: Coefficiente di riflessione C_r in funzione della larghezza relativa della camera pneumatica dell'OWC B/L_p , per il caso di area relativa dell'orifizio $A_0/A_c=0,71\%$.

8.5.3. Pressioni e forze

La parte strutturalmente più debole, rappresentata dalla parete anteriore del sistema OWC secondo Torre Enciso et al. (2010), è stata monitorata con delle sonde di pressione in grado di cogliere le azioni impattanti dell'onda. I carichi

misurati sono confrontati con la formulazione di Sainflou (1928) per dighe a parete verticale, con lo scopo di valutare l'affidabilità di una formulazione applicata al caso studio.

Le pressioni sulla parete anteriore sono registrate dai sensori P01 e P02 (Figura 8.9) situati rispettivamente al livello medio dell'acqua e al bordo inferiore della parete anteriore del sistema OWC.

I segnali sono stati registrati a 1000Hz, per consentire una misura affidabile dell'impulsività dell'onda. L'analisi del segnale è stata condotta tagliando la parte iniziale di transizione e filtrando i valori negativi di pressione, al fine di escludere il rumore del segnale dovuto all'ingresso nella sonda della contemporanea presenza di acqua e aria.

Le forze istantanee per unità di lunghezza sono ottenute dai segnali filtrati della pressione integrati lungo la parete anteriore, fino all'elevazione della superficie libera. L'elevazione di superficie alla parete anteriore è stimata da un'estrapolazione dei segnali misurati alle sonde WG04 e WG05.

Da ogni prova di 1000 onde, vengono estratti i quattro picchi massimi delle forze e come valore massimo della forza agente sulla parete anteriore F_{max} viene considerata la media dei quattro picchi. In questo modo si ottiene una forza $F_{1/250}$ che è un valore statisticamente più affidabile rispetto al massimo assoluto di una prova di 1000 onde (Cuomo et al. 2010; Goda 2010, Contestabile et al., 2017). Tale analisi è stata eseguita sia per le pressioni che per le forze sulla parete anteriore.

In Figura 8.13 è mostrato l'andamento delle pressioni, ottenuto come descritto, al variare della sommergezza e del diametro dell'orifizio per fissate condizioni d'onda. Si è scelta una condizione ondosa con ripidità intermedia tra quelle testate in laboratorio, che presentasse anche valori intermedi di altezza significativa e periodo di picco, cioè la prova n. 8 con $S = 0,022$ di Tabella 8.2. La pressione è

resa adimensionale dividendo per $\rho g H_{m0,i}$ e le quote z sono adimensionalizzate con la profondità dell'acqua h .

Nella stessa Figura 8.13 sono riportati anche i risultati ottenuti dalla formulazione Sainflou. Tale formulazione viene applicata a partire dal bordo inferiore della parete anteriore di ogni configurazione geometrica testata di OWC, in quanto valida per le pareti verticali. La formula di Sainflou si è dimostrata abbastanza affidabile poiché le condizioni d'onda testate sono lontane dalle condizioni di frangimento e impulsività. Tuttavia, essa sottostima, rispetto alle misurazioni, l'elevazione di superficie che arriva alla struttura, mentre sovrastima la pressione nella parte terminale della parete frontale. Le pressioni crescono con l'aumentare della sommergenza e per sommergenza relativa a/h minore, pari a 0,26, le pressioni misurate sono maggiori di quelle stimate. Al contrario, al crescere della sommergenza relativa le pressioni misurate sono complessivamente minori di quelle stimate.

L'aumento della dimensione dell'orifizio provoca una leggera riduzione della pressione misurata, ad eccezione del caso con la massima sommergenza, mostrata in Figura 8.13 (d), per la quale l'influenza dell'orifizio non dà un chiaro effetto sui carichi.

Le considerazioni appena descritte sono valide anche per i casi con ripidità dell'onda minima e massima, come trattato in dettaglio in Naty et al. (2016).

Le forze agenti sulla struttura sono state ottenute integrando le pressioni lungo la parete frontale e sono rappresentate in Figura 8.14 come rapporto tra le forze misurate e quelle stimate rispetto all'altezza d'onda incidente relativa $H_s^* = H_s/h_0$, al fine di indagare l'effetto dell'altezza dell'onda. Rapporti di forze maggiori di 1 implicano che le forze misurate sono maggiori di quelle stimate, per cui la formulazione applicata sottostima le misurazioni.

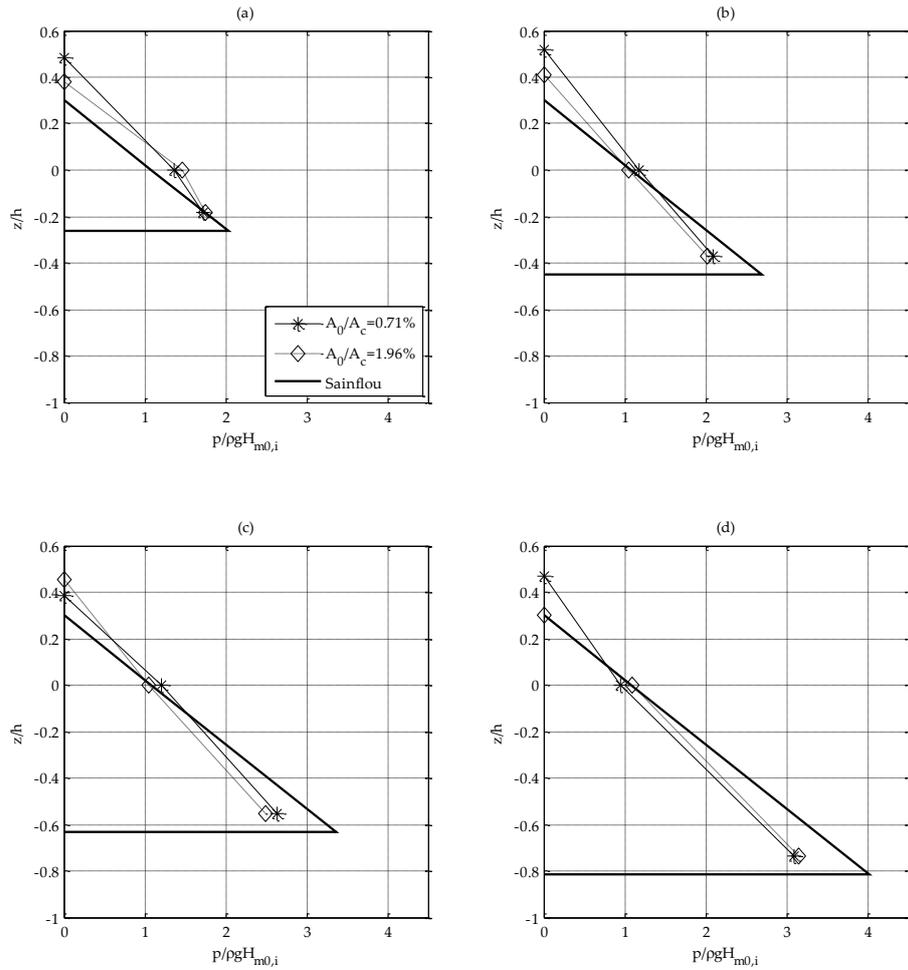


Figura 8.13: Profili di pressione adimensionali, misurati e stimati dalla formulazione di Sainflou per parete verticale: (a) sommersenza relativa $a/h = 0,26$; (b) $a/h = 0,45$; (c) $a/h = 0,63$; (d) $a/h = 0,82$. L'effetto della variazione della dimensione relativa dell'orifizio A_0/A_c è riportata nei grafici.

L'influenza della sommersenza relativa della parete frontale a/h è chiara: la minima sommersenza testata ($a/h = 0,26$) provoca la maggiore sottostima delle forze misurate di circa 40% (Figura 8.14.) La formulazione di Sainflou diventa più affidabile al crescere della sommersenza e per $H_s^* > 0,25$ e $a/h > 0,6$ fornisce valori sovrastimati. Per $a/h = 0,45$ la stima fornisce rapporti tra le forze vicini a 1,1, che può essere moltiplicato per i valori delle forze previste per ottenere valori

più realistici di forze che agiscono sull'OWC. Quest'ultima configurazione corrisponde alla configurazione ottimizzata, trovata anche per il coefficiente di riflessione.

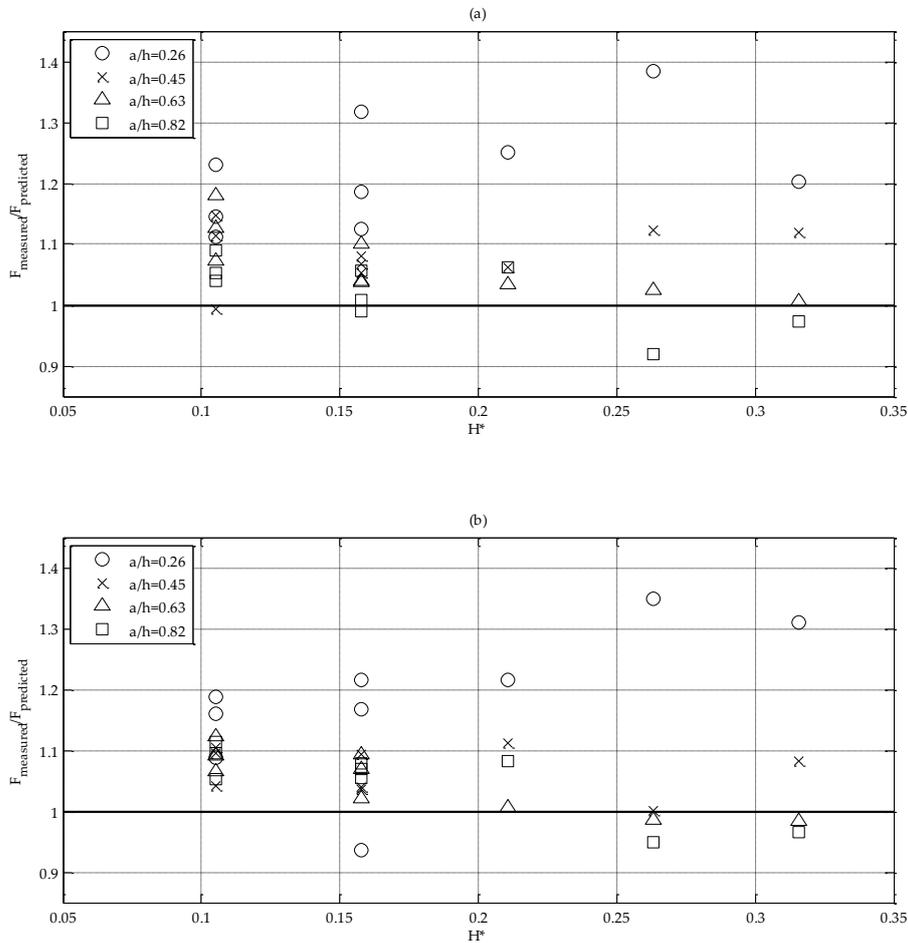


Figura 8.14: Valutazione della forza misurata e stimata con Sainflou, in funzione della relativa altezza d'onda H_s^* . Valutazione dell'effetto della sommergenza relativa della parete frontale a/h : (a) prove con sezione relativa dell'orifizio sezione relativa $A_0/A_c = 0,71\%$; (b) $A_0/A_c = 1.96\%$.

8.6. Dimensionamento del dispositivo

I risultati della modellazione fisica del dispositivo in esame, ai fini del suo dimensionamento, sono stati integrati con formulazioni e dati presenti in

letteratura. Nel dettaglio, si è proceduto alla stima del rumore prodotto dal dispositivo e del suo rendimento.

Infine, sulla configurazione ottimale ottenuta dall'analisi dei parametri caratteristici del sistema è stata valutata la stabilità strutturale dell'opera.

8.6.1. Rumore

Il grande inconveniente dei sistemi OWC è rappresentato dal rumore notevole emesso dalla turbina, dovuto alla compressione e decompressione dell'aria.

Il rumore è stato valutato mediante un confronto di letteratura con il sistema OWC chiamato LIMPET (Starzman e Carolus, 2014), in cui è presente una turbina Wells. Su tale sistema, applicando la relazione (3.10) su alcuni stati di mare per la valutazione del livello di potenza sonora specifica $L_{w,spec}$, si è ottenuto che il rumore causato dalla turbina aumenta con l'altezza d'onda e ricade nell'intervallo 120-140 dB.

Per il sito di Giardini Naxos, ipotizzando di installare una turbina Wells analoga a quella del LIMPET, è stato considerato un evento caratteristico per lo studio di fattibilità presentato: lo stato di mare che viene superato cinque giorni all'anno nel sito di Giardini Naxos con altezza d'onda pari a 1,5m. Sulla base di quanto ottenuto da Starzman e Carolus (2014) per la stessa condizione di moto ondoso, corrispondente a uno stato di mare di 5 giorni in un anno, il livello di potenza sonora annuale caratteristica è di 120dB. Tale valore è molto elevato se confrontato con la soglia di tolleranza del dolore pari a 125dB (Gin, 1978).

Pertanto, il dimensionamento del sistema OWC deve essere ottimizzato anche considerando un aspetto così critico, al fine di ridurre il livello sonoro del rumore entro un intervallo compatibile con le attività attuali e future del porto.

Emerge la necessità, per il caso studio, di adottare una soluzione che possa ridurre il livello sonoro. Si è scelto di adoperare dei pannelli fonoassorbenti da inserire in una camera di attenuazione in grado di ridurre fino al 40% il rumore prodotto

dalla turbina (Cox e D’Antonio, 2004) riducendo il suo valore fino a 70dB, che corrisponde ad una discussione ad alto volume. Tale rumore dovrebbe essere raggiunto in media 5 giorni in un anno, durante le condizioni di tempesta. Questo valore è da considerare accettabile se si tiene in conto che il moto ondoso causa già di per se un elevato grado di rumore.

8.6.2. Rendimento

Il sito dello studio è stato scelto per valutare la fattibilità del sistema OWC in una zona a bassa energia del Mar Mediterraneo attraverso una matrice di potenza. Tale matrice di potenza è ottenuta sulla base del coefficiente di riflessione e delle prestazioni del PTO dedotte in Curran et al. (1998).

In Figura 8.15 è rappresentata la matrice di potenza del WEC in funzione del periodo energetico T_e e dell'altezza d'onda significativa $H_{m0,i}$. Si evince dalla figura che l’energia del sito è concentrata in un intervallo ristretto di $H_{m0,i}$ pari a circa a 1m e T_e compreso tra 7s e 8s.

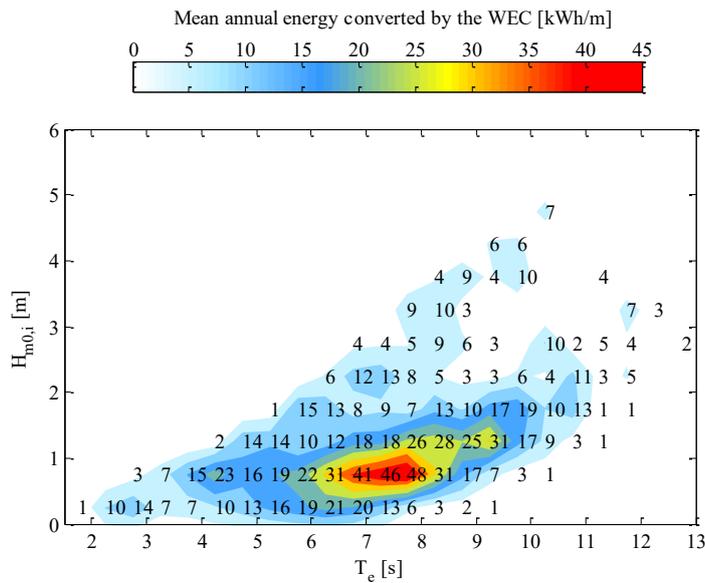


Figura 8.15: Energia annuale convertita dall’OWC in funzione del periodo energetico T_e e dell’altezza d’onda significativa $H_{m0,i}$.

L'analisi delle prove a grande scala su un OWC ha mostrato che il coefficiente di riflessione C_r è uguale a 0,9 quando l'orifizio è chiuso, valore questo corrispondente alla parete verticale e dunque in assenza di conversione di energia. Pertanto, l'energia media dell'onda convertita dal PTO è stimata sulla base del coefficiente di riflessione C_r :

$$P = \frac{\rho g^2 (0,9^2 - C_r^2) H_{m0,i}^2 T_e}{64\pi} \eta_m \quad (8.1)$$

in cui ρ è la densità dell'acqua, $H_{m0,i}$ è l'altezza d'onda significativa, T_e è il periodo energetico, η_m è il rendimento medio del PTO per lo stato del mare, stimato sulla base del livello dell'acqua misurato all'interno della camera del modello fisico, applicando il rendimento caratteristico del PTO $\eta[\varphi(t)]$:

$$\eta_m = \frac{1}{t_{end} - t_0} \int_{t_0}^{t_{end}} \eta[\varphi(t)] dt \quad (8.2)$$

dove il parametro $\varphi(t) = V_0(t)/U_t$ è ottenuto dagli esperimenti di Curran et al. (1998); $V_0(t) = A_c/A_0 d\zeta/dt$ è la portata assiale al PTO; $\zeta(t)$ è l'elevazione della superficie libera all'interno della camera; U_t è la velocità tangente della turbina; t_{end} e t_0 sono gli istanti finali e iniziali della superficie libera. In tal modo, può essere ricavato un valore medio di rendimento del PTO per ogni coppia di $H_{m0,i}$ e T_e .

In definitiva, valutati i parametri geometrici che influenzano maggiormente il rendimento del sistema e valutati gli stati di mare più frequenti del sito in cui si vuole installare il sistema, è possibile definire le condizioni per cui il sistema fornisce l'efficienza massima.

Il rendimento complessivo del sistema OWC, considerando una turbina Wells monopiana, può essere ottenuto anche sulla base degli esperimenti di Curran et al. (1998). Tali autori hanno rappresentato l'andamento del rendimento del sistema in funzione del parametro φ . Per una turbina monopiana, il parametro φ che dà il massimo rendimento è pari a 0,12. Fissato tale valore e nota la velocità

dell'aria media, è possibile calcolare la velocità media della turbina. Fissata la velocità della turbina, si può ricavare istantaneamente il parametro φ e il rendimento del sistema η pari a 0,18 per il sito di Giardini Naxos.

8.6.3. Analisi strutturale

Valutato il moto ondoso del sito e la sua direzione di provenienza, è stato possibile individuare la zona planimetrica del porto di Giardini Naxos in cui è possibile collocare un dispositivo OWC. In particolare, l'installazione dell'OWC potrebbe interessare i primi 80m del molo di sopraflutto, a partire dalla testata del molo esistente (Figura 8.16). Si fa presente che non può essere considerato l'intero molo di sopraflutto in quanto la parte terminale del molo è predisposta all'attracco di grosse navi da crociera e yacht con un terminal che, per motivi di spazio, è incompatibile con l'inserimento dell'OWC. Non può essere considerata nemmeno la testata della diga in quanto particolarmente vulnerabile, in termini di instabilità strutturale, essendo usualmente ubicata in acque più profonde e soggetta a correnti più pronunciate e ad azioni provenienti da un più ampio settore di traversia.

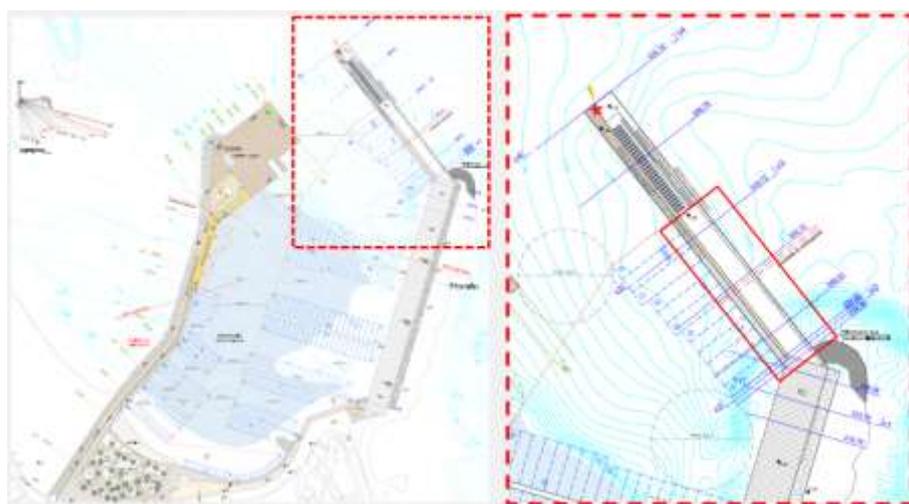


Figura 8.16: Stralcio della planimetria del molo di sopraflutto da realizzare nel porto di Giardini Naxos e possibile collocazione del sistema OWC (rosso).

A Giardini Naxos, l'estensione della diga di sopraflutto è prevista in cassoni in cemento armato riempito di sabbia e ghiaia (Figura 8.17).

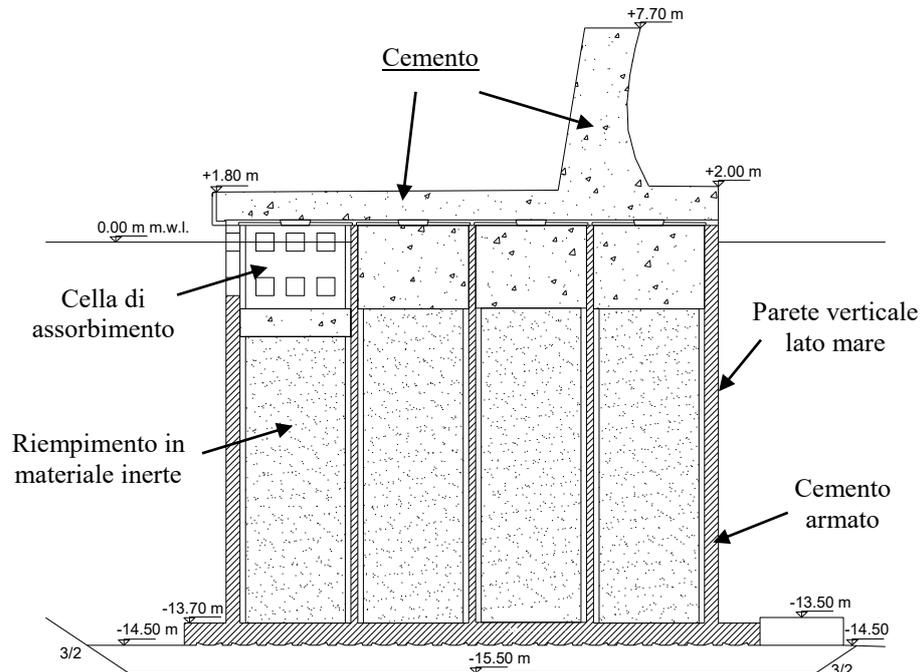


Figura 8.17: Sezione del molo di sopraflutto prevista nel progetto originario di allargamento del porto di Giardini Naxos.

La presenza di un dispositivo OWC incorporato nella diga comporta una modifica nella sezione dal lato del mare, *offshore*. Il corretto dimensionamento dell'opera emerge dall'analisi dei risultati sul modello in piccola scala. In particolare, la prima camera del cassone dal lato del mare diventa la camera del sistema OWC: la nuova sezione è mostrata in Figura 8.18. La camera, in base a quanto ottenuto dalle sperimentazioni, avrà una sommergenza relativa della parete frontale $a/h = 0,45$, che dà i coefficienti minimi di riflessione (cioè 0,55-0,65) per le configurazioni testate. Considerando che la profondità dell'acqua del molo di sopraflutto è di -14,50m, la sommergenza della parete anteriore della camera dell'OWC corrisponde a -6,50m. Pertanto, oltre alla conversione di energia, il

sistema comporta il vantaggio della riduzione della riflessione, permettendo un uso più sicuro di tutto il porto.

Una particolare attenzione è stata posta al problema del rumore prodotto dalla turbina Wells, che causerebbe un livello di potenza sonora elevato. La soluzione adottata prende spunto da quanto applicato a Mutriku (Torre Enciso et al, 2009): la turbina è installata in una camera di attenuazione al di sopra della camera pneumatica. Inoltre, si prevede l'installazione di pannelli fonoassorbenti sulle pareti interne della camera di attenuazione (Figura 8.18).

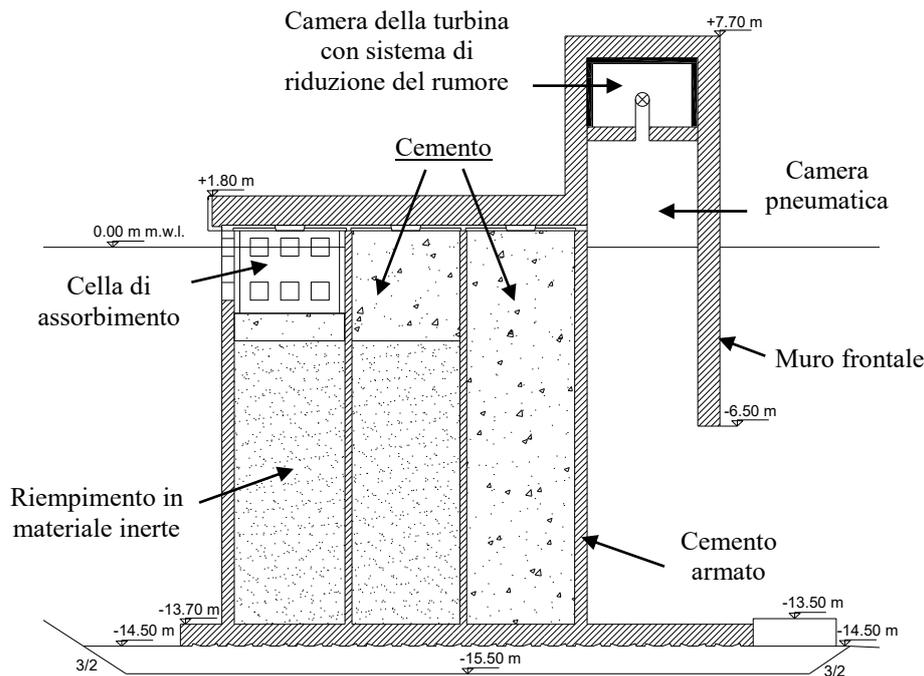


Figura 8.18: Nuova sezione del molo di sopraflutto, da realizzare nel porto di Giardini Naxos, con all'interno il sistema OWC.

La fattibilità strutturale viene eseguita attraverso l'analisi di stabilità, considerando i carichi esterni dovuti all'impatto dell'onda con periodo di ritorno $T_r = 100$ anni. I carichi vengono valutati con la formulazione di Sainflou

modificata del fattore moltiplicativo 1,1, ottenuto dalla modellazione fisica del dispositivo di Giardini, indipendentemente dalle condizioni d'onda incidente. Le verifiche sono soddisfatte sia allo scorrimento e che al ribaltamento sulla sezione della diga modificata per ospitare l'OWC. In particolare, le forze orizzontali stabilizzanti sono superiori a 1,2 volte le forze orizzontali di scorrimento; il momento stabilizzante è maggiore di 1,5 volte il momento ribaltante. La stabilità è verificata riempiendo la seconda camera della diga in calcestruzzo al posto dei materiali inerti e incrementando di 1m il tappo di calcestruzzo nella terza camera, rispetto alla configurazione di progetto della sezione della diga. La sezione della diga è stata modificata opportunamente in modo da contenere sia la camera d'aria sia la camera di attenuazione per la turbina ed i pannelli fono assorbenti. Tuttavia, l'altezza dell'opera e l'estensione trasversale rimangono invariati, in particolare l'altezza del muro paraonde in progetto non è stata modificata, in modo da ridurre al minimo l'impatto visivo dell'installazione del dispositivo.

8.7. Analisi economica

La fattibilità economica è stata valutata confrontando l'incremento dei costi C_{WEC} con l'utile connesso alla produzione energetica. In particolare, il costo totale di installazione del dispositivo OWC così progettato per la lunghezza totale di 80m è incrementato del 4%. In quest'analisi sono considerate le modifiche strutturali, le turbine, il generatore, il collegamento elettrico alla rete e gli attenuatori di rumore, come riportato in Tabella 8.3.

In dettaglio, l'incremento del costo di una diga OWC è stato valutato rispetto alla normale configurazione di una diga a parete verticale ed è pari a circa 3%. Il costo della turbina e del generatore è stato valutato sulla base di quanto proposto da Di Bella (2016) e alla potenza massima del sistema, pari al 0,7%. I costi per la connessione alla rete di distribuzione elettrica, pari al 0,2%, sono valutati sulla base della normativa italiana, I pannelli fonoassorbenti con cui si vuole rivestire

la camera di attenuazione ai fini di ridurre il rumore prodotto dalla turbina, incidono sull'incremento dei costi della struttura dello 0,1%.

L'incidenza maggiore sul costo totale dell'opera, dopo quella strutturale è legata alle turbine ad aria scelte in quanto non sono ancora diffuse a livello commerciale e devono essere ottimizzate per il caso di studio (Di Bella, 2014 e 2016).

Tabella 8.3: Stima dei costi per l'installazione del sistema OWC nella diga di sopraflutto del porto di Giardini Naxos.

Componenti sistema OWC	Costo [€]	Incidenza [% sul costo totale del porto]
variazione strutturale	325000	2,9
pannelli di riduzione del rumore	12000	0,1
turbine	59000	0,5
generatore	21000	0,2
collegamento alla rete di distribuzione elettrica	19000	0,2
Totale (C_{WEC})	436000	3,9

Il guadagno economico è una funzione della produzione annua di energia e del suo prezzo. L'energia è derivabile sulla base di quella disponibile nel sito di interesse e del rendimento del sistema.

L'energia convertita in un anno dal sistema installato con un'efficienza stimata di 0,18 è di circa 100MWh, considerando che la potenza media disponibile è di 0,76kW/m nel sito di studio. Questo rappresenta un buon risultato per un'area a bassa energia ondosa disponibile, risultato raggiunto grazie all'ottimizzazione del sistema eseguita per le condizioni d'onda incidenti tipiche del clima ondoso locale.

Il guadagno economico, per il caso di studio, può essere calcolato considerando che l'energia rinnovabile prodotta dalle onde del mare è pagata in Italia 300€/MWh. Di conseguenza, il flusso di cassa medio annuo C_y è pari a 30.000 €.

Il periodo di ammortamento n dell'investimento può essere valutato dai costi di costruzione dell'OWC (C_{WEC}) con il flusso di cassa annuale (Broverman, 2010):

$$C_{WEC} = \sum_{k=1}^n \frac{C_y}{(1+i)^k} \quad (8.3)$$

dove k è l'anno generico di costruzione dell'OWC; i è il tasso di interesse. Considerando un tasso di interesse pari al 2%, il periodo di ammortamento risultante per il caso studio è pari a 19 anni. Tale durata è simile alla durata tipica di una turbina ad aria, cioè 20 anni. Pertanto, l'installazione di un tale dispositivo WEC non causa una perdita economica, nonostante il basso livello di energia disponibile nel sito dello studio. Infine, considerando che il costo dei componenti meccanici diminuirà quando questi diventeranno commerciali, l'investimento nel futuro presenterà una crescente convenienza economica.

9. CONCLUSIONI

La possibilità di integrare sistemi per l'estrazione di energia dal moto ondoso (WEC) all'interno delle strutture portuali può rendere tali sistemi convenienti anche in zone costiere a basso contenuto energetico. Nel dettaglio, il presente lavoro ha posto l'attenzione su un sistema a colonna d'acqua oscillante (OWC) da poter integrare nelle dighe marittime a parete verticale. Tale sistema è stato qui studiato mediante modelli fisici a grande e piccola scala. Dall'analisi dei dati è stato possibile valutare i parametri geometrici che influenzano il comportamento idrodinamico e il dimensionamento ottimale del sistema. Il fine ultimo è stato quello di proporre una configurazione di OWC ottimizzato per un sito con bassa disponibilità di energia, nel Mar Mediterraneo e, precisamente, lungo le coste della Sicilia.

Gli esperimenti su modello fisico a grande scala sono stati condotti presso il canale GWK dell'Università di Hannover, nell'ambito del progetto Hydralab IV (Allsop et al, 2014). Il dispositivo studiato in tale ambito è in scala 1:9 rispetto ad un eventuale prototipo da poter collocare nell'Oceano Atlantico e in scala 1:4 di un dispositivo collocabile nel Mediterraneo. In particolare, l'OWC testato nel canale GWK è costituito da tre camere aperte sul lato *offshore*. Sulla parte sommitale di ciascuna camera è stato inserito un orifizio che simula la perdita di carico della turbina. Negli esperimenti condotti è stato variato il diametro dell'orifizio d_0 e sono state testate diverse condizioni di moto ondoso, sia regolare che irregolare, facendo variare le altezze e i periodi delle onde. Escludendo la condizione di orifizio chiuso, per la quale si è verificato che il sistema OWC si comporta come una diga a parete verticale, le analisi dei dati hanno fornito valori del coefficiente di riflessione $C_r < 0.9$. Questo risultato comporta che la presenza

di un OWC nelle opere foranee di un porto consente di ridurre l'entità del moto ondoso in prossimità del porto stesso.

I dati registrati durante gli esperimenti del GWK hanno permesso di valutare, attraverso il coefficiente di riflessione C_r , il diametro ottimale dell'orifizio. I valori stimati di C_r tendono a diminuire al crescere dell'apertura dell'orifizio, fino a raggiungere un minimo oltre il quale un'apertura ulteriore provoca un incremento della riflessione. Il coefficiente di riflessione minimo, a cui corrisponde anche la massima efficienza del dispositivo, si ottiene per la configurazione con area relativa dell'orifizio (rispetto all'area della camera) $A_0/A_c = 0,9\%$, sia per le onde irregolari che regolari. Il C_r è compreso tra 0,4 e 0,65 con valori minimi per $B/L_P = 0,11$, larghezza relativa della camera B rispetto alla lunghezza d'onda L_P ottenuta dal periodo di picco T_P . Il coefficiente di riflessione spettrale $C_r(f)$, rappresentato in funzione di B/L , mostra un andamento decrescente con il crescere di B/L fino a raggiungere un minimo per $B/L = 0,11-0,15$, oltre il quale tende nuovamente a crescere. Inoltre, $C_r(f)$ presenta valori maggiori dell'unità, ossia l'ampiezza della componente dell'onda riflessa è maggiore di quella incidente. Ciò implica un trasferimento di energia tra onde a frequenza diversa: l'energia delle onde incidenti non solo è convertita in energia cinetica dell'aria ma è anche immagazzinata come energia di pressione all'interno del cassone e ritrasferita al moto ondoso riflesso con frequenze diverse da quelle incidenti.

Le analisi sui segnali di pressione, acquisite a 1000Hz, e sulle forze sono state eseguite considerando la media dei quattro massimi su un treno di 1000 onde, ottenendo così un valore $1/250$ che è statisticamente più rappresentativo del massimo. Le pressioni così ottenute lungo le pareti verticali sono state confrontate con noti metodi empirici di stima delle azioni estreme sulle opere marittime, sia all'esterno che all'interno della camera. Dal confronto è emerso che i metodi di stima presi in esame riproducono abbastanza bene la forma della distribuzione di

pressione lungo le pareti verticali dell'OWC, con un massimo in corrispondenza del livello di quiete dell'acqua. Tuttavia, tali metodi di stima non colgono bene l'impulsività delle onde poiché sottostimano i valori massimi delle azioni sull'OWC proprio nei test con onde vicine alla condizione di frangimento.

Le forze, ottenute dall'integrazione delle pressioni lungo una determinata area di influenza, sono state confrontate con i metodi di stima ed hanno evidenziato la sottostima del metodo di previsione rispetto ai valori misurati per le onde impulsive. È possibile quindi definire, per il caso di OWC ottimizzato energeticamente, il limite di altezza d'onda significativa relativa $H_s^* = H_s/h_0 = 0,16$ oltre il quale le formulazioni sottostimano le pressioni misurate nella parete anteriore del dispositivo. Al contrario, la formulazione empirica adottata per la parete posteriore degli OWC, essendo pensata per i cassoni antiriflettenti del tipo Jarlan, non fornisce sempre risultati attendibili e necessita di ulteriori approfondimenti.

Dalle valutazioni sul periodo proprio di oscillazione del sistema è emerso che le condizioni ottimali di funzionamento si hanno per larghezza della camera relativa B/L^* molto piccola, dove L^* è la lunghezza naturale di oscillazione del sistema, ottenuta dal tempo di ritardo T^* tra il flusso all'interno della camera e la pressione esercitata dall'onda.

Al modello a grande scala è stata applicata anche la formulazione analitica di Takahashi (1988) riguardante l'interazione tra l'elevazione di superficie e la pressione dell'aria all'interno della camera pneumatica dell'OWC. Tale formulazione ha fornito un buon adattamento con i risultati degli esperimenti condotti con onde regolari e orifizio totalmente chiuso. Sulla base di questi risultati è stato possibile calibrare l'esponente della politropica γ presente nella formulazione utilizzata, che nel caso in esame è risultato essere pari a 1,1. Sempre nel caso di orifizio chiuso, l'elevazione di superficie e la variazione di pressione nel tempo dentro la camera sono sincroni. Tale comportamento è giustificato dal

fatto che, a sistema chiuso, una variazione della elevazione di superficie dell'acqua dentro la camera comprime e decomprime il volume dell'aria e causa istantaneamente la variazione della pressione dell'aria.

A diametro dell'orifizio aperto, l'elevazione di superficie e l'andamento della pressione non sono più sincrone, l'andamento della pressione è in fase con la derivata dell'elevazione di superficie, dunque con l'accelerazione del flusso d'acqua dentro la camera. In particolare, è possibile definire una relazione che leghi queste due grandezze attraverso un parametro k_p pari alla media delle pressioni rispetto al tempo in valore assoluto. Nella condizione di orifizio aperto, la variazione dell'elevazione di superficie è in qualche modo legata alla velocità di efflusso dell'aria. Una possibile spiegazione è che la variazione di velocità dell'acqua dentro la camera, quindi l'accelerazione dell'elevazione di superficie, provochi una variazione della pressione e quindi della velocità di efflusso dell'aria.

I risultati del modello a grande scala sono in parte riportati nell'articolo "Large-scale experiments on the behaviour of a generalised Oscillating Water Column under random waves" pubblicato sulla rivista *Renewable Energy* di dicembre 2016.

Gli esperimenti a piccola scala sono stati condotti nel Laboratorio di Idraulica dell'Università di Catania e hanno previsto tre diverse fasi: la prima fase è stata progettata sulla base degli esperimenti a grande scala con lo scopo di valutare gli effetti di scala tra i due modelli; la seconda fase ha previsto la variazione di diversi parametri geometrici con lo scopo di determinare una configurazione ottimale del sistema OWC; la terza fase ha previsto l'applicazione del modello al caso studio di Giardini Naxos.

Nella prima fase, l'analisi degli effetti di scala ha fatto emerge le criticità dovute alla scala con cui ridurre il modello. In generale viene adottata la scala geometrica tuttavia, nel caso della camera d'aria, la semplice scala geometrica potrebbe dare

risultati fuorvianti a causa della pressione dell'aria. Il modello a piccola scala è stato riprodotto scalando geometricamente le grandezze di 1:18 rispetto al modello a grande scala. La camera d'aria è stata testata con due configurazioni diverse in cui l'altezza della camera è stata prima scalata geometricamente e poi è stata testata un'altezza maggiore della camera d'aria.

Il periodo proprio di oscillazione del dispositivo è stato espresso in termini adimensionali mediante il rapporto tra la larghezza della camera B e la lunghezza naturale di oscillazione L^* , quest'ultima ottenuta applicando la legge di dispersione lineare al periodo proprio di oscillazione. Per elevati numeri di Froude, tale parametro adimensionale tende asintoticamente al valore $B/L^* = 1,5$ mentre per gli esperimenti a piccola scala tende ai valori 1,1 e 1,2. Questo comportamento è dovuto alla maggiore perdita di energia della piccola scala a causa degli effetti viscosi sulla parete: si riduce la velocità del fluido all'interno della camera, aumenta il periodo proprio delle oscillazioni della colonna d'acqua e diminuisce il valore del parametro B/L^* . A parità di scala geometrica, il comportamento della camera è assimilabile a quello di una molla in cui, se aumenta il volume, la colonna d'acqua è meno affetta dalla pressione dell'aria sovrastante, come una molla più debole. In definitiva, incrementando il volume d'aria aumenta anche il periodo proprio di oscillazione della colonna d'acqua e si riduce B/L^* .

Il coefficiente di riflessione ottenuto dai due modelli confrontati (a grande e piccola scala) e dalle due configurazioni a piccola scala ha mostrato la medesima tendenza dei dati ottenuti, ma valori decisamente più alti per la grande scala. Si precisa che il C_r ottenuto dalla grande scala è stato valutato con il metodo delle quattro sonde, mentre per la piccola scala con il metodo delle tre sonde, avendo preventivamente dimostrato la congruenza tra i risultati dei due metodi. La grande scala, per le prove selezionate, mostra un C_r compreso circa tra 0,5 e 0,6, mentre C_r per la piccola scala è compreso tra 0,4 e 0,5. La configurazione a piccola scala

con la camera più alta presenta dei valori leggermente maggiori che tendono verso quelli della grande scala. Il minor C_r è compreso in un range di $B/L_p = 0,1-0,15$, ossia per valori vicini a quelli di B/L^* . In tali condizioni si riscontrano anche risultati dei modelli a piccola scala che si discostano maggiormente da quelli a grande scala. Gli effetti di scala sono dunque maggiori per la riflessione delle onde nel caso in cui il periodo di picco si avvicina al periodo proprio di oscillazione del sistema. In particolare, quando i sistemi OWC funzionano vicino alla condizione di risonanza, il coefficiente di riflessione della piccola scala è ridotto di circa il 20% rispetto alla grande scala. Il coefficiente di riflessione spettrale $C_r(f)$ ha un andamento decrescente fino al valore minimo nel range $B/L = 0,1-0,15$ dopo il quale cresce nuovamente al crescere di B/L . L'andamento del $C_r(f)$ mostra un buon adattamento tra la grande e la piccola scala fino al raggiungimento del valore minimo, successivamente i dati a grande scala tendono a crescere più velocemente rispetto a quelli a piccola scala, fino a discostarsi notevolmente. Anche in questo caso, la configurazione a piccola scala con altezza della camera maggiore si avvicina di più al modello a grande scala, rispetto all'altra configurazione testata, rimanendo tuttavia distante.

L'analisi dei massimi di pressione e forze è stata eseguita considerando i valori $1/250$ di ogni segnale registrato. Quanto ottenuto per il C_r si ottiene anche per le pressioni: analizzando una prova con ripidità dell'onda intermedia tra quelle testate, le pressioni nella grande scala sono maggiori delle pressioni nella piccola scala, mentre nelle due configurazioni a piccola scala le differenze sono trascurabili. Il confronto delle forze ottenute nella grande scala rispetto a quelle ottenute nella piccola scala in funzione di H_s^* ha confermato quanto già ottenuto: $H_s^* = 0,16$ rappresenta il limite in cui il quale si ha un'inversione di tendenza. In particolare, per $H_s^* < 0,16$ le forze della grande scala sono minori di quelle della piccola scala mentre per $H_s^* > 0,16$ le forze della grande scala sono maggiori di quelle della piccola scala. Inoltre, quando $H_s^* > 0,16$ il rapporto $B/L_p = 0,12$,

valore questo prossimo a quello di B/L^* che si ottiene per i modelli a piccola scala.

Gli effetti di scala sono riportati nell'articolo "Scale effects in physical modelling of a generalized OWC" in fase di valutazione sulla rivista Ocean Engineering ad aprile 2017.

La seconda fase di laboratorio ha previsto la valutazione della configurazione ottimale del sistema sulla base della variazione di alcuni dei parametri geometrici della camera in termini relativi (h_t/d , A_0/A_c e a/d) in modo da ottenere il minore coefficiente di riflessione tra le diverse configurazioni. L'incremento dell'altezza della camera d'aria h_t rispetto alla profondità d'acqua al cassone d provoca un lieve incremento dei valori di C_r , trascurabile, dove i valori minori si hanno per $h_t/d = 1,44$. Mentre i parametri che maggiormente influenzano il coefficiente di riflessione sono la larghezza della camera B e la sommergenza a . La variazione della larghezza della camera ha fornito valori del coefficiente di riflessione C_r compresi tra 0,3 e 0,7. Al ridursi della larghezza della camera, C_r cresce e il suo comportamento tende a quello della parete verticale. Il comportamento dell'OWC tende ad essere quello della riflessione totale anche quando crescere la sommergenza della parete frontale. In definitiva, il minor C_r si ha per $B/L_p = 0,1-0,15$ nella configurazione con $A_0/A_c = 0,98\%$ e $a/d = 0,33$. Tuttavia, la larghezza della camera per cui si ottiene il minimo C_r è impossibile da realizzare strutturalmente in scala reale, quindi si considera per l'applicazione al caso reale la larghezza della camera più stretta testata. In questo caso è emerso che il minor C_r si ha per $h_t/d = 3,11$, $A_0/A_c = 0,71\%$ e $a/d = 0,33$.

Lo studio del sistema OWC è stato completato con le valutazioni su l'installazione di un sistema in un sito pilota nella terza fase di laboratorio. Il porto scelto è quello di Giardini Naxos, situato nella costa orientale della Sicilia, in cui l'energia disponibile è nettamente inferiore rispetto a quella delle coste Nord Europee. Il flusso medio di energia sottocosta è pari a 6,6MWh/m annui e si ipotizza di

installare un sistema OWC nei primi 80m di quello che sarà il nuovo molo di sopraflutto. La modellazione fisica è stata condotta in scala 1:75 rispetto al prototipo. In questo caso, la larghezza della camera è stata mantenuta costante e sono stati fatti variare la sommergenza della parete frontale e il diametro dell'orifizio. Le onde irregolari testate hanno tenuto conto del moto ondoso caratteristico del sito in esame, scalandolo opportunamente. Il periodo proprio di oscillazione T^* del dispositivo è pari a 0,15s e 0,22s, rispettivamente per le configurazioni che danno il minore e il maggiore coefficiente di riflessione.

Il coefficiente di riflessione per le configurazioni testate è compreso nell'intervallo 0,55 – 0,9 e tende a convergere verso il valore 0,7 quando B/L_p diminuisce. Il diametro dell'orifizio non influenza notevolmente il coefficiente di riflessione, mentre la sommergenza fa variare notevolmente i valori di C_r : ancora una volta il sistema OWC tende al comportamento della parete verticale, cioè a C_r pari a 0,9, per sommergenza crescente. Il massimo di C_r si ha per $a/h = 0,82$, mentre il minimo di C_r si ha per $a/h = 0,45$. Quest'ultimo valore di sommergenza relativa rappresenta la condizione ottimale per il dispositivo testato ed è stato utilizzato per progettare il prototipo di OWC da installare nel sito pilota.

Considerando una condizione di onda con ripidità intermedia, sono state valutate le pressioni misurate sulla parete frontale rispetto a quelle stimate con il noto metodo di Sainflou. Essendo le condizioni d'onda lontane dalle condizioni di frangimento e impulsività, il metodo di stima si adatta bene alle misurazioni, pur sottostimando l'elevazione di superficie massima sulla parete frontale del dispositivo. La valutazione delle forze agenti su tale parete frontale fa emergere che i valori misurati sono mediamente 1,1 volte maggiori di quelli stimati.

Il problema del rumore, provocato dall'attivazione della turbina in fase di produzione, è stato affrontato mediante il confronto con un dispositivo analogo, ottenendo per uno stato di mare mediamente superato 5 giorni in un anno, un livello sonoro annuale caratteristico di 120dB. Tale valore può essere ridotto fino

a 70dB inserendo dei pannelli fonoassorbenti nella camera di alloggiamento della turbina.

Il rendimento del sistema è stato ottenuto sulla base: della modellazione fisica, di formulazioni empiriche sul rendimento della turbina e del clima ondoso nell'area in esame. Complessivamente, tale rendimento è stato valutato pari a 0,18, da cui si ottiene che l'energia annua mediamente fornita dal sistema sarà pari a 100MWh.

Strutturalmente, il sistema OWC si inserisce nella sezione della diga prevista in progetto, senza necessità di apportare grosse modifiche strutturali. Considerata la sommergenza della parete frontale che dà la minor riflessione, pari a -6,50m, la stabilità strutturale dell'opera è garantita allo scorrimento e al ribaltamento aumentando la quantità di calcestruzzo presente nel riempimento delle celle del cassone, a discapito del materiale inerte previsto.

Complessivamente, la realizzazione del sistema OWC all'interno della diga portuale provoca un incremento dei costi dell'opera complessiva del 4%, con un'incidenza maggiore dovuta alle opere strutturali, subito seguita dalle turbine. Queste ultime non sono ancora diffuse a livello commerciale e quindi il loro costo risulta essere particolarmente elevato. Sulla base del confronto tra i maggiori costi di investimento dovuti all'OWC e gli incassi annuali attualizzati della vendita di energia elettrica, il ritorno economico è valutato pari a 19 anni. Considerato che la durata media di una turbina è di circa 20 anni, l'installazione di un OWC non provoca una perdita economica, nonostante il sito in esame sia caratterizzato da una bassissima energia ondosa disponibile.

Il tempo necessario al ritorno economico diminuirà quando le turbine da utilizzare negli OWC diventeranno disponibili in ambito commerciale, per cui è possibile concludere che l'installazione di tali sistemi diventerà nel tempo sempre più vantaggiosa.

Dall'applicazione al caso studio è stato pubblicato un articolo negli atti di convegno Proceedings of 35th Conference on Coastal Engineering, Antalya, Turkey, 2016, con il titolo "Feasability study of a WEC integrated in the port of Giardini Naxos, Italy" in cui sono esposti parte dei risultati ottenuti. Un'altra parte dei risultati ottenuti dagli esperimenti a piccola scala per il porto di Giardini Naxos sono raccolti nell'articolo "Wave energy exploitation system integrated in the coastal structure of a Mediterranean port" pubblicato sulla rivista Sustainability nel dicembre 2016.

Bibliografia

Allsop W., McBride W., Colombo D., 1994. The reflection performance of vertical walls and low reflection alternatives: results of wave flume tests, in: *Proceedings of Thr 3rd MCS Project Workshop*, MAS2-CT92-0047, Monolithic (Vertical) Coastal Structures, De Voorst, The Netherlands.

Allsop W., 1999. MAS TIII/ PROVERBS. Probabilistic Design Tools for Vertical Breakwaters. Final report. Volume IIa. Hydrodynamic Aspects. Ch. 3.3-8.1.

Allsop W., Bruce T., Alderson J., Ferrante V., Russo V., Vicinanza D., Kudella M., 2014. Large scale tests on a generalised oscillating water column wave energy converter. *Proceedings of the HYDRALAB Joint User Meeting, Lisbon, July 2014*.

Altomare C., Gironella X., Sospedra J., 2013. Wave reflection: small and large scale experiments on wave absorbing quay walls. *Proceedings Conference: Coasts. Marine Structures and Breakwaters. At Edinburgh. UK*.

Arena F., Laface V., Malara G., Romolo A., Viviano A., Fiamma V., Sannino G., Cardillo A., 2015. Wave climate analysis for the design of wave energy harvesters in the Mediterranean Sea. *Renewable Energy*, Vol. 77, pp. 125-141.

Ashlin S.J., Sundar V., Sannasiraj S.A, 2016. Effects of bottom profile of an oscillating water column device on its hydrodynamic characteristics. *Renewable Energy*, vol. 96, pp. 341-353.

Boccotti P., 2004. Gli impianti REWEC: dighe portuali che convertono l'energia ondosa in energia elettrica, e barriere invisibili per la difesa delle coste. GNDCI Gruppo Nazionale per la Difesa delle Catastrofi Idrogeologiche CNR-IRPI. Editoriale BIOS, Cosenza.

Boccotti P., 2007. Comparison between a U-OWC and a conventional OWC. *Ocean Engineering*, Vol. 34, pp. 799-805.

Boccotti P., 2007. Caisson breakwaters embodying an OWC with a small opening – Part I: Theory. *Ocean Engineering*, Vol. 34, pp. 806-819.

Boccotti P., Filianoti P., Fiamma V., Arena F., 2007. Caisson breakwaters embodying an OWC with a small opening – Part I: A small-scale field experiment. *Ocean Engineering*, Vol. 34, pp. 820-841.

Boccotti P., Filianoti P., Fiamma V., Arena F., 2007. Caisson breakwaters embodying an OWC with a small opening – Part I: A small-scale field experiment. *Ocean Engineering*, Vol. 34, pp. 820-841.

Brooke J., 2003. Wave Energy Conversion. R. Bhattacharyya & M.E. McCormick Vol. 6.

Broverman, S., 2010. Mathematics of Investment and Credit. *Winsted: ACTEX Publishers*.

Buccino M., Stagonas D., Vicinanza D., 2015. Development of a composite sea wall wave energy converter system, *Renewable Energy*, Vol. 81, pp. 509-522.

Clement A., McCullen P., Falcao A., Fiorentino A., Gardner F., Hammarlund K., Lemonis G., Lewis T., Nielsen K., Petroncini S., Pontes M.T., Schild P., Sjordrom B.O., Sorensen H. C., Thorpe T., 2002. Wave energy in Europe: current status and perspectives. *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 6, pp. 405-431.

Coastal Engineering Manual, 2008. Part II-IV- V- VI.

Contestabile P., Iuppa C., Di Lauro E., Cavallaro L., Andersen T. L., Vicinanza D., 2017. Wave loadings acting on innovative rubble mound breakwater for overtopping wave energy conversion. *Coastal Engineering*, Vol. 122, pp. 60-74.

Cornett A. M., 2008. A global wave energy resource assessment. *International Offshore and Polar Engineering Conference*, Vancouver, Canada, vol. 1, 2008, pp. 318-326.

Bibliografia

Cox T.J.; D'Antonio, P., 2004. Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application. Spon Press.

Cuomo G., Allsop W., Bruce T., Pearson J., 2010. Breaking wave loads at vertical seawalls and breakwaters. *Coastal engineering*, Vol. 57, pp. 424-439.

Curran, R.; Whittaker, T.J.T.; Raghunathan, S.; Beattie, W.C., 1998. Performance prediction of contrarotating Wells turbines for wave energy converter design. *Journal of Energy Engineering*, vol. 124(2), pp. 35-53.

Dean R.G., Dalrymple R.A., 1991. Water wave mechanics for engineers and scientists. *Advanced Series on Ocean Engineering*, Vol. 2, World Scientific.

Delmonte R.C., 1972. Scale effects for wave transmission through permeable structure, *Proc. 13th Int. Conf. Coastal Eng.*, ASCE, Vol. 3, pp. 1867-1872.

Di Bella F.A., 2014. Development and demonstration of an OWC power system, final report. *Concepts NREC*.

Di Bella F.A., 2016. Development of a Wave Energy-Responsive Self-Actuated Blade Articulation Mechanism for an OWC Turbine United States. UNT Digital Library.

D.M. 6 Luglio 2012 – Incentivi per energia da fonti rinnovabili

Dzhonova – Atanasova D., Popov R., Georgiev A., 2013. Challenges of marine power in the Balkan Region. *Balkan Journal of electrical & computer engineering*, Vol. 1, No. 2.

EMEC The European Marine Energy center Ltd
<http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/>

Evans, D. V., Porter, R., 1995. Hydrodynamic Characteristics of an Oscillating Water Column Wave Energy Device, *Appl. Ocean. Res.*, Vol. 17, pp. 155–164.

Bibliografia

- Falcao A. F. de O., 2000. The shoreline OWC wave power plant at the Azores. *Proc 4th European Wave Energy Conf.*, Aalborg, Denmark, pp. 42-47.
- Falcao A. F. de O., 2010. Wave Energy utilization: A review of the technologies. *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.14, pp. 899-918.
- Falcao A. F. O., Henriques, J. C. C., 2014. Model-prototype similarity of oscillating-water-column wave energy converters. *International Journal of Marine Energy*, 6, 18 – 34.
- Falcao A. F. de O., Henriques J. C. C., 2015. Oscillating water column wave energy converters and air turbines: A review. *Journal of Renewable Energy*, 85, pp. 1391-1424.
- Faraci C., Scandurra P., Foti E., 2015. Reflection of sea waves by combined caissons. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. ASCE.
- Gervelas R., Trarieux F., Patel M., 2011. A time-domain simulator for an oscillating water column in irregular waves at model scale. *Ocean Engineering*, Vol. 38, pp. 1007-1013.
- Ginn., K. B. Architectural acoustic, 2nd edition, Bruel&Kjaer, 1978.
- Goda Y., and Suzuki Y., 1976. Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. *Proc., 15th Int. Coastal Engineering Conf*, ASCE, New York, pp. 828-845.
- Goda Y., 2000. Random seas and design of maritime structures, World Scientific, Singapore.
- Heath, T., Whittaker, T.J.T., Boake, C.B., 2000. The design, construction and operation of the LIMPET wave energy converter (Islay, Scotland). *Proc 4th European Wave Energy Conf, Aalborg*, Denmark, pp. 49-55.
- ISTAT Istituto Nazionale di Statistica, 2010. Italia in cifre. *Csr-Roma*.

Bibliografia

Iuppa C., Cavallaro L., Vicinanza D., Foti E., 2015. Investigation of suitable sites for wave energy converters around Sicily (Italy). *Ocean Sci.*, Vol. 11, pp. 543-557.

Iuppa C., Contestabile P., Cavallaro L., Foti E., Vicinanza D., 2016. Hydraulic performance of an Innovative breakwater for overtopping wave energy conversion. *Sustainability*, Vol. 8 (12), 1226.

Kooverji B., 2014. Pneumatic power measurement of an oscillating water converter model. Thesis.

Liberti L., Carillo A., Sannino G., 2013. Wave energy resource assessment in the Mediterranean, the Italian perspective. *Journal of Renewable Energy*, Vol. 50, pp. 938-949.

Lopez I., Andreau J., Ceballos S., Martinez de Alegria I., Kortabarria I., 2013. Review of wave energy technologies and necessary power-equipment. *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 27, pp. 413-434.

Mansard E. P. D., and Funke E. R., 1980. The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. *Proc., 17th Int. Coastal Engineering Conf*, ASCE, New York, pp. 154-172.

McConnel K.J., Allsop N. W. H., Ethelston D. M., 1996. Wave reflections from coastal structures: development and application of new approaches. *Paper to the 10th Congress of the Asia and Pacific Division of IAHR*, Langkawi Island, Malaysia, Agosto 26-29, 1996.

Monteforte M., Re C. L., Ferreri G., 2015. Wave energy assessment in Sicily (Italy). *Renewable Energy*, vol. 78, pp. 276-287.

Mork G., Barstow S., Kabuth A., Pontes M. T., 2010. Assessing the global wave energy potential. *29th International Conference on Ocean, Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Shanghai, 2010.

Bibliografia

Morris Thomas M. T., Irvin R. J., Thiagarajan K. P., 2007. An investigation into the hydrodynamic efficiency of an oscillating water column. *Jo. of Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE)*, Vol. 129, pp. 273-278.

Naty S., Viviano A., Foti E. 2016. Wave Energy Exploitation System Integrated in the Coastal Structure of a Mediterranean Port. *Sustainability*, 8(12), 1342.

Naty S., Viviano A., Foti E. 2016. Feasibility study of a WEC integrated in the port of Giardini Naxos, Italy. *Proceedings of 35th Conference on Coastal Engineering*, Antalya, Turkey.

Sainflou M., 1928. Treatise on vertical breakwaters. *Annales des Ponts et Chaussées IV*, translated by W.J. Yardoff, U.S. Army Corps of Engineers.

Sheng W., Alcorn R., Lewis T., 2013. On thermodynamics in the primary power conversion of oscillating water column wave energy converters. *Jo. of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 5, pp. 1-16.

Sheng W., Alcorn R., Lewis T., 2014. Physical modelling of wave energy converters. *Ocean Engineering* Vol. 84, pp. 29-36.

Shimada A., Fujimoto S., Saito S., Sakakiyama T., Hirakuchi H., 1986. Scale effects on stability and wave reflection regarding armor units. *Proc. 20th Int. Conf. Coastal Eng.*. ASCE. pp. 2238-2252.

Starzmann R., Carolus T., 2013. Model-based selection of full-scale Wells turbines for ocean wave energy conversion and prediction of their aerodynamic and acoustic performances. *Jo. of Power and Energy*, Vol.228(1), pp. 2-16

Takahashi, S., Tanimoto, K., Shimosako, K., 1994. A proposal of impulsive pressure coefficient for design of composite breakwaters, in: *Proc. of International Conference on Hydro-technical Eng. for Port and Harbor Construction, Port and Harbour Res. Inst.*

Takahashi, S., Shimosako, K., 1994. Wave pressure on a perforated wall, in: *Proc. of International Conference on Hydro-technical Eng. for Port and Harbor Construction, Port and Harbour Res. Inst.*

Bibliografia

Takahashi S., 1988. Hydrodynamic characteristics of wave power extracting caisson breakwater. *Coastal Engineering*, pp. 2489-2503.

Thiruvenkatasamy, K., Neelamani, S., 1997. On the efficiency of wave energy caissons in array, *Appl. Ocean Res.*, vol. 19, pp. 61-72.

Tomasicchio U., 1998. Manuale di ingegneria portuale e costiera. Editoriale BIOS, Cosenza.

Torre-Enciso Y.; Ortubia I., Lopez de Anguileta L.I., Marques J., 2009. Mutriku Wave Power Plant: from the thinking out to the reality. *4th International Conference on Ocean Energy*, Dublino, Ottobre, 2012.

Torre-Enciso Y., Marqus J., de Aguilera L.L. 2010. Mutriku. Lessons Learnt. *Proc. 3rd Int. Conf. on Ocean Energy*, Bilbao, Spain, 2010.

Torresi M., Camporeale S.M., Pascazio G., 2006. Studio teorico dell'influenza dei parametri geometrici sulle prestazioni di turbine Wells. *61° Congresso Nazionale ATI*, Perugia, Italia.

Tseng, R.S., Wu, R.H., Huang, C.C., 2000. Model study of a shoreline wave-power system, *Ocean Eng.*, vol. 27 (8), pp. 801-821.

Vicinanza D., Cappiotti L., Contestabile P., 2009. Assessment of Wave Energy around Italy. *Proc., 8th European Wave and Tidal Energy Conference*, Uppsala, Svezia.

Vicinanza D., Cappiotti L., Ferrante V., Contestabile P., 2011. Estimation of the wave energy in the Italian offshore. *Journal of Coastal Research*, Vol. 64, pp. 613-617.

Viviano A., Naty S., Foti E., Bruce T., Allsop W., Vicinanza D., 2016. Large-scale experiments on the behaviour of a generalised oscillating water column under random waves. *Journal of Renewable Energy*, Vol. 64, pp. 613-617.

Wave Energy http://www.wavenergy.it/?page_id=534

Bibliografia

Weber J., 2007. Representation of non-linear aero-thermodynamic effects during small scale physical modelling of OWC WECs. *Proc., 7th European Wave and Tidal Energy Conference*, Porto, Portogallo.

Wilson K. W., Cross, R. H., 1972. Scale effects in rubble-mound breakwater. *Proc. 13th Conference on Coastal Engineering*. Vancouver. Canada.

Zanuttigh B., Angelelli E., 2011. Analisi delle attuali tecnologie esistenti per lo sfruttamento dell'energia marina dei mari italiani. *Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, L'energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile, ENEA*.

Zanuttigh B., Margheritini L., Gambles L., Martinelli L., 2009. Analysis of wave reflection from wave energy converters installed as breakwaters in harbour. *Proc. 8th European Wave and Tidal Energy Conference*. Uppsala, Sweden.