

POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Orientamento Idraulica



**VERIFICA SPERIMENTALE ED
OTTIMIZZAZIONE DI UN SISTEMA DI
GENERAZIONE DI ENERGIA DAL MOTO
ONDOSO SOTTOCOSTA**

Relatore: Prof. Stefano Malvasi

Correlatore: Ing. Marco Negri

Tesi di laurea magistrale di:

Francesco Clerici

Matricola 766366

Anno accademico 2011/2012

INDICE

INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1 WAVE ENERGY CONVERTER	4
1.1. ENERGY DOUBLE SYSTEM (EDS)	11
1.2. SISTEMI CONFRONTABILI CON EDS	14
CAPITOLO 2 PRINCIPI DI TEORIA	19
2.1. TEORIA LINEARE DEL MOTO ONDOSO	19
2.1.1. ONDE LINEARI	20
2.1.2. SVILUPPO SOTTOCOSTA E TIPI DI FRANGIMENTO	22
2.2. TEORIA DEI POINT ABSORBER	27
CAPITOLO 3 SET-UP SPERIMENTALE	32
3.1. STUDIO DELLE ONDE NEL CANALE	34
3.2. CARATTERISTICHE DEL MODELLO EDS	40
3.3. SISTEMA DI MISURA	44
3.3.1. STRUMENTI DI MISURA	44
3.3.2. CARATTERIZZAZIONE DELLO SMORZATORE	47
3.4. ANALISI DEI DATI	50
3.4.1. CALCOLO DELLA POTENZA ASSORBITA	54
CAPITOLO 4 TEST DEL MODELLO EDS	59
4.1. PRIMO MODELLO EDS	59
4.1.1. DESCRIZIONE DEL PRIMO MODELLO E PROVE EFFETTUATE	59
4.1.2. OSSERVAZIONI SUL PRIMO MODELLO EDS	69
4.2. SECONDO MODELLO EDS	70
4.2.1. TEST SUL SECONDO MODELLO EDS	72
- Massa del galleggiante e distanza dalla linea di costa	72
- Affondamento della pala e distanza pala-galleggiante	78

-	Inclinazione del dinamometro e dell'asta principale	85
-	Posizione di pala e galleggiante rispetto alla costa	91
-	Rapporto tra i bracci della pala	93
-	Massa supplementare da entrambi i lati della cerniera	95
-	Forma della pala	97
4.2.1.	OSSERVAZIONI SUL MODELLO EDS	99
4.2.2.	VERIFICA SUL MODELLO EDS	102
<u>CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI</u>		107
<u>BIBLIOGRAFIA E RIFERIMENTI</u>		110
<u>ALLEGATO A: CARATTERISTICHE DELLE PROVE SUL SECONDO MODELLO</u>		114
<u>ALLEGATO B: RISULTATI NUMERICI DEI TEST SUL SECONDO MODELLO</u>		127

- **Indice delle Figure**

Fig. 1.1: Schema di un impianto per lo sfruttamento di energia del moto ondoso	5
Fig. 1.2: Possibili movimenti di un oggetto nel mare	6
Fig. 1.3: Norwegian Buoy (Trondheim)	7
Fig. 1.4: Schema di un sistema Oyster	7
Fig. 1.5: Prototipo Pelamis (Scozia)	8
Fig. 1.6: Schema di un sistema OWC	8
Fig. 1.7: Rappresentazione del sistema SSG	9
Fig. 1.8: Rappresentazione del sistema EDS di Tecnomac	11
Fig. 1.9: Ciclo di funzionamento teorico del sistema EDS	13
Fig. 1.10: Orientamento di un impianto EDS composto da più moduli	13
Fig. 1.11: Schema Del Sistema Wave Star Energy	14
Fig. 1.12: Modello Wave Star Energy Scala 1:2 (HANsthalm -MAr Del Nord)	15
Fig. 1.13: Disposizione di un sistema modulare Wave Star rispetto alla direzione del moto ondoso	15
Fig. 1.14: Modello del sistema SWEC	16
Fig. 1.15: Risultati Sperimentali SWEC	17
Fig. 2.1: Schematizzazione di un'OndaProgressiva	21
Fig. 2.2: Schema di moto Ondoso Ortogonale a Una Batimetria Parallela	23
Fig. 2.3: Frangimento Di Tipo Spilling	24
Fig. 2.4: Frangimento Di Tipo Plunging	24
Fig. 2.5: Evoluzione della cresta dell'onda in un frangimento di tipo plunging [13]	25
Fig. 2.6: Evoluzione Del Frangimento di Tipo Plunging	25
Fig. 2.7: Frangimento di tipo Surging	26
Fig. 2.8: Frangimento di tipo Collapsing	26
Fig. 3.1: Vista Del Canale e Del Generatore d'onda	34
Fig. 3.2: Statiche delle onde delle coste italiane[16]	35
Fig. 3.3: Particolare di una sonda capacitiva utilizzata per la misura delle altezze d'onda	36
Fig. 3.4: Altezza d'onda lungo il canale	37
Fig. 3.5: Lunghezza d'onda lungo il canale	38
Fig. 3.6: Ripidità d'onda lungo il canale	38
Fig. 3.7: Schema del modello EDS	40
Fig. 3.8: Vista Del Sistema EDS	41
Fig. 3.9: Particolare: lo smorzatore	42
Fig. 3.10: Schema dello smorzatore e del sistema di misura	45
Fig. 3.11: Dinamometro e fotocellula per le misure sulla pala	45
Fig. 3.12: Curva di taratura della cella di carico	46
Fig. 3.13: Modulo di acquisizione con gli alimentatori degli strumenti	47

Fig. 3.14: Risultati dei test di caratterizzazione dello smorzatore	48
Fig. 3.15: Esempio di acquisizione dei segnali	51
Fig. 3.16: Schema dello Stelo	52
Fig. 3.17: parte di test 120810_p19 (stelo mosso manualmente). Velocità e forza di smorzamento istantanee del disco.....	53
Fig. 3.18: Esempio Analisi del disco smorzante.....	56
Fig. 3.19: Esempio di grafico della Potenza istantanea del galleggiante e della pala	57
Fig. 3.20: Posizione, forza e potenza del disco smorzante e della molla della pala. .	58
Fig. 3.21: Posizione del galleggiante e del pelo libero a lato del galleggiante.	58
Fig. 4.1: schema del primo modello EDS senza pala.	60
Fig. 4.2: primo modello EDS senza pala	60
Fig. 4.3: Forme di galleggiante testate.....	62
Fig. 4.4: schema Modello preliminare EDS con pala	63
Fig. 4.5: Modello preliminare EDS con pala	64
Fig. 4.6: Risultati delle prove con onda 3000	67
Fig. 4.7: Risultati delle prove con onda 4000	68
Fig. 4.8: Schema del secondo modello EDS.....	71
Fig. 4.9: Rendimento al variare della massa supplementare ($x_s = 0.61$ m)	73
Fig. 4.10: Rendimento al variare della massa supplementare ($x_s = 1.11$ m)	74
Fig. 4.11: Rendimento al variare della massa supplementare ($x_s = 1.61$ m)	75
Fig. 4.12: Riepilogo ($x_s = 0.61$ m).....	76
Fig. 4.13: Riepilogo ($x_s = 1.11$ m).....	76
Fig. 4.14: Riepilogo ($x_s = 1.61$ m).....	76
Fig. 4.15: Rendimento in funzione di x_s con $m_{sup} = 2Kg$	77
Fig. 4.16: Rendimento in funzione di x_s con $m_{sup} = 3Kg$	77
Fig. 4.17: Variazione dell'affondamento della pala in acqua ferma ($D_{pg} = 0.04$ m)..	79
Fig. 4.18: Variazione dell'affondamento della pala in acqua ferma ($D_{pg} = 0.106$ m)	80
Fig. 4.19: Variazione dell'affondamento della pala in acqua ferma ($D_{pg} = 0.186$ m)	81
Fig. 4.20: Riepilogo per $D_{pg} = 0.04$ m	82
Fig. 4.21: Riepilogo per $D_{pg} = 0.106$ m	82
Fig. 4.22: Riepilogo per $D_{pg} = 0.186$ m	82
Fig. 4.23: Riepilogo per $D_{pg} = 0.04$ m (sfruttabile)	83
Fig. 4.24: Riepilogo per $D_{pg} = 0.106$ m (solo rendimento sfruttabile)	83
Fig. 4.25: Riepilogo per $D_{pg} = 0.186$ m (sfruttabile)	83
Fig. 4.26: Riepilogo per D_{pg} Variabile	84
Fig. 4.27: Riepilogo per D_{pg} Variabile (sfruttabile)	84
Fig. 4.28: Confronto Molla Orizzontale e Parallela all'asta del galleggiante.....	86
Fig. 4.29: Variazione dell'angolo a riposo	87
Fig. 4.30: Riepilogo Variazione dell'angolo a riposo.....	88

Fig. 4.31: Riepilogo Variazione dell'angolo a riposo(Sfruttabile)	88
Fig. 4.32: confronto distanze Dpg con $\theta= 42^\circ$	90
Fig. 4.33: Schema delle posizioni analizzate nel paragrafo precedente	91
Fig. 4.34: Prove con riferimento a Fig. 4.33	92
Fig. 4.35: Variazione della rigidezza equivalente della molla tramite il parametro b294	
Fig. 4.36: Sistema con più inerzia e sistema normale.....	96
Fig. 4.37: Diversi tipi di pale testate	97
Fig. 4.38: Risultati per pale di forma diversa	98
Fig. 4.39: Configurazione ottimale del secondo modello EDS (disegno in scala, tranne le parti del modello in grigio)	100
Fig. 4.40: Risultati della condizione ottimale e potenza totale assorbita.....	100
Fig. 4.41: Movimento ipotizzato del sistema EDS	101
Fig. 4.42: Movimento reale del sistema EDS nella condizione ottimale.....	101
Fig. 4.43: Sistema completo e sistema a elementi separati.....	104
Fig. 4.44: Fase tra galleggiante (blu) e onda(rosso) con pala	105
Fig. 4.45: Fase tra galleggiante (blu) e onda(rosso) senza pala	105
Fig. 4.46: Prestazioni del sistema Wave Star Energy	106

- **Indice delle Tabelle**

Tab. 3-A: Fattori di scala tra macchina reale e modello	33
Tab. 3-B: Proprietà delle onde al largo	39
Tab. 3-C: Parametro di Surf Similarity per le onde prodotte nel nostro canale	39
Tab. 3-D: Caratteristiche delle onde frangenti e parametro di Surf Similarity, secondo Battjes (1974). Preso da [18]	39
Tab. 3-E: Caratteristiche geometriche del modello EDS.....	43
Tab. 3-F: Masse del modello EDS.....	43
Tab. 3-G: elenco dei test effettuati sullo smorzatore	49
Tab. 4-A: Masse del primo modello eds senza pala	59
Tab. 4-B: Valori di smorzamento idrodinamico del sottosistema galleggiante.....	61
Tab. 4-C: Test per la scelta della forma del galleggiante	62
Tab. 4-D: Masse del primo modello EDS con pala	63
Tab. 4-E: Test effettuati sul modello EDS con molle.....	65
Tab. 4-F: Prove sul primo modello con onda 3000	67
Tab. 4-G: Prove sul primo modello con onda 4000.....	68
Tab. 4-H: Tabella riassuntiva dell'indagine sul modello EDS.	99

SOMMARIO

Il seguente lavoro di tesi ha lo scopo di illustrare lo studio, effettuato su un modello a scala di laboratorio, del rendimento di un innovativo sistema per la trasformazione dell'energia del moto ondoso, chiamato Energy Double System.

Il sistema è stato ideato e brevettato dall'azienda Tecnomac S.r.l, ed è costituito da una boa accoppiata a una pala per sfruttare le spinte verticale e orizzontale delle onde prossime al frangimento. Lo studio del sistema è stato affidato alla Sezione di Idraulica del Dipartimento I.I.A.R del Politecnico di Milano, e al dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università degli Studi di Brescia.

La campagna sperimentale è stata condotta presso il laboratorio di idraulica "Gaudenzio Fantoli" del Politecnico di Milano. Nel presente lavoro, dopo un'introduzione ai sistemi già esistenti e alla teoria di base del moto ondoso, saranno illustrati il modello fisico del sistema e gli step di lavoro effettuati fino al raggiungimento di una soluzione ottimale, con i risultati parziali e le osservazioni sui vari parametri indagati.

INTRODUZIONE

Con la richiesta energetica mondiale prevista in crescita nei prossimi decenni, il settore energetico si è trovato costretto a rinnovarsi, orientando la ricerca verso fonti energetiche rinnovabili. Nel novero delle energie rinnovabili rientrano tutte le fonti energetiche non legate ai combustibili fossili e, in teoria, infinitamente disponibili, quali l'energia eolica, solare, geotermica idroelettrica e marina.

Nella ricerca per lo sfruttamento dell'energia marina una particolare attenzione è stata posta sullo sfruttamento dell'energia del moto ondoso: nell'articolo "Wave Energy in Europe: current status and perspectives" [1] si evidenzia che gran parte dell'energia legata alla risorsa marina deriva dal moto ondoso. La potenza disponibile, del moto ondoso, al largo della costa atlantica europea è di circa 290 GW. La distribuzione della potenza media annuale non è omogenea e varia da un minimo di 25 kW/m (kW per metro lineare di cresta) presso le isole Canarie, ad un massimo di 75 kW/m verso le coste scozzesi, decrescendo nuovamente muovendosi verso le coste norvegesi (30 kW/m).

Il mar Mediterraneo, essendo un bacino chiuso, dispone di una superficie più limitata per la generazione del moto ondoso, e, di conseguenza, ha una disponibilità energetica inferiore (4-11 kW/m).

Se si considera l'intero sviluppo costiero europeo (Atlantico, Mar del Nord, Mar Mediterraneo) la disponibilità di energia sale a 320 GW [2].

Se si prende in considerazione l'intero sviluppo costiero mondiale i dati che si ricavano evidenziano che il contributo energetico legato al moto ondoso

potenzialmente è dello stesso ordine di grandezza del consumo attuale di energia elettrica [3].

L'idea di sfruttare il moto ondoso per produrre energia non è recente, i primi tentativi documentati risalgono al 1799 (Girard e figlio) in Francia. Tra il 1855 e il 1973 sono stati depositati 340 brevetti riguardanti sistemi per lo sfruttamento dell'energia del moto ondoso. Nel 1965 i primi sistemi Oscillating Wave Column (OWC), sviluppati e realizzati da Yoshio Matsuda, sono stati commercializzati in Giappone. La crisi del petrolio del 1973 ha incentivato la ricerca sulla produzione di energia da fonti rinnovabili, tra queste fonti rinnovabili un interesse particolare è stato posto sulla possibilità di sfruttare, su larga scala, l'energia del moto ondoso, ma è solo dal 1991 che la Commissione Europea ha introdotto nei propri programmi di ricerca sulle energie alternative anche lo studio dell'energia del moto ondoso [4].

Esiste una notevole varietà di tecnologie per assorbire energia dal moto ondoso, legate anche alla zona di installazione (shoreline, nearshore, offshore). I sistemi studiati negli anni '60/'80 erano sistemi shoreline e nearshore, cioè posti sulla linea di costa o in prossimità della stessa, principalmente grazie alla relativa semplicità costruttiva. A partire dagli anni '80, data la maggior disponibilità energetica del moto ondoso in acque profonde, si è cominciato a sviluppare sistemi operanti offshore; tuttavia queste soluzioni introducono problematiche relative alla difficoltà di costruzione in siti offshore, e per il trasporto dell'energia a terra, rendendo questi sistemi economicamente onerosi.

Recentemente si è riaperto un maggior interesse per progetti pensati per operare near-shore, soprattutto per interessi di natura economica. Questa scelta è sostenuta anche da studi quali: "Analysis of the nearshore wave energy resource"[5], nel quale si è dimostrato che la potenza realmente sfruttabile nearshore non è molto inferiore rispetto a quella sfruttabile offshore.

Nell'ambito dei sistemi nearshore si colloca il sistema oggetto del presente lavoro, l'EDS (Energy Double System), brevettato da Tecnomac S.r.l. (Flero, BS). L'idea alla base dell'EDS è sfruttare onde prossime al frangimento, tramite l'utilizzo congiunto di un galleggiante, per catturare la spinta verticale dell'onda, e una pala a tergo del galleggiante, per assorbire la spinta orizzontale.

Un lavoro di tesi preliminare su questo progetto è già stato sviluppato e discusso; il seguente lavoro ne rappresenta il proseguimento [6]. Entrambi i lavori rientrano in un progetto di ricerca sulle energie rinnovabili finanziato dalla regione Lombardia.

Il Capitolo I del seguente elaborato presenterà l'idea alla base del sistema EDS e tratterà brevemente dei sistemi di conversione dell'energia del moto ondoso già esistenti, con particolare attenzione agli studi effettuati su modelli che presentino analogie con il sistema EDS. Nel Capitolo II saranno ricapitolati i concetti basilari di teoria del moto ondoso e di teoria dei point absorber necessari per meglio comprendere il problema in esame. Poiché il sistema EDS lavora con onde prossime al frangimento sarà dedicata particolare attenzione alla descrizione di questo fenomeno. Nel Capitolo III sarà descritto dettagliatamente il set-up sperimentale, a partire dal canale di laboratorio e dagli studi effettuati sulle onde nel canale, proseguendo con la descrizione del modello dell'EDS, degli strumenti di misura e, infine, illustrando come sono stati calcolati potenza e rendimento. Nel Capitolo IV verranno descritti i test effettuati sul sistema e saranno presentati e commentati i risultati ottenuti. Infine saranno presentate le conclusioni e le proposte per i possibili sviluppi del progetto.

Capitolo 1

WAVE ENERGY CONVERTER

Con le previsioni per il futuro che indicano unanimemente un incremento del consumo dell'energia nei prossimi anni, sempre più Stati stanno incrementando i finanziamenti a favore della ricerca di soluzioni alternative, le cosiddette energie pulite, o rinnovabili. In questo ambito si stanno sviluppando diversi studi sull'energia del moto ondoso, il quale presenta un'elevata densità energetica, superiore a quella delle altre fonti rinnovabili; ciononostante, lo sfruttamento di questa risorsa per ora non si presenta economicamente competitivo rispetto ad altri settori delle energie rinnovabili quali l'eolico. Lo studio dell'estrazione di energia dal moto ondoso del mare ha conosciuto, negli ultimi 25 anni, momenti di grande attenzione, alternati a momenti di abbandono per la mancanza di risultati accettabili; tuttavia si è giunti a una fase in cui le possibilità date dalle tecnologie estrattive hanno catturato l'interesse delle industrie (Wave Star Energy, Ocean Energy Industries), portando nuovi investimenti nella ricerca.

Le principali problematiche con cui si scontrano le tecnologie che possano sfruttare l'energia del moto ondoso sono legate a [5]:

- Irregolarità di ampiezza, direzione e fase del moto ondoso, essendo preferibili soluzioni tecnologiche che siano in grado di ottimizzare l'assorbimento di energia per un ampio range di caratteristiche del moto ondoso;
- La capacità della struttura di poter sopportare carichi, legati a condizioni di mare estreme, che possono essere anche di 100 volte superiore al carico medio;

- L'accoppiamento tra le frequenze del movimento lento e irregolare delle onde incidenti, e quelle molto superiori richieste dai generatori elettrici per la trasformazione da energia meccanica a energia elettrica.

Si impone quindi la necessità di studiare sistemi WEC (Wave Energy Converter) che accoppino la necessità di avere elevate efficienza e resistenza, al bisogno di avere costi di installazione e gestione sostenibili, che rendano questi sistemi competitivi rispetto alle fonti energetiche tradizionali. Un WEC è una macchina che trasforma l'energia del moto ondoso in energia utilizzabile per l'uomo. Schematicamente un WEC può essere diviso in due parti interconnesse: un assorbitore di energia del moto ondoso e un PTO (Power Take Off) per la trasformazione dell'energia assorbita in energia utilizzabile (Fig. 1.1).

I dispositivi proposti fino ad oggi sono molteplici ciascuno pensato per una specifica modalità di applicazione; in diversi Stati, quali Danimarca, Scozia, Corea, installazioni produttive e prototipi a scala reale sono in fase di costruzione. Le soluzioni finora attuate necessitano però di investimenti costanti per poter massimizzare le possibilità estrattive, e per la ricerca di soluzioni sempre migliori.

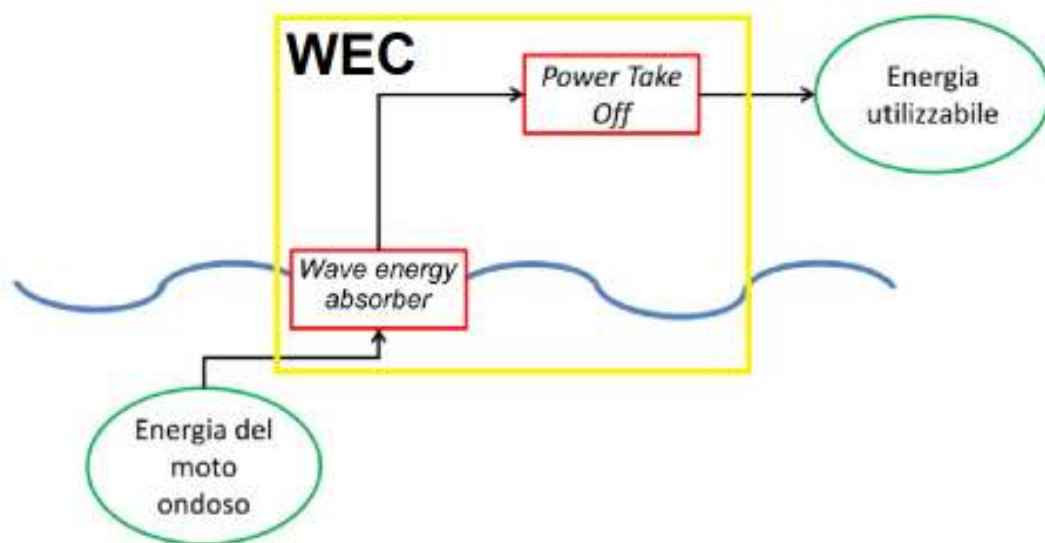


Fig. 1.1: Schema di un impianto per lo sfruttamento di energia del moto ondoso

Esistono diversi tipi di WEC:

- Oscillatin Bodies, definiti anche sistemi di terza generazione, sono composti da uno o più corpi mobili sollecitati dall'azione del moto ondoso

- Oscillating Water Column (OWC), in cui il movimento oscillatorio della superficie libera, confinata in una camera aperta sul fondo, genera un flusso d'aria che movimentata una turbina
- Overtopping, che sfruttano la tracimazione dell'onda sopra un ostacolo, immagazzinando acqua in un bacino posto a una quota superiore al livello medio del mare circostante, sfruttandone poi il potenziale per movimentare delle turbine a basso carico

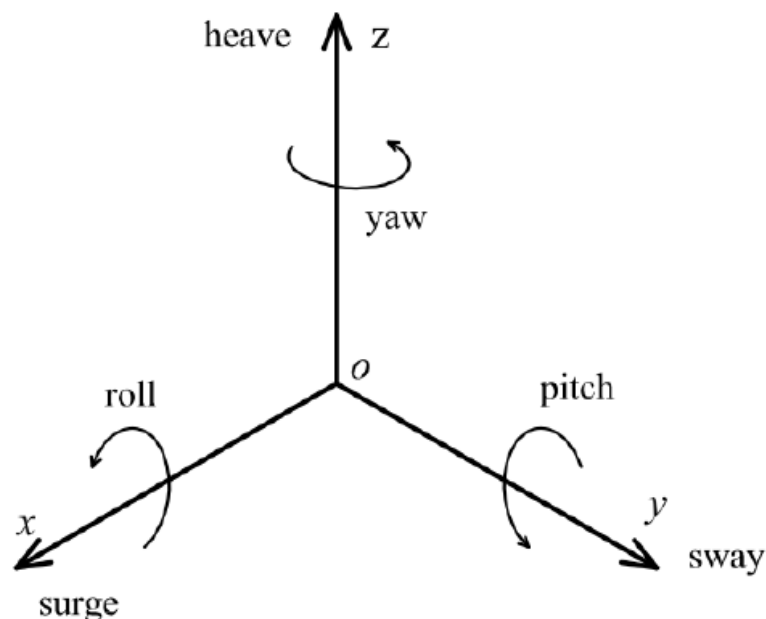


Fig. 1.2: Possibili movimenti di un oggetto nel mare

I sistemi oscillating bodies possono sfruttare tipi di moto differenti, sia traslazionali che rotazionali (Fig. 1.2). In tale figura gli assi x e y si trovano nel piano orizzontale, e l'asse x corrisponde alla direzione di propagazione dell'onda; l'asse z indica la verticale gravitazionale. Un sistema che sfrutta il movimento di tipo heave, perpendicolare alla superficie libera, è il G-1T nella baia di Tokio, poi sviluppato nella Norwegian Buoy (Fig. 1.3), che consiste in una sfera galleggiante, mobile lungo un montante ancorato al fondo; questo concetto è sfruttato anche da Archimedes Wave Swing (AWS) che presenta però un corpo interamente immerso, non a contatto con la superficie libera.

Altri sistemi oscillating bodies sfruttano un movimento del corpo di tipo surge, ovvero concorde alla direzione di propagazione delle onde, come l'Oyster [23],

Wave Energy ConverterWave Energy Converter

sviluppato in Gran Bretagna, composto da un flap forato galleggiante incernierato al fondo, il cui movimento, attiva un set di pistoni che pompano fluido in una turbina posta in una stazione costiera (Fig. 1.4).



Fig. 1.3: Norwegian Buoy (Trondheim)

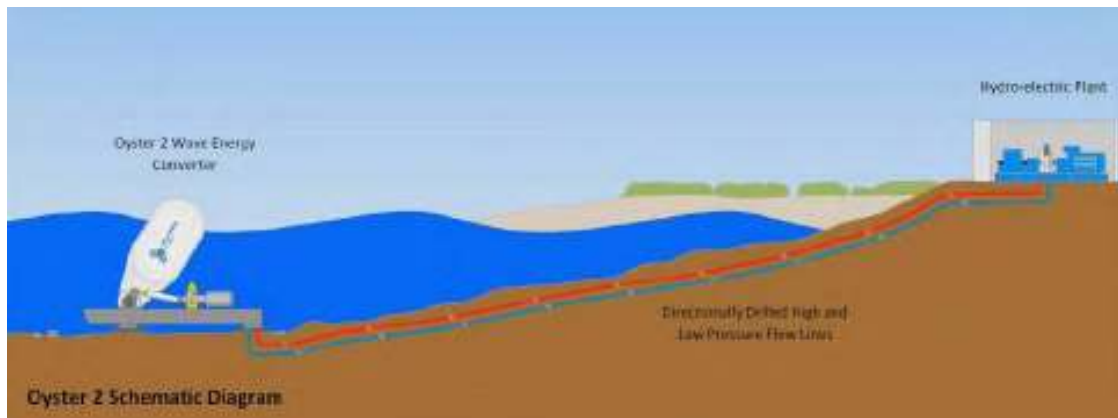


Fig. 1.4: Schema di un sistema Oyster

Sono stati studiati e realizzati anche sistemi con movimento di tipo pitch, in italiano angolo di beccheggio, come il dispositivo Duck dell'università di Edinburgo, oppure il sistema Pelamis (Fig. 1.5), sviluppato in Gran Bretagna e posto poi in opera al largo della costa settentrionale del Portogallo (2008), che sfrutta il movimento angolare relativo dei moduli da cui è composto.



Fig. 1.5: Prototipo Pelamis (Scozia)

I sistemi di tipo OWC sono suddivisi a seconda del tipo di struttura, che può essere fissa (Fig. 1.6) oppure galleggiante; esempi di strutture fisse possono essere osservate integrate nelle strutture frangiflutti nel porto di Sakata (Giappone) e in Spagna (porto di Mutriku) e Portogallo (foce del fiume Douro). Un esempio di struttura galleggiante è il Mighty Whale, il cui prototipo in scala naturale è stato studiato a partire dal 1998 nella baia di Gokasho (Giappone).

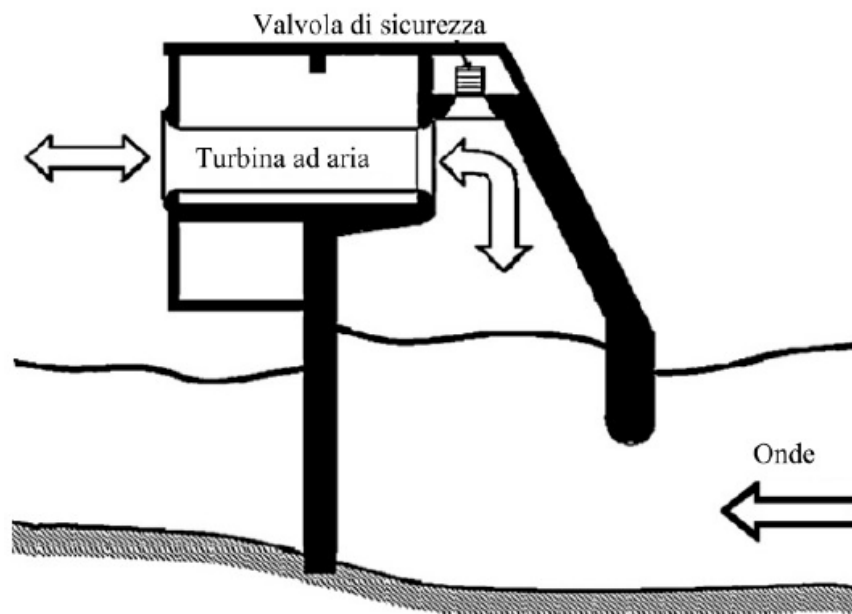


Fig. 1.6: Schema di un sistema OWC

Infine esistono esempi di tecnologia overtopping quali il Tapchan (Tapared Channel Wave Power Device, Norvegia), operante dal 1985 al 1991, e il Seawave Slot-Cone

Wave Energy ConverterWave Energy Converter

Generator (SSG), pensato per essere inserito all'interno di un cassone frangiflutti (Fig. 1.7).

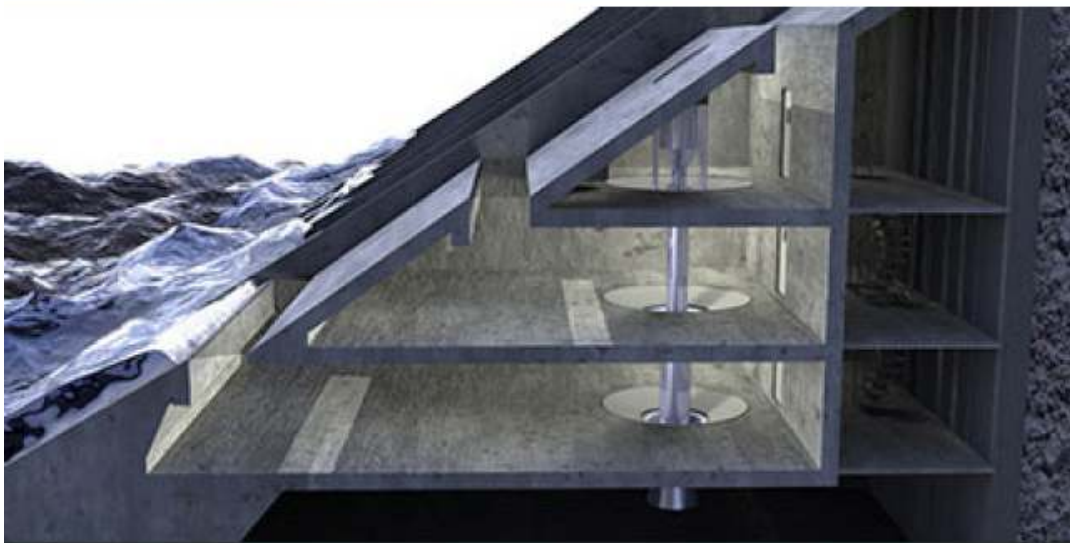


Fig. 1.7: Rappresentazione del sistema SSG

Con il termine power take off, PTO, si indica tutto l'insieme di meccanismi che operano la trasformazione di energia da meccanica ad elettrica.

Uno dei PTO maggiormente adottati per i WEC sfrutta l'utilizzo di sistemi idraulici con fluidi ad alta pressione, generalmente costituiti da un pistone idraulico in grado di convertire il movimento del WEC in energia di pressione e da un motore idraulico connesso a un generatore elettrico.

Questo sistema si adatta bene alle sollecitazioni tipiche dei dispositivi che assorbono energia dalle onde, in quanto:

- Le onde trasmettono forze di notevole entità, associate a velocità contenute, condizioni di lavoro paragonabili alle condizioni di utilizzo industriale dei sistemi idraulici;
- La potenza incidente è affetta da variabilità temporale anche notevole, i sistemi idraulici, se accoppiati con dispositivi pneumatici di immagazzinamento, permettono di accumulare l'energia su più cicli d'onda andando a risentire meno di questa caratteristica del moto ondoso;
- I sistemi idraulici mostrano grande solidità, e necessità di manutenzione contenuta, queste caratteristiche li rendono adatti a sistemi (come appunto i WEC) con installazioni di non facile raggiungimento.

Tutti i sistemi WEC rientrano nel novero delle energie pulite, poiché si lega questa espressione a tecnologie con un impatto ambientale limitato in termini di emissioni di inquinanti e di gas serra; tuttavia questa rimane una definizione ambigua in quanto, dato il numero ridotto di impianti già attivi, non si hanno riscontri sugli effetti ambientali connessi all'impiego di WEC, quali:

- Utilizzo del suolo;
- Interferenza con attività turistiche, ricreative o di navigazione;
- Erosione costiera;
- Alterazione del trasporto solido;
- Effetti sull'ittiofauna;
- Inquinamento acustico;
- Inquinamento delle acque a causa di perdite di olii meccanici.

L'incidenza di questi fattori varia a seconda della posizione del WEC rispetto alla costa.

Un fattore problematico per la progettazione di un WEC è legato alla giovane età delle rilevazioni ondometriche: in molti siti non è disponibile uno storico delle onde registrate se non da pochi anni a questa parte, pertanto, dovendo dimensionare il sistema per tempi di ritorno significativi si dovrà effettuare una stima dell'onda con quel tempo di ritorno, con una possibilità di errore piuttosto elevata che porterà o a sovradimensionare il sistema, sostenendo dei costi inutili, o a sottodimensionarlo, esponendolo a una maggior probabilità di danneggiamento.

I benefici teorici legati a questa tecnologia sono evidenti: il suo sviluppo è sostenibile, e legato a una risorsa teoricamente infinita. Mediante la realizzazione di un dispositivo ad alto rendimento, si potrebbe sfruttare pienamente la risorsa energetica marina, a costi vantaggiosi, andando comunque a incidere meno di altre fonti rinnovabili per quanto concerne l'occupazione del suolo per l'installazione.

1.1. Energy Double System (EDS)

Un'azienda italiana, la Tecnomac S.r.l. di Flero (BS), fondata nel 1990 da Arturo Lama e operante nel settore della costruzione di macchine per usi industriali, ha brevettato un sistema WEC, denominato Energy Double System (EDS). Attraverso una collaborazione tra il Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale dell'Università di Brescia e il Dipartimento di Ingegneria Idraulica del Politecnico di Milano è stato svolto un lavoro di ricerca per testare il sistema EDS.

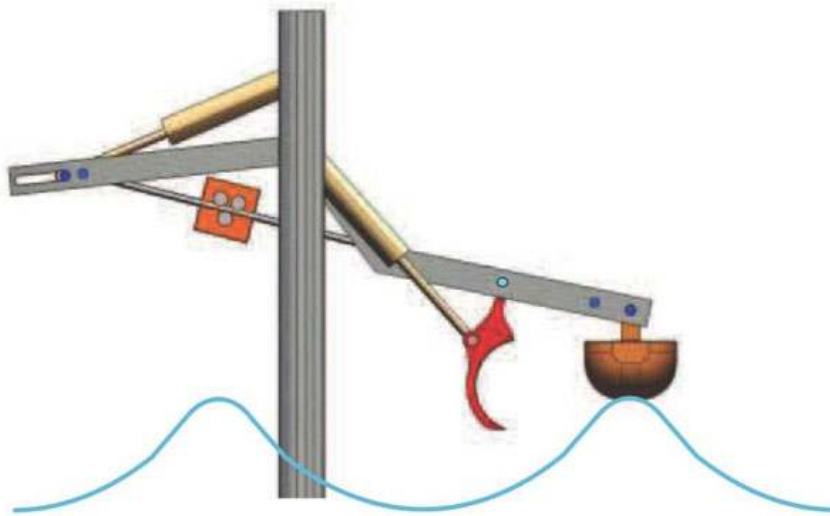


Fig. 1.8: Rappresentazione del sistema EDS di Tecnomac

L'idea innovativa alla base del sistema EDS è di accoppiare due point absorber, (ovvero dispositivi di dimensioni piccole rispetto alla lunghezza dell'onda incidente Cap. 2.2) con movimento heave e surge, i quali permettano di sfruttare le due componenti di spinta dell'onda verticale e orizzontale (Fig. 1.8). Questi due

dispositivi sono: un galleggiante, per assorbire la spinta verticale, e una pala, a tergo del galleggiante, in grado di assorbire la spinta orizzontale. Galleggiante e pala sono allineati lungo la direzione di propagazione del moto ondoso.

Con l'EDS, Tecnomac vuole creare un sistema in grado di massimizzare la potenza assorbita, mantenendo una macchina di costruzione semplice e costi relativamente bassi..

Un vantaggio di questo sistema risiede nell'impiego sottocosta, precisamente nella zona dei frangenti, che permette, in teoria, di ridurre i costi di costruzione e manutenzione dell'impianto.

La spinta verticale, con cui l'onda sollecita il point absorber, è proporzionale al flusso di energia associato all'onda, che diminuisce passando da acque profonde ad acque basse; tuttavia la diminuzione di potenza delle onde dovuta all'interazione con il fondale è contenuta: nella propagazione sottocosta fino a una profondità di 8 metri, stati di mare caratterizzati da onde medie con altezza inferiore a 4 metri, sono soggetti a riduzioni di potenza dell'ordine del 10%, rendendo così plausibile la collocazione di un sistema sottocosta [5].

Un'ulteriore novità introdotta da Tecnomac S.r.l., riguarda l'impiego di un cilindro oleodinamico moltiplicatore di pressione, brevettato appositamente per il sistema EDS, all'interno del meccanismo PTO. Nei comuni sistemi PTO per ottenere pressioni in grado di movimentare un motore idraulico si ricorre a cilindri a sezione ridotta, caratterizzati da scarsa solidità strutturale. Il moltiplicatore di pressione permette di ovviare a questo problema, assicurando la generazione di pressioni sufficienti, senza ridurre le dimensioni del cilindro oleodinamico.

Il sistema è stato pensato per lavorare in modo che l'onda raggiunga il galleggiante e lo sollevi, determinando l'inizio della fase attiva del movimento verticale; in tale fase il movimento del galleggiante induce lo spostamento di una leva, che a sua volta aziona il cilindro oleodinamico. Al termine della fase attiva, il fluido in pressione non viene più inviato al motore idraulico, pertanto il generatore di corrente cessa di produrre energia elettrica. Dopo il passaggio dell'onda la leva, solidale al galleggiante, scende seguendo l'andamento della stessa, durante questa parte del ciclo la pala assorbe la spinta orizzontale dell'onda, e la trasmette al cilindro oleodinamico che pompa fluido al motore. Calibrando opportunamente la sezione di tale cilindro è possibile pompare il fluido nel circuito alla stessa pressione indotta dal

cilindro del galleggiante. Il ciclo di funzionamento ipotizzato per un sistema EDS è riportato in Fig. 1.9.

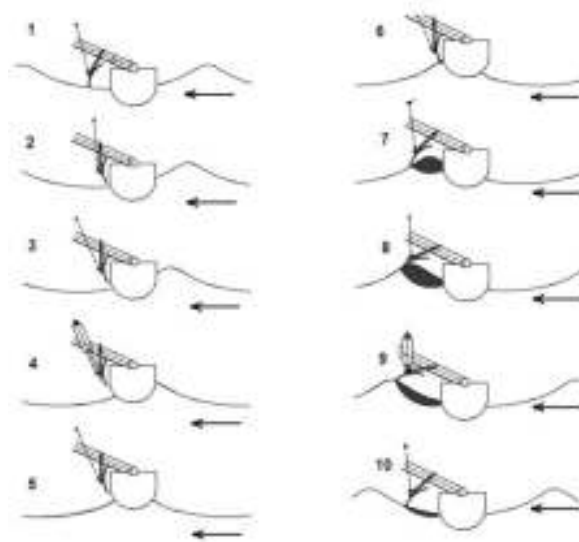


Fig. 1.9: Ciclo di funzionamento teorico del sistema EDS

Il sistema EDS inoltre potrà essere installato sia come singolo modulo sia inserendo diversi moduli su una sola struttura per aumentare le capacità di assorbimento di un impianto. Per le caratteristiche del sistema, come già ricordato l'impianto dovrà essere strutturato in modo da essere perpendicolare alla direzione dominante del moto ondoso (Fig. 1.10), prestando attenzione che la struttura di sostegno non influisca sulle prestazioni del sistema.

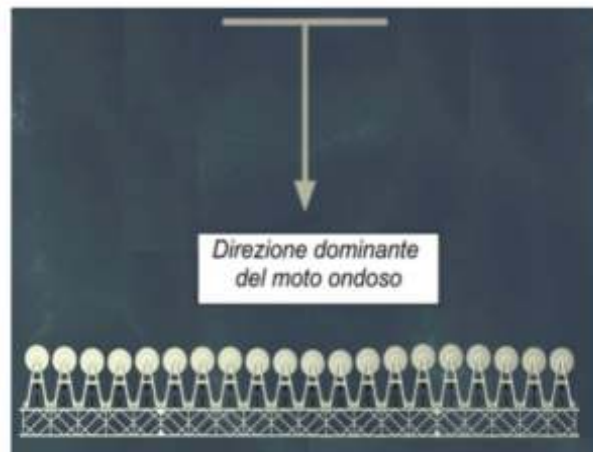


Fig. 1.10: Orientamento di un impianto EDS composto da più moduli

1.2. Sistemi confrontabili con EDS

Come visto nel precedente paragrafo, il sistema EDS è composto da due dispositivi accoppiati, galleggiante (heave) e pala (surge).

I sistemi in heave, del tipo del galleggiante dell'EDS, sono stati ampiamente studiati [7]. Un esempio di sistema che sfrutta un assetto con galleggianti che presenta analogie con il sistema EDS è il sistema brevettato dalla danese Wave Star Energy (Fig. 1.11).

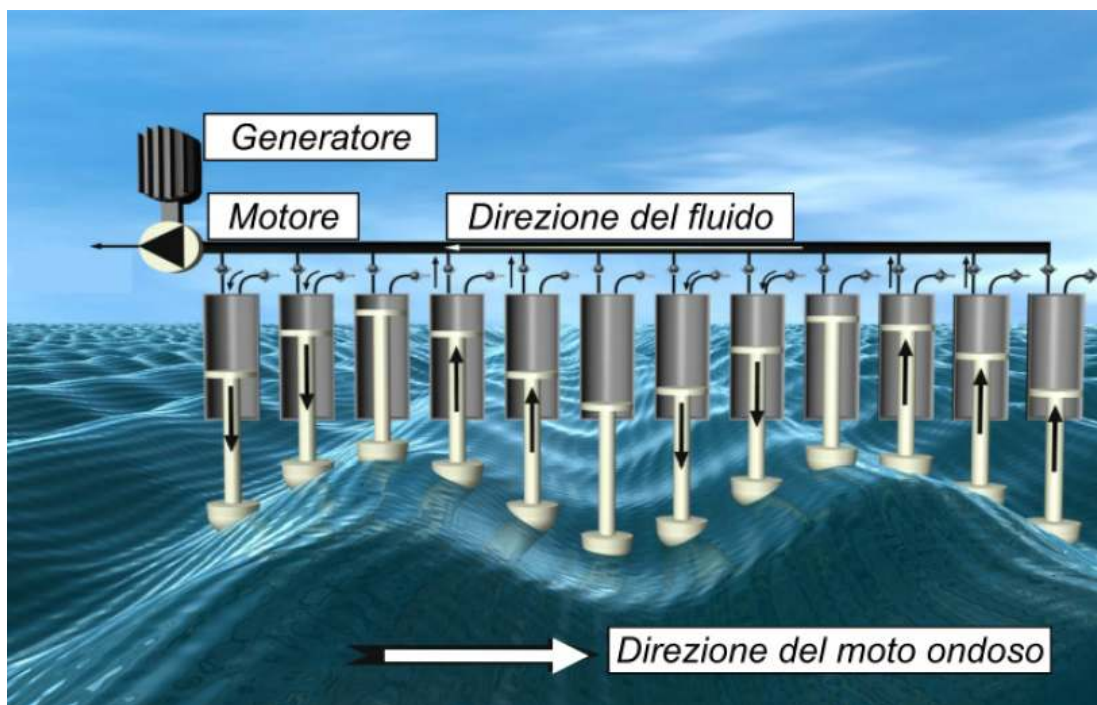


Fig. 1.11: Schema Del Sistema Wave Star Energy

Il sistema Wave Star è composto da una piattaforma ancorata al fondale, avente sui lati principali 20 leve incernierate, ciascuna delle quali reca all'estremità un galleggiante semisferico; ogni leva agisce su un pistone idraulico che, per effetto del moto indotto dall'onda sul galleggiante, sviluppa pressioni fino a 200 bar sul fluido nel circuito, il quale aziona un motore oleodinamico collegato a una generatore di corrente elettrica.

Wave Energy ConverterWave Energy Converter

Il sistema brevettato dalla Wave Star Energy ha i suoi punti di forza nella semplicità meccanica dell'impianto, inoltre è prevista la possibilità di sollevare l'intero impianto, a partire dalla piattaforma centrale (Fig. 1.12), tramite le pile ancorate al fondo, in caso di condizioni di mare estreme.



Fig. 1.12: Modello Wave Star Energy Scala 1:2 (HAnstholm -MAR Del Nord)

Il PTO e le apparecchiature elettriche sono alloggiati sulla piattaforma, non soggetta al movimento imposto dal moto ondoso; infine la sua modularità permette un'estrema flessibilità del sistema per adattarsi agli spazi disponibili e massimizzare la produzione di energia.

A differenza del sistema EDS, i galleggianti del sistema Wave Star sono posizionati lungo la direzione di propagazione del moto ondoso (Fig. 1.13).

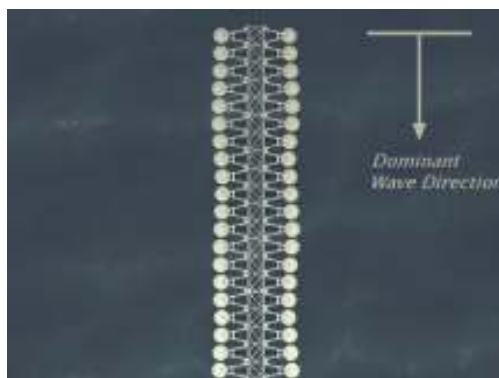


Fig. 1.13: Disposizione di un sistema modulare Wave Star rispetto alla direzione del moto ondoso

In fase sperimentale il sistema ha ottenuto rendimenti massimi tra il 30 e il 40%, nonostante non sia in risonanza con il moto ondoso (Cap. 2.2), proponendo questo brevetto tra le tecnologie più promettenti per l'estrazione di energia dal moto ondoso su larga scala. Tali rendimenti hanno permesso che si realizzasse un modello in scala 1:2 ad Hanstholm (Mare del Nord) operante dal Settembre 2009 e connesso alla rete elettrica dal Febbraio 2010. Il sistema è composto di 2 galleggianti del diametro di 5 m [8].

Per quanto riguarda il dispositivo surge, la pala, del sistema EDS si possono osservare similitudini con il caso trattato nell'articolo "Electric power generation by 'surfing' water waves"[9], nel quale viene esposta una ricerca realizzata dalla University of Western Ontario (Canda), su un prototipo, detto SWEC (Surfing Wave Energy Converter), che prevede un sistema in grado di assorbire energia dall'onda incidente, tramite una o più pale.

Il sistema è stato studiato solamente a scala di laboratorio; il modello utilizzato per lo studio è dotato di una pala singola, supportata da rulli in grado di scorrere su binari, lunghi 3.1 metri, in direzione parallela alla propagazione dell'onda. La pala e i rulli sono connessi, mediante una catena, alla macchina elettrica (Fig. 1.14).

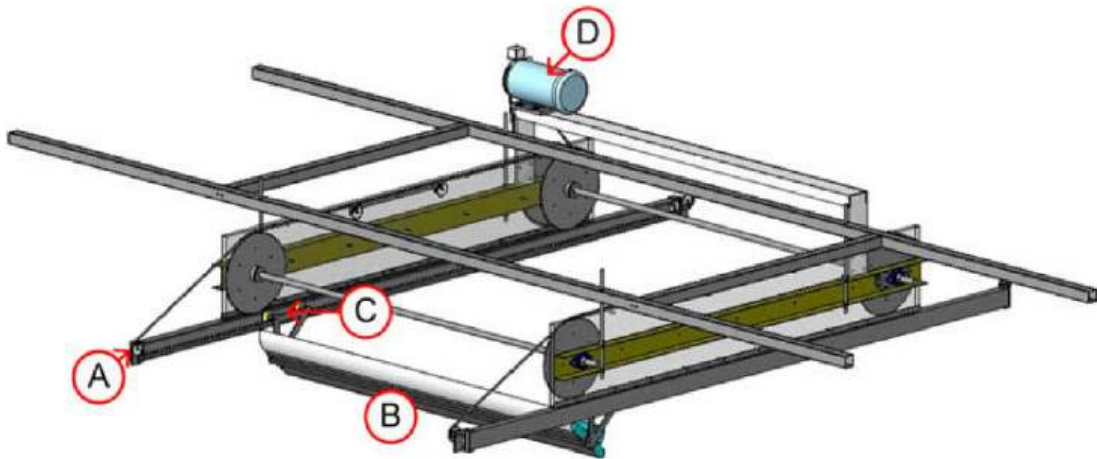


Fig. 1.14: Modello del sistema SWEC

La pala è composta di schiuma espansa rigida rivestita da una lamina in acciaio inox, montata su una struttura in alluminio; sulla sommità della pala è stata collocata una protezione metallica per prevenire il sormonto del dispositivo da parte dell'onda incidente. La sezione inferiore presenta una protuberanza, in poliuretano, la cui funzione consiste nell'evitare il ristagno dell'acqua sulla superficie a valle della pala.

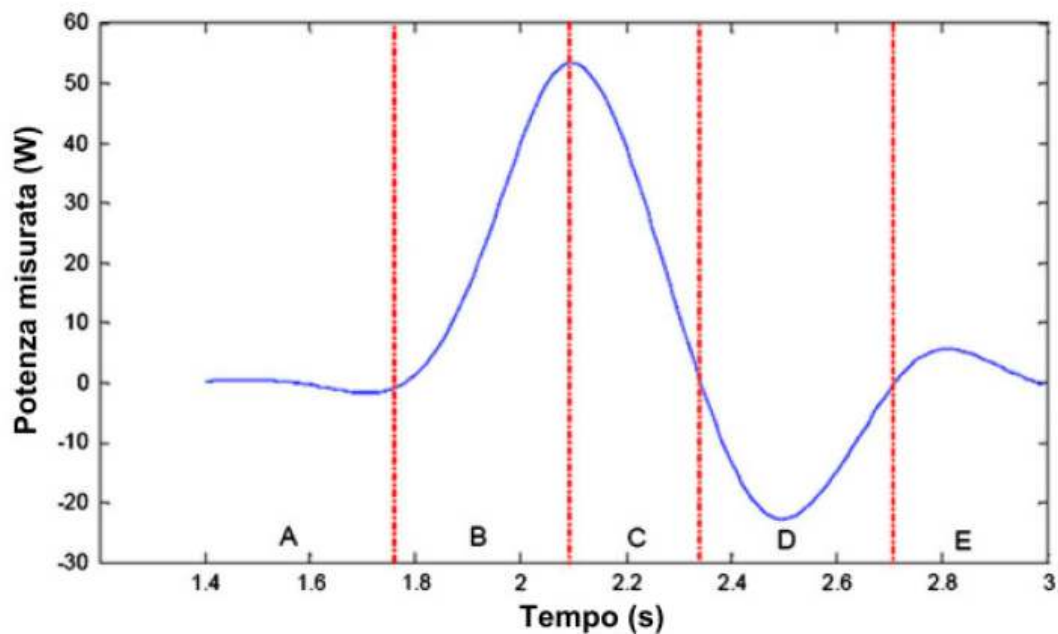


Fig. 1.15: Risultati Sperimentali SWEC

Con riferimento alla Fig. 1.15 si possono evidenziare le seguenti fasi nella generazione di potenza con questo modello:

- a. Pala a riposo;
- b. Fase di accelerazione dovuta all'impatto con l'onda e conseguente generazione di potenza;
- c. Inizio affondamento della pala all'interno dell'onda e netto calo della potenza assorbita a causa del peso dell'acqua che agisce sulla pala immersa, e della forza necessaria alla pala per movimentare la parte di fluido a tergo della pala stessa
- d. Pala completamente immersa nell'onda e sottoposta a forze in direzione opposta alla direzione di propagazione dell'onda, che impediscono il movimento solidale della pala con l'onda
- e. Esaurimento del passaggio dell'onda, il contatto pala-fluido in movimento è limitato a una piccola porzione della pala.

È stato ottenuto un rapporto rendimento massimo del 14%, ed un rendimento medio inferiore al 10%; i risultati ottenuti con questo modello presentano l'impossibilità di mantenere la pala immersa nel fronte d'onda, in quanto la pala accelera nell'impatto con l'onda, ma viene sottoposta a una rapida decelerazione nel passaggio attraverso

la cresta; si riscontra in questa fase una diminuzione della potenza media assorbita. Sarebbe necessario che la pala raggiungesse la velocità di propagazione del moto ondoso, vincendo le azioni frenanti dovute ad attriti e carico inerziale del sistema e forza di drag, in modo da non affondare all'interno del fronte d'onda ma rimanervi solidale.

Il sistema EDS, pur avendo diverse analogie con i sistemi descritti, si presenta come un modo innovativo di guardare al problema dell'estrazione di energia dal moto del mare, prendendo in esame la possibilità di sfruttare diverse componenti del moto dell'onda. Il sistema Wave Star può essere preso anche come metro di paragone per giudicare i risultati ottenuti con il sistema EDS, essendo un sistema già in avanzata fase di studio.

Capitolo 2

PRINCIPI DI TEORIA

Nel seguente capitolo vengono brevemente richiamati i principi di teoria basilari per lo sviluppo del presente studio. Per una trattazione più estesa si rimanda al lavoro di tesi che precede il presente: “Wave Energy Converter “EDS” Progettazione e messa in opera del modello fisico” (Fioletti e Cometti [6]).

2.1. Teoria Lineare Del Moto Ondoso

Le onde marine sono particolare tipo di onda fisica nelle quali è messa in moto una superficie d'acqua di mare, tipicamente dall'azione dei venti; esistono poi casi più particolari legati a eventi straordinari quali eruzioni sottomarine o terremoti.

L'onda marina si forma perché il vento spinge lo strato d'acqua superficiale, cedendo parte della sua energia cinetica, e imprimendogli dunque una velocità. Un'onda marina può arrivare a percorrere migliaia di chilometri, se sostenuta da venti in direzione prevalente uguale a quella di propagazione dell'onda stessa.

A volte il mare appare mosso da onde superficiali anche in assenza di vento: questo semplicemente accade perché il moto ondoso osservato è un moto residuo, prodotto in altre zone dall'azione dei venti che successivamente si propagano oltre la zona di generazione.

2.1.1. *Onde Lineari*

Con riferimento al tempo si possono distinguere due tipologie di fenomeni ondosi:

- A breve termine, associate a una scala di riferimento di minuti o secondi;
- A lungo termine, misurate in termini di giorni, mesi, anni;

L'approssimazione più usata per trattare problemi riguardanti le onde marine a breve termine, che sono quelle di interesse per questo lavoro di tesi, fa riferimento alla teoria lineare, o teoria di Airy, e permette di ricavare tramite formule semplificate alcuni parametri dell'onda, per onde di piccola ampiezza.

Si immagini di avere un'onda piana armonica che si propaga in direzione x (Fig. 2.1), in un fluido di densità ρ . Si pone un sistema di riferimento con l'origine posizionata sulla superficie indisturbata del fluido, che si assume essere piana. La teoria di Airy si basa sulle seguenti ipotesi:

- L'ampiezza di oscillazione della superficie disturbata è molto piccola se confrontata con la profondità del fondale h , e la lunghezza d'onda L
- Avendo indicato con u la velocità orizzontale della particella d'acqua e con w la velocità verticale, la quantità $(u^2 + w^2)/2g$ sia piccola rispetto alla pressione idrostatica $\rho g z$,
- La profondità h sia uniforme, con fondale liscio e impermeabile
- Il fluido sia non viscoso, omogeneo e incomprimibile
- Sia trascurabile l'effetto delle forze di Coriolis, e la tensione superficiale
- La pressione atmosferica sia uniforme sul livello del mare

Le particelle d'acqua, al di sotto della superficie libera, si muovono con traiettorie circolari, con raggio decrescente al crescere della profondità.

I parametri principali che caratterizzano le onde marine sono altezza d'onda H , periodo T e lunghezza d'onda L . L'equazione del pelo libero η di un'onda progressiva vale [10]:

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t)$$

Dove $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ è il numero d'onda e $\omega = \frac{T}{2\pi}$ è la pulsazione dell'onda

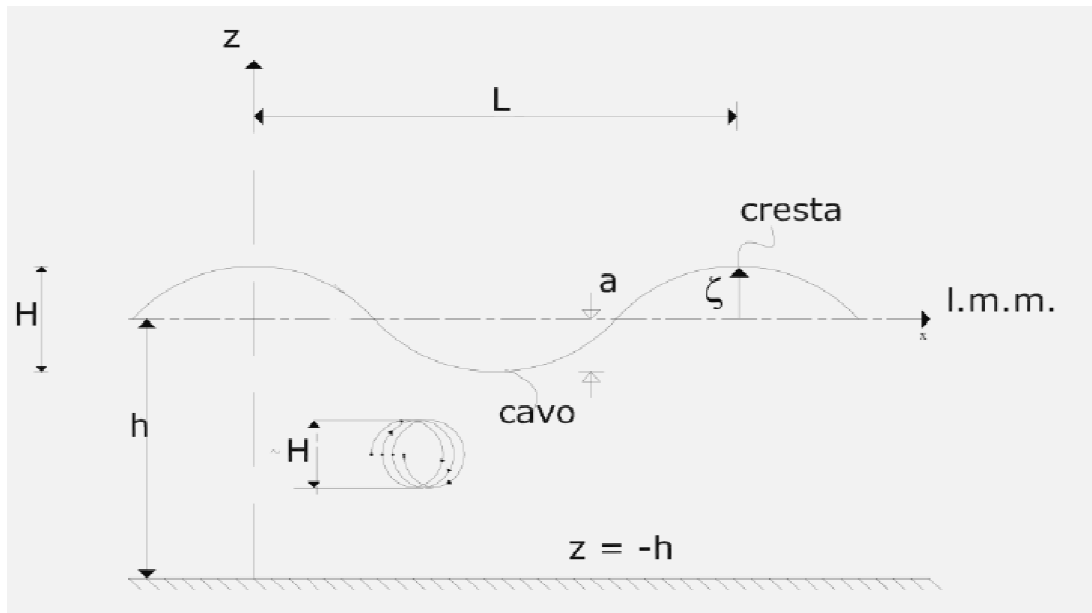


Fig. 2.1: Schematizzazione di un'OndaProgressiva

Per un'onda progressiva che si propaga su un fondale di profondità h , vale la seguente formula (relazione di dispersione):

$$\omega^2 = gk \tanh(kh)$$

Da questa relazione è possibile ricavare la lunghezza d'onda conoscendo il periodo dell'onda e la profondità. La celerità dell'onda, cioè la velocità con cui l'onda si propaga, è data da:

$$C = \frac{L}{T}$$

L'energia di un onda è composta da energia potenziale (data dalla posizione delle particelle di acqua) ed energia cinetica (data dalla velocità delle particelle di acqua) ed è pari a:

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2$$

E rappresenta un'energia per metro quadro di superficie, $[J/m^2]$.

La velocità con cui viene trasportata l'energia è in genere differente dalla celerità di propagazione, ed è pari alla celerità di gruppo, ovvero la celerità con cui si muove l'involuppo dell'onda:

$$C_g = nC$$

Dove n è pari a:

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right)$$

Da cui si vede come la celerità di gruppo vari al variare della profondità dell'acqua.

La potenza dell'onda (per metro di cresta), o flusso di energia, è calcolabile come

$$P = EC_g = \frac{1}{8} \rho g H^2 C_g [W/m]$$

Il flusso di energia trasportato dal moto ondoso in acque profonde può essere di notevole entità; la potenza di un'onda è proporzionale al quadrato della sua ampiezza e al periodo di movimento.

Avvicinandosi alla costa l'intensità di energia media posseduta dall'onda diminuisce a causa dell'interazione con il fondale marino, tuttavia fenomeni quali la rifrazione e la riflessione possono indurre lungo la costa zone ad alta densità energetica (hot spots).

2.1.2. *Sviluppo Sottocosta e Tipi Di Frangimento*

Si è detto come la celerità di gruppo varia al variare della profondità d'acqua, detta batimetrica una linea che identifica tutti i punti a pari profondità, si immagini di avere un fondale, a profondità variabile, caratterizzato da batimetriche tutte parallele tra loro e da un attacco ondoso perpendicolare ad esse.

Questo tipo di fondale è schematizzabile come una serie di tratti a profondità costante.

Principi di Teoria

Prendendo in esame due tratti adiacenti si può scrivere un'equazione di conservazione dell'energia [11]:

$$E_1 C_{g1} = E_2 C_{g2}$$

Si può facilmente ricavare l'altezza d'onda nei due tratti, indicando inoltre con il pedice 0, le caratteristiche dell'onda a profondità illimitata (in mare aperto) in modo che sia verificata nella relazione di dispersione:

$$\tanh kh_0 \approx 1$$

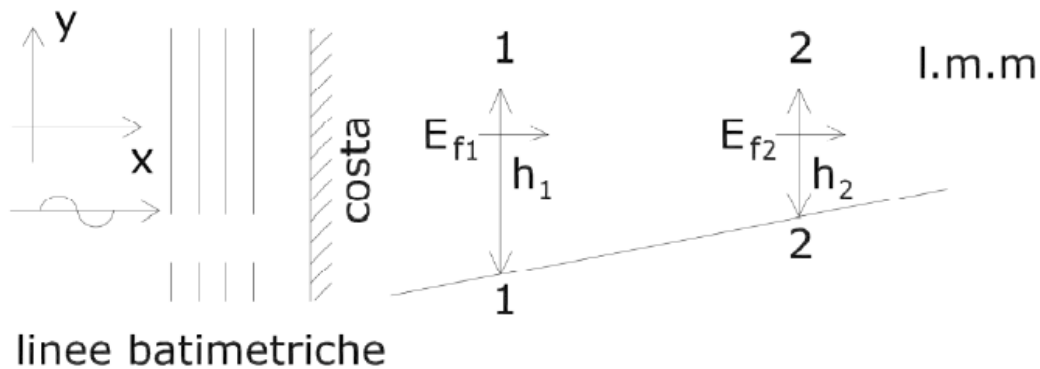


Fig. 2.2: Schema di moto Ondoso Ortogonale a Una Batimetria Parallela

Utilizzando il bilancio del flusso di energia tra una regione a profondità h_0 e una a generica profondità h , si ottiene:

$$\frac{H}{H_0} = K_s = \sqrt{\frac{C_0}{2C} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right)^{-\frac{1}{2}}}$$

Dove K_s prende il nome di coefficiente di shoaling, e per la teoria lineare è funzione della sola h . Si possono ottenere valori del parametro K_s anche per teorie non lineari di sviluppo dell'onda, ma si tratta di soluzioni complesse di cui esistono risoluzioni di letteratura in forma tabulare.

Il frangimento sulle spiagge naturali può avvenire in forme diverse, in relazione alle caratteristiche del fondale e del moto ondoso incidente. Nonostante le comprensibili difficoltà di classificazione, le forme di frangimento che tipicamente si presentano su

spiagge naturali sono suddivisibili in quattro categorie, denominate spilling, plunging, surfing e collapsing [12].

Il frangimento di tipo spilling si osserva in presenza di onde di ripidità relativamente elevata che si propagano su un fondale a dolce pendenza.

Si può osservare che la rottura del profilo avviene sulla cresta dell'onda, creando una superficie irregolare mista, aria-acqua (surface roller), che cresce fino ad occupare l'intero volume idrico compreso tra cavo e cresta. Il frangente mantiene all'incirca una forma simmetrica e il profilo si comporta come un'onda solitaria, fintanto che il surface roller è piccolo rispetto al corpo dell'onda (fasi 1-3 in Fig. 2.3).

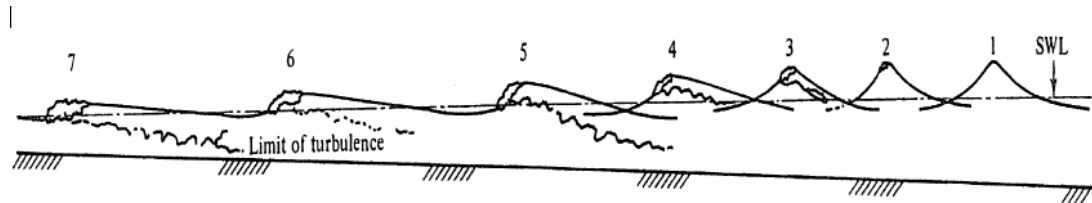


Fig. 2.3: Frangimento Di Tipo Spilling

Lo sviluppo di un frangimento di tipo plunging presenta caratteristiche simili al frangimento di tipo spilling nelle prime fasi di sviluppo (Fig. 2.4).

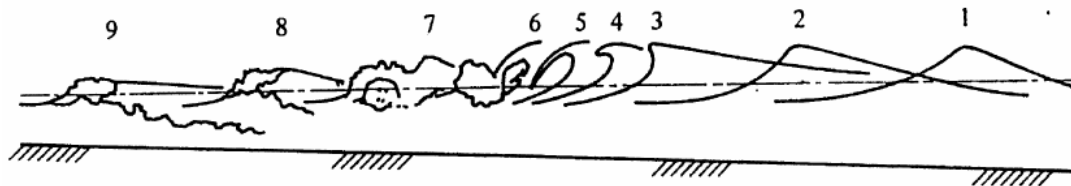


Fig. 2.4: Frangimento Di Tipo Plunging

Lo sviluppo avviene a ripidità piuttosto elevata, la cresta viaggia a una velocità maggiore della celerità dell'onda, rovesciandosi in avanti e andando a impattare la superficie idrica del cavo (plunge point). A causa di questo meccanismo, una sacca d'aria resta intrappolata all'interno del profilo ondosso, e si genera, successivamente all'impatto, un getto (splash) dipendente dall'altezza della cresta. Successivamente la forma d'onda si sviluppa con caratteristiche simili a quelle di un risalto idraulico, riconoscibile per un fronte areato piuttosto esteso simile al surface roller del frangimento di tipo spilling.

Basco [14] ha evidenziato come le tipologie di frangimento per spilling e per plunging siano governate da meccanismi analoghi e riconducibili alla formazione di due vortici, il surface roller nel caso di spilling sulla superficie dell'onda, e un vortice localizzato al di sotto della cresta, denominato dall'autore plunger vortex. La differenza risiede nella scala dei due vortici.

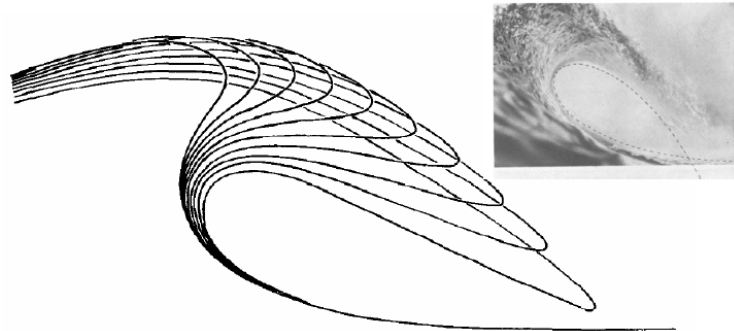


Fig. 2.5: Evoluzione della cresta dell'onda in un frangimento di tipo plunging [13]

In Fig. 2.5 si riporta l'evoluzione del frangimento di tipo plunging nello schema proposto da Basco.

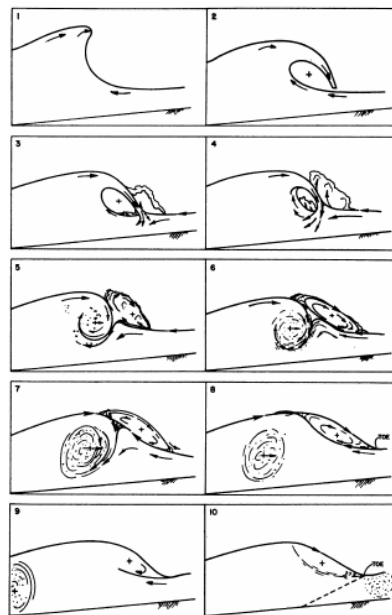


Fig. 2.6: Evoluzione Del Frangimento di Tipo Plunging

La differenza sostanziale tra i due tipi di frangimento risiede nella dimensione dei vortici, nel caso di spilling il surface roller è predominante, nel caso di plunging abbiamo che nelle prime fasi plunger vortex e surface roller sono di dimensioni confrontabili.

Il frangimento di tipo surging (Fig. 2.7) si può osservare generalmente su fondali a pendenza elevata. La caratteristica principale di questo meccanismo di frangimento è legata alla conservazione della cresta dell'onda, mentre la parte più depressa del profilo, nella quale si evidenzia una modesta zona areata, risale rapidamente lungo la spiaggia.



Fig. 2.7: Frangimento di tipo Surging

In modo analogo il frangimento per tipo collapsing (Fig. 2.8) avviene su spiagge a pendenza elevata, e la cresta si mantiene intatta, la parte più depressa del profilo invece si presenta con elevata ripidità e si piega su sé stessa originando una estesa turbolenza superficiale.

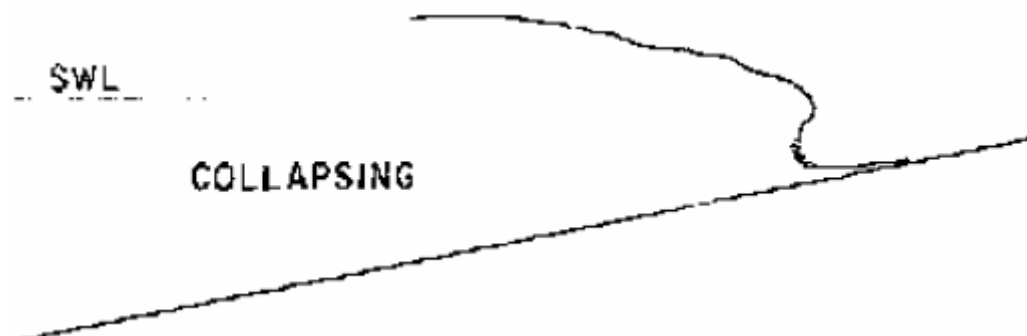


Fig. 2.8: Frangimento di tipo Collapsing

Di fatto nel frangimento di tipo surging si ha un profilo ondulato con un fronte, nella parte inferiore, sub-verticale, che si propaga fino alla linea di costa senza subire una rottura evidente, mentre nel tipo collapsing il tratto inferiore del profilo si ripiega su sé stesso, provocando una caduta dell'onda stessa, con un andamento simile al

frangimento plunging, dal quale si differenzia per la posizione rispetto alla cresta. I frangimenti surging e collapsing sono caratterizzati dal fatto che non avviene una rottura della cresta, ma si origina una perturbazione in corrispondenza del cavo.

2.2. Teoria Dei Point Absorber

Come già introdotto nel Cap. 1.1, il sistema EDS è un sistema che sfrutta dei point absorber: un point absorber è un utilizzatore dell'energia marina che ha una dimensione piccola rispetto alla lunghezza d'onda delle onde incidenti. Esso è in grado, almeno teoricamente, di estrarre una quantità di energia anche superiore a quella presente nel fronte d'onda che lo investe direttamente (cioè pari all'estensione del dispositivo nella direzione perpendicolare a quella di propagazione dell'onda). I point absorber si suddividono in prima istanza secondo il loro movimento, e la maggior parte di essi rientra nelle due seguenti categorie:

- heave: oscillanti verticalmente
- surge: oscillanti orizzontalmente (in questo insieme vengono spesso fatti rientrare anche dispositivi pitch-surge, cioè rotanti intorno ad una cerniera posta sotto o sopra la superficie del mare)

Un fondamentale parametro per indicare la capacità energetica di un point absorber è la "larghezza di cattura" CW (capture width), definito come:

$$CW = \frac{P_{abs}}{P_{av}}$$

Dove P_{abs} [W] è la potenza assorbita dal point absorber, e P_{av} [W/m] è la potenza per unità di lunghezza di cresta d'onda.

L'unità di misura di questo parametro è la lunghezza e indica la larghezza di fronte d'onda equivalente sfruttata dal point absorber.

Il rendimento di un point absorber (o CWR, relative capture width) è definito come il rapporto tra la potenza assorbita dal point absorber P_{abs} e la potenza disponibile nel fronte d'onda che lo investe (che ne ha la stessa dimensione D).

$$CWR = \frac{P_{abs}}{P_{av} \cdot D} = \frac{CW}{D}$$

dove P_{av} [W/m] è la potenza d'onda per metro di cresta.

Per un corpo oscillante in heave, il CW massimo teorico è $L/2\pi$, il che indica che il rendimento CWR può essere anche maggiore di 1.

Si può ricavare anche il CW massimo teorico per un corpo oscillante in surge, pari a L/π .

Per poter sfruttare energeticamente il movimento di un point absorber, è necessario un dispositivo che trasformi parte dell'energia posseduta dal point absorber in energia meccanica più pregiata, ed infine in energia elettrica. Questo dispositivo si chiama PTO (Power Take-Off); esso condiziona il movimento ed il rendimento stesso del point absorber.

Su di un point absorber agiscono diverse forze, cioè:

- Forza eccitante: impressa dall'onda incidente;
- Forza radiativa: associata alle onde circolari simmetriche irraggiate dalle oscillazioni del dispositivo;
- Forza idrostatica: connessa alla posizione istantanea del corpo oscillante rispetto alla superficie libera indisturbata del fluido.
- Forza esterna: generata dal PTO
- Inerzia del point absorber

Un corpo, di massa m , messo in moto da un attacco ondosso e vincolato a muoversi in verticale è un heave-point absorber e la sua equazione del moto è la seguente (moto armonico forzato smorzato[4]):

$$(m + m_A) \cdot \ddot{z} = f - B \cdot \dot{z} - \rho g S \cdot z + f_{PTO}$$

con:

Principi di Teoria

- $f(t)$: componente verticale della forzante del moto ondoso;
- $f_{PTO}(t)$: forza verticale generata dal PTO;
- $m_A(\omega)$: massa aggiunta; considera l'inerzia della massa di fluido movimentata dal corpo immerso;
- $B(\omega)$: coefficiente di smorzamento radiale; tiene conto dell'effetto di smorzamento sul movimento del galleggiante, causato dal trasferimento di energia legato all'irraggiamento di onde;
- ω : pulsazione dell'onda incidente;
- S : sezione del point absorber in corrispondenza del pelo libero del fluido in quiete;
- $-\rho g S z$: forza idrostatica di ripristino.

Si assume che la forza f_{PTO} abbia la forma:

$$f_{PTO} = -C \cdot \dot{z} - K \cdot z$$

ove $C \cdot \dot{z}$ rappresenta l'effetto di uno smorzatore lineare con coefficiente C , mentre $K \cdot z$ simula la presenza di una molla lineare di rigidità K . Si può notare come il sistema così scritto sia lineare.

Sostituendo nell'equazione del moto $z = Z e^{i\omega t}$, ovvero soluzione in notazione complessa, si ottiene:

$$Z = \frac{F}{-\omega^2 (m + m_A) + i\omega (B + C) + \rho g S + K}$$

Per la linearità del sistema, l'excitation force, F , è proporzionale all'ampiezza d'onda.

La potenza media assorbita in un ciclo di oscillazione è pari a:

$$P = \frac{1}{8B} |F|^2 - \frac{B}{2} \left| U - \frac{F}{2B} \right|^2$$

Dove $U = i\omega Z$ è l'ampiezza complessa della velocità.

Il massimo della potenza assorbita è pari a $\bar{P}_{max} = \frac{I}{8B} |F_d|^2$, ed è ottenuto per:

$$U = \frac{F}{2B}$$

Per una data geometria del point absorber, e note le caratteristiche dell'onda regolare incidente, B ed F sono grandezze note, di conseguenza la potenza assorbita dipende da Z, e dunque dai coefficienti che caratterizzano il PTO. Pertanto quest'ultimo introduce una serie di limitazioni alle possibilità di massimizzare l'energia estratta.

Le condizioni ottimali per l'assorbimento della potenza sono perciò:

$$\varpi = \sqrt{\frac{\rho g S + K}{m + m_A(\varpi)}}$$

$$C = B(\varpi)$$

Da cui si può dedurre che, per un assorbimento ottimale di energia, la frequenza naturale del point absorber deve essere uguale a quella delle onde, ed il coefficiente di smorzamento del PTO deve essere uguale a quello idrodinamico.

Il meccanismo per produrre energia dal moto ondoso necessita di una catena di processi per la trasformazione dell'energia meccanica, ciascuno dei quali influenzerà l'efficienza del sistema completo oltre ad introdurre problematiche specifiche legate ai sistemi attuatori delle trasformazioni.

Si è visto dalla teoria esposta fin qui, come, per ottenere il massimo di energia, sia necessario porre il sistema in risonanza con l'onda incidente, ma nella pratica questo non è possibile per la maggior parte dei dispositivi assorbenti, che hanno dimensioni fisiche contenute (inferiori a 10 m), poiché questi presentano frequenze di oscillazione naturale generalmente più elevate rispetto alle frequenze caratteristiche delle onde marittime; inoltre le onde marittime non sono monocromatiche, ma si presentano come la sovrapposizione di un infinito numero di onde sinusoidali, ciascuna caratterizzata da una propria frequenza, altezza e direzione.

Per far fronte a questo problema, sono state sviluppate tecniche per il controllo della fase tra onda e dispositivo, dette phase control.

Una prima tecnica, detta tuning [4], propone di accoppiare una o più masse supplementari al dispositivo in heave; di fatto queste masse aumentano l'inerzia del sistema fisico comportandosi come un volano meccanicamente accoppiato al dispositivo stesso. Si tratta di una soluzione con risvolti più teorici che realmente applicabili, in quanto sarebbe necessario di variare l'inerzia, e quindi la posizione delle masse supplementari, del sistema per ogni onda incidente, il che implicherebbe la presenza un sistema di misura delle onde posto a monte del point absorber, di un centro di calcolo che analizzi i dati raccolti e in base a questi ricalcoli la posizione delle masse supplementari, ed infine di un sistema di movimentazione delle masse, movimentazione che dovrebbe avvenire nell'intervallo tra un'onda incidente e la successiva per poter massimizzare l'energia catturata per ogni onda.

Una seconda tecnica ipotizzata per il controllo, detta latching [4], consiste nel bloccare il sistema in una posizione prefissata durante un intervallo del ciclo d'onda precedentemente determinato. I calcoli per determinare gli intervalli di "blocco" del dispositivo non sono però di semplice attuazione, e necessitano, anche in questo caso, della conoscenza preliminare dello stato di mare a monte del point absorber.

Una terza tecnica di controllo, che prende il nome di declutching (per esempio [15]), prevede l'utilizzo di una valvola di by-pass per poter svincolare il point absorber dal PTO; in questo modo si riduce, per un intervallo del ciclo d'onda, la resistenza al moto del point absorber.

Concludendo, è nota la condizione teorica per massimizzare il rendimento di un point absorber, tuttavia questa condizione è difficilmente attuabile. Lo studio e la realizzazione di sistemi di controllo per massimizzare il rendimento dei point absorber è una problematica tuttora aperta.

Capitolo 3

SET-UP SPERIMENTALE

Per lo studio del sistema EDS ci si è avvalsi di un modello fisico in scala. Un modello fisico è la riproduzione di un sistema fisico, tale che le grandezze fisiche del sistema reale sono riprodotte nel modello secondo una scala nota. Queste proporzioni sono dettate dal tipo di similitudine adottata, che viene scelta in base al tipo di problema. La teoria della similitudine [12] garantisce appunto che, sotto determinate condizioni, il modello in scala riprodotto in laboratorio sia simile al modello reale. Nei problemi di idrodinamica vi sono alcuni parametri adimensionali di rilevanza, tra cui:

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu}$$

Reynolds: dove μ è la viscosità dinamica. Esprime il rapporto tra gli sforzi turbolenti e quelli viscosi.

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}}$$

Froude: Esprime il rapporto tra la velocità del fluido e la velocità delle perturbazioni nel fluido.

$$We = \frac{\rho U^2 D}{\gamma}$$

Set Up Sperimentale

Weber: dove γ è la tensione superficiale. Esprime il rapporto tra le forze d'inerzia e la tensione superficiale.

In un modello in scala è impossibile rispettare tutti questi parametri (cioè far sì che abbiano lo stesso valore del prototipo reale), perciò è necessario individuare il numero adimensionale che più caratterizza il problema e impostarlo uguale nel modello in scala e nel prototipo reale. Va comunque verificato che l'effetto dei fenomeni rappresentati dagli altri numeri adimensionali sia fuori dal range di influenza per il problema in esame.

Nei problemi a superficie libera, il parametro più significativo è il numero di Froude, pertanto nel problema in esame è fondamentale mantenere l'invarianza di questo gruppo adimensionale; considerando che l'accelerazione g è uguale per modello e realtà, e che il fluido utilizzato è lo stesso, impostando la scala geometrica del modello s , ne derivano le proporzioni tra modello e realtà (Tab. 3-A: Fattori di scala tra macchina reale e modello).

Tab. 3-A: Fattori di scala tra macchina reale e modello

Grandezza fisica	Rapporto reale/modello
densità	1
accelerazione	1
lunghezza	s
velocità	\sqrt{s}
massa	s^3
tempo	\sqrt{s}
forza	s^3
potenza per metro di cresta	$s^{2.5}$
energia	s^4
smorzamento	$s^{2.5}$

3.1. Studio delle onde nel canale

Il sistema è stato testato in un canale di laboratorio, posto nel piano seminterrato del laboratorio di idraulica “G. Fantoli” del Politecnico di Milano.

Si tratta di un canale a pelo libero, posto all’altezza di circa un metro e mezzo dal terreno, lungo 30 metri per 1 metro di profondità e 1 metro di larghezza. Le pareti laterali sono in vetro. Il canale è stato chiuso all’estremità tramite un pannello di pvc sigillato ai bordi con stucco idraulico, in modo da utilizzare il canale come una vasca.

In fondo al canale è posizionato un piano inclinato che funge da spiaggia, composto di tre moduli di alluminio, della lunghezza di circa 4.5 m con una pendenza di 7° . Inizialmente, al di sopra della struttura di alluminio, era posato uno strato di plastica forata che fungeva da assorbitore passivo; successivamente questo è stato ricoperto con pannelli metallici in modo da poter ottenere il frangimento delle onde.

All’altra estremità del canale è posizionato il generatore di onde a pistone (Fig. 3.1), Il generatore a pistone è ideale per generare onde in acqua bassa, in quanto permette di ricreare traiettorie ellittiche delle particelle, che caratterizzano appunto questo tipo di onde. Onde in acqua alta presentano invece traiettorie circolari.

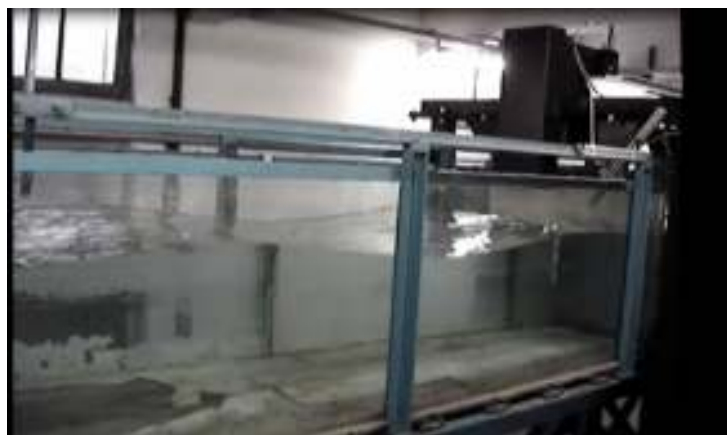


Fig. 3.1: Vista Del Canale e Del Generatore d'onda

Set Up Sperimentale

Le onde di progetto per testare il sistema EDS sono state in scelta in base alle statistiche delle onde italiane, rilevate dalla rete onda metrica nazionale [16]. In Fig. 3.2 sono riportate le statistiche delle rilevazioni di tutte le boe della rete onda metrica nazionale. In verde sono evidenziate le onde con più di 10 kW/m di potenza.

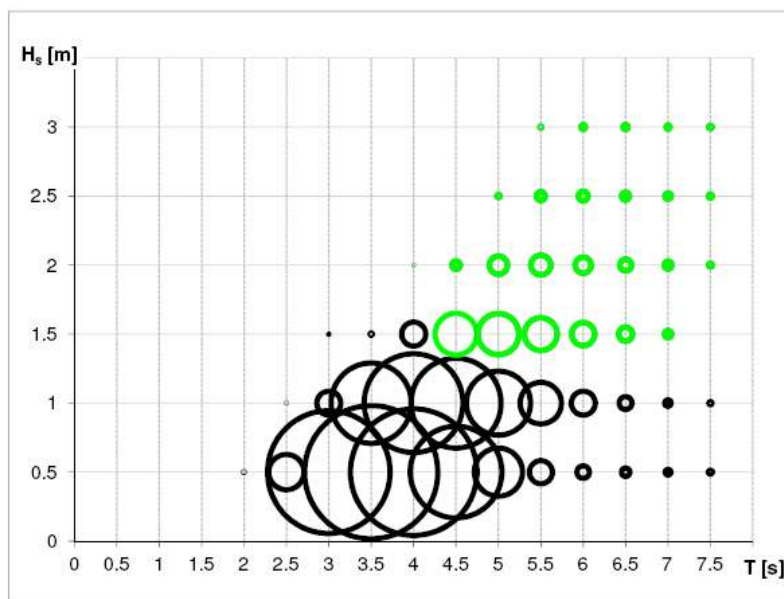


Fig. 3.2: Statistiche delle onde delle coste italiane[16]

Sono state scelte, come onde di progetto per testare il sistema, delle onde compatibili con la distribuzione H-T delle onde delle coste italiane, con periodo di 3-5 s, altezze comprese tra 0.5 m e 1.5 m, potenze comprese tra i 2 e i 8 kW/m, in scala reale.

Per la caratterizzazione delle onde di laboratorio sono state effettuate acquisizioni in cinque punti lungo il canale: tre punti nella zona a profondità costante (“al largo”), due punti sulla spiaggia; durante queste acquisizioni il modello del sistema EDS non era presente nel canale, in quanto il movimento del sistema produce molto disturbo sulla superficie libera.

Per misurare le onde prodotte dal generatore a pistone si sfruttano due sonde capacitive, o wave gauges, prodotte da Akamina Technologies Inc., denominate AWP-24. Ciascuna sonda è costituita da due fili verdi paralleli, separati e posti in tensione da un’asta di supporto (Fig. 3.3). L’AWP – 24 effettua misure di capacitance (capacità elettrica) impiegando tecniche digitali, fornendo misure estremamente accurate. La capacitance misurata è convertita in un segnale di

Set Up Sperimentale

tensione, che può essere misurato con un voltmetro; il voltaggio fornito in output è proporzionale al livello d'acqua. Una semplice procedura di calibrazione permette di determinare una relazione tra il livello idrico e i volt misurati.

In condizioni sperimentali ottimali sarebbe sufficiente una sola sonda per caratterizzare un'onda, ma, dato che possono esserci delle imperfezioni nell'apparato sperimentale (non perfetta condizione del canale, movimento del battitore imperfetto, dissipazione energetica nelle onde), è sempre meglio utilizzare almeno due sonde; si è verificato che lunghezza d'onda teorica, ricavata dalla relazione di dispersione, e lunghezza sperimentale danno risultati molto simili.



Fig. 3.3: Particolare di una sonda capacitiva utilizzata per la misura delle altezze d'onda

Le sonde sono state poste ad una distanza relativa Δx (lungo il canale) variabile, in funzione del loro posizionamento lungo il canale: 1 m nella zona del canale a profondità costante, 0.3 m e 0.2 m sulla spiaggia. Questa distanza influisce sulla precisione del calcolo della lunghezza d'onda. La celerità dell'onda sperimentale si ricava dal tempo Δt impiegato dalla cresta dell'onda a percorrere il tratto Δx tra le

due sonde $c = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ $c = \frac{l}{\Delta t}$.

Set Up Sperimentale

La lunghezza d'onda si ricava come $L = c * T$ (dove T è il periodo dell'onda, ricavato tramite analisi in frequenza del segnale delle sonde).

Più la distanza Δx tra le sonde è grande, maggiore è la precisione nel calcolo della celerità, a patto che quest'ultima si mantenga costante su questa distanza; d'altra parte, dove l'onda cambia forma velocemente, lungo la spiaggia, è necessario mantenere Δx piccola, per poter ricavare la variazione locale della lunghezza d'onda. La lunghezza d'onda così calcolata infatti, risulta essere una lunghezza d'onda "media" del tratto compreso tra le due wave gauges. In ogni caso, è necessario che la distanza tra le wave gauges non sia mai superiore alla lunghezza d'onda.

Le proprietà dell'onda al largo sono state ricavate mediando le grandezze rilevate nei tre punti a profondità costante del canale. La potenza dell'onda è stata calcolata secondo la teoria lineare (Vedi Cap.2.1) applicata alle rilevazioni effettuate al largo; sulla spiaggia, invece, l'onda cambia forma fino ad arrivare al frangimento e detta teoria non si può più considerare valida.

In Fig. 3.4: Altezza d'onda lungo il canale Fig. 3.4, Fig. 3.5, Fig. 3.6 sono riportate rispettivamente le altezze, le lunghezze e le ripidità d'onda lungo il canale; nelle figure è altresì rappresentata schematicamente la spiaggia (misure non in scala in direzione verticale).

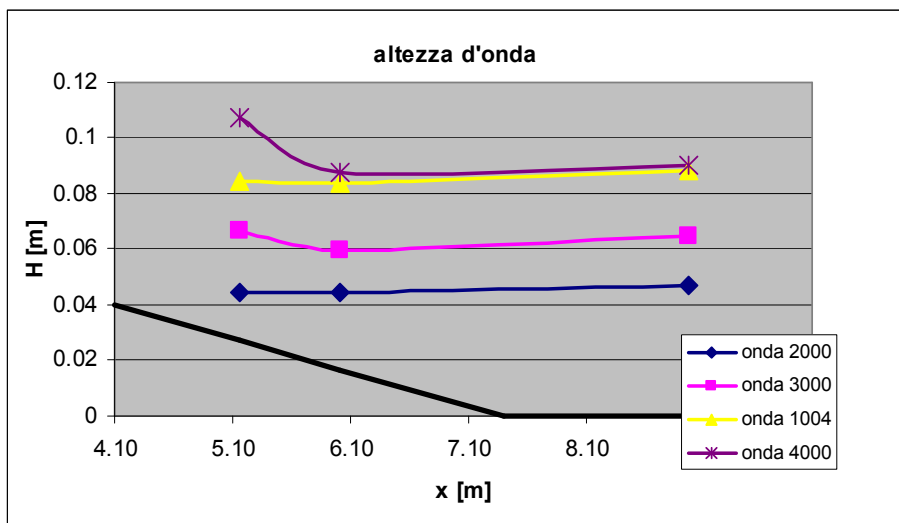


Fig. 3.4: Altezza d'onda lungo il canale

Set Up Sperimentale

Considerando alcuni riferimenti nella letteratura scientifica [5] e [17] e considerando che la lunghezza della spiaggia è pari a circa 1-2 lunghezze d'onda, si è ipotizzato che la dissipazione di energia delle onde prima del frangimento sia trascurabile. Come riportato in letteratura [10] la dissipazione di energia è piccola per spiagge ripide (e quindi corte).

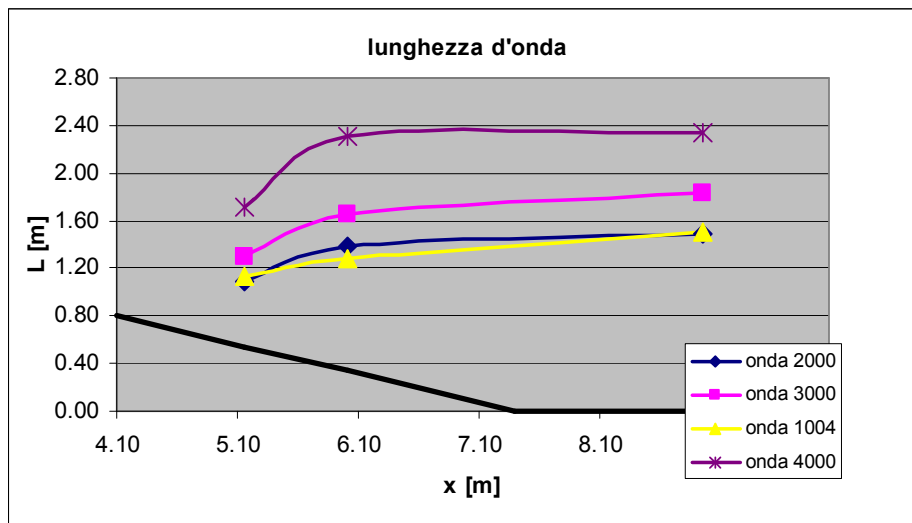


Fig. 3.5: Lunghezza d'onda lungo il canale

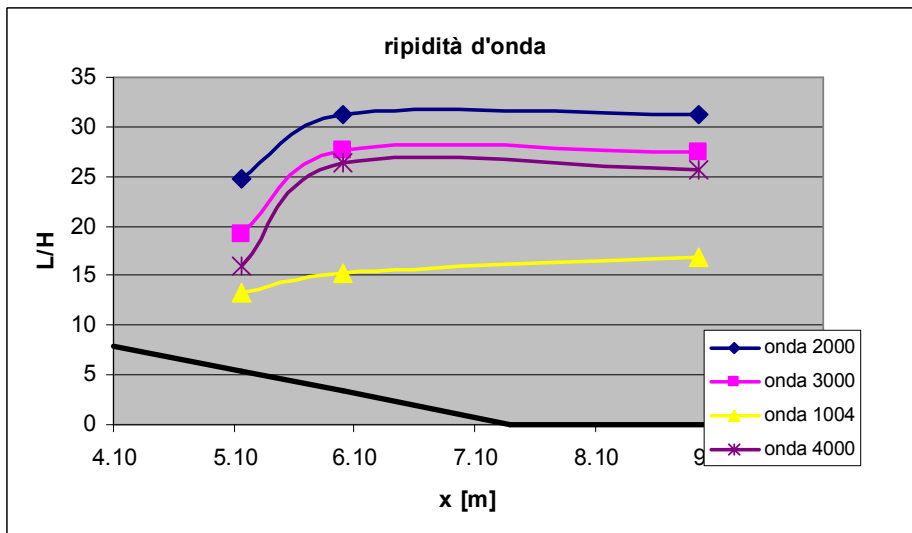


Fig. 3.6: Ripidità d'onda lungo il canale

In Tab. 3-B: Proprietà delle onde al largo sono riportati i dati relativi alle onde in centro canale, in scala di laboratorio e in scala reale. Per le onde a scala di

Set Up Sperimentale

laboratorio vengono riportati i valori misurati (L_{exp}) e teorici (L_{th}) della lunghezza d'onda.

Tab. 3-B: Proprietà delle onde al largo

	onda in scala						onda reale				
	h [m]	H [m]	T [s]	L_{exp} [m]	L_{th} [m]	P [W/m]	h [m]	H [m]	T [s]	L_{exp} [m]	P [kW/m]
onda 2000	0.4	0.047	1.02	1.487	1.512	2.51	6	0.7	3.95	22.31	2.19
onda 3000	0.4	0.065	1.197	1.826	1.898	5.73	6	0.97	4.63	27.39	4.99
onda 4000	0.4	0.09	1.406	2.589	2.487	12.88	6	1.35	5.44	35.04	11.22
onda 1004	0.4	0.088	1.02	1.509	1.512	9.09	6	1.32	3.95	22.63	7.92

Le modalità di frangimento di un onda dipendono dall'inclinazione della spiaggia, e dalla ripidità dell'onda. Battjes [14] calcola, in base a queste grandezze, un parametro, detto di "surf similarity", che fornisce le caratteristiche dell'onda al frangimento. In Tab. 3-C è riportato il parametro di Surf Similarity per le onde utilizzate in questo studio. Con riferimento alla **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, per i valori di ζ ricavati il frangimento è di tipo plunging (Cfr. paragrafo 2.1.2); questo tipo di frangimento assicura elevati carichi orizzontali. Il coefficiente di riflessione è piccolo, perciò è assicurato che la riflessione delle onde dalla spiaggia sia minima.

Tab. 3-C: Parametro di Surf Similarity per le onde prodotte nel nostro canale

Onda	Surf Similarity ζ_0
2000	0.696
3000	0.690
4000	0.689
1004	0.509

Tab. 3-D: Caratteristiche delle onde frangenti e parametro di Surf Similarity, secondo Battjes (1974). Preso da [18]

ζ	0.1	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
Type	spilling		plunging		collapsing/surging		no breaking
κ	0.8	1.0	1.1	1.2			
N	6-7	2-3	1-2	0-1	0-1		
r	10^{-3}	10^{-2}	0.1	0.4	0.8		

κ = breaking index¹, N = number of waves in surf zone, r = reflection from beach

3.2. Caratteristiche del modello EDS

Il modello che verrà descritto in questo paragrafo è una schematizzazione semplificata della macchina reale, poiché quando questo lavoro è iniziato non ne esisteva ancora un progetto in dettaglio.

Da una ricerca sui galleggianti point absorber in heave già esistenti si è osservato che essi hanno diametri dell'ordine di grandezza di qualche metro. Compatibilmente con la scala scelta e con le dimensioni del canale di laboratorio, avente larghezza pari a 1 m, si è deciso di far realizzare un galleggiante con diametro 20 cm (corrispondenti a 3 m in scala reale), in modo da contenere gli effetti delle pareti sul sistema.

Il sistema è composto da un'intelaiatura di profili di alluminio, poggiata direttamente sulle sponde del canale. Su questa intelaiatura sono imbullonati due profili verticali che fungono da sostegno per un perno cilindrico orizzontale; su questo perno è vincolato il modello (Fig. 3.7: Schema del modello EDS).

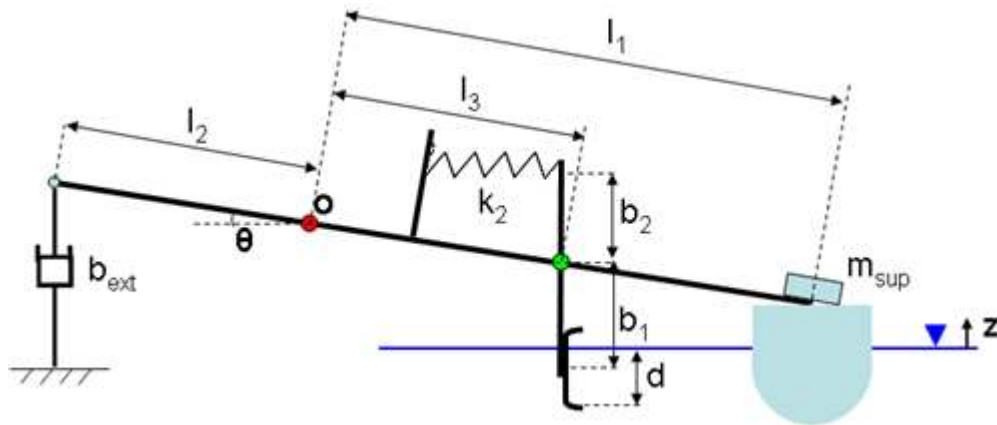


Fig. 3.7: Schema del modello EDS

- O cerniera
- z posizione del galleggiante rispetto ad una quota fissa
- m_{sup} massa supplementare
- b_{ext} smorzamento del sistema di trasferimento dell'energia

Set Up Sperimentale

Il modello del sistema è composto da un profilo in alluminio, connesso al perno tramite un cuscinetto, alla cui estremità è fissato un galleggiante, formato da una base emisferica ed un corpo cilindrico in plastica, il tutto è alto 21 cm. L'asta presenta delle scanalature, sfruttando le quali è possibile posizionare, tra cerniera e galleggiante, un secondo perno sul quale è stato montato un profilo di alluminio verticale in modo che sia libero di ruotare intorno al perno. Sul profilo verticale, all'estremità inferiore, è montata una pala sagomata 12x21 cm, e all'estremità superiore è fissato un gancio per poter ancorare un dinamometro. Sull'asta principale viene posto un sostegno, formato da un profilo scanalato di alluminio, per permettere di fissare un dinamometro per la misura delle forze agenti sulla pala. Il modello è in grado di scorrere lungo il canale, permettendo diversi posizionamenti lungo il canale, per poter effettuare prove a distanze diverse dalla linea di costa.

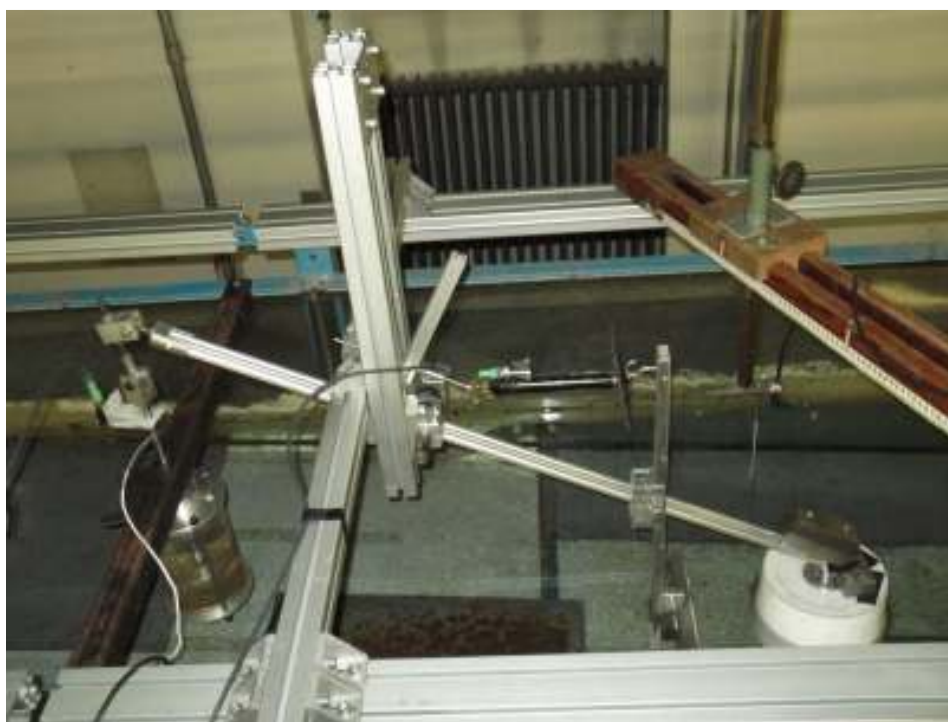


Fig. 3.8: Vista Del Sistema EDS

Per simulare il PTO del sistema reale è stato realizzato uno smorzatore idraulico (Fig. 3.9:Particolare: lo smorzatore) composto da un cilindro in plastica alto 0.2 m, del diametro di 0.11 m, con 2 tappi a tenuta alle estremità. Il tappo superiore presenta un cuscinetto attraverso cui è libero di scorrere uno stelo cilindrico d'acciaio avente

Set Up Sperimentale

l'estremità inferiore filettata; su questa filettatura è possibile fissare dei dischi forati di varie dimensioni e con numero di fori variabile. Il cilindro, riempito d'acqua, è appoggiato al canale tramite una barra di metallo a cui è vincolato il tappo superiore. Il sistema smorzante viene collegato all'asta del galleggiante tramite lo stelo, che viene connesso all'estremità dell'asta grazie a una coppia di cerniere, realizzate con lo scopo di trasformare il movimento rotatorio dell'asta del galleggiante al movimento traslatorio dello stelo.

Lo scopo dello smorzatore idraulico è quello di dissipare energia, permettendo il calcolo dell'energia assorbita dal galleggiante. Le caratteristiche dello smorzatore, influenzano la quantità di energia che può essere estratta dal sistema.



Fig. 3.9: Particolare: lo smorzatore

Se l'ampiezza di oscillazione è piccola il movimento del galleggiante può essere considerato moto armonico, e se l'inclinazione dell'asta θ è piccola, si può scrivere:

$$\left(m + a + m_{\text{sup1}} \frac{l_3}{l_1} + m_{\text{sup2}} \frac{l_4}{l_1} \right) \frac{d^2 z}{dt^2} + \left(b_{\text{hyd}} + b_{\text{ext}} \frac{l_2}{l_1} \right) \frac{dz}{dt} + k_{\text{hyd}} z = F_{\text{ex}} \cos(\omega t)$$

Set Up Sperimentale

La presenza di una massa supplementare consente di variare l'inerzia del sistema e l'affondamento del galleggiante a riposo, l'utilizzo di una seconda massa, posta a tergo della cerniera permetterebbe di variare l'inerzia del sistema senza modificarne l'affondamento a riposo. Teoricamente l'utilizzo delle masse supplementari renderebbe possibile il movimento del sistema in risonanza con le onde, massimizzando così la quantità di energia estraibile.

Per quanto concerne il sottoinsieme pala il comportamento è sensibilmente differente dal sottoinsieme galleggiante, in quanto la pala passa parte del suo tempo in acqua e parte in aria, e la forzante non può essere considerata armonica, quanto piuttosto impulsiva. Esso è quindi difficilmente modellabile analiticamente. Se la pala lavora in modo corretto, la forzante è pressoché sempre positiva (quando l'onda scarica la sua forza sulla pala) o nulla (quando la pala ritorna nella sua posizione di equilibrio). La massa della pala e la sua distribuzione influiscono sul riequilibrio della pala dopo che ha ricevuto la spinta dell'onda. Nel modello di laboratorio è la presenza del dinamometro a riportare la pala alla posizione iniziale dopo il passaggio dell'onda.

I parametri geometrici, con riferimento alla Fig. 3.7: Schema del modello EDS, sono riportati in Tab. 3-E: Caratteristiche geometriche del modello EDS. Dove sono stati utilizzati valori variabili vengono riportati i limiti del range utilizzato, mentre in Tab. 3-F si riportano le masse del modello.

Tab. 3-E: Caratteristiche geometriche del modello EDS

Elemento	Dimensione [m]
l1	0.67
l2	0.41
l3	0.20 - 0.41
b1	0.18 - 0.41
b2	0.24 - 0.31
d	0.03 - 0.12

Tab. 3-F: Masse del modello EDS

Elemento	Massa [kg]
galleggiante	0.436
asta galleggiante	0.710

pala	0.682
molla pala + supporto	0.315
sistema smorzante	0.976

L'unione dei due sottosistemi galleggiante e pala provoca delle interazioni tra di essi, valutabili attraverso prove sperimentali.

3.3. Sistema di misura

Per la misura delle forze sui due sottoinsiemi del sistema si utilizzano due metodologie diverse, come già introdotto nel paragrafo precedente; alla pala è stato applicato un dinamometro, mentre l'asta è stata vincolata ad uno smorzatore idraulico. In fase preliminare di studio era stato utilizzato un dinamometro anche sull'asta del galleggiante, ma questa soluzione è stata scartata (vedi paragrafo 4.1).

3.3.1. Strumenti di misura

Per le misure sullo smorzatore è stato necessario applicare una fotocellula, Baumer FADK 14U4470/S14IO, accoppiata con una cella di carico, Interface WMC, entrambi i dispositivi sono stati agganciati in modo da essere solidali allo stelo dello smorzatore (Fig. 3.10), permettendo di ottenere misure di forza, associate a misure di spostamento. Potendo accoppiare misure di forze e spostamento è possibile calcolare l'energia come l'integrale della forza per la velocità.

Il dinamometro è stato munito di una fotocellula (fissata alla parte fissa del dinamometro), identica a quella applicata sullo smorzatore, e di un target (solidale con la parte mobile) per poter misurare con precisione l'allungamento della molla (Fig. 3.11). Nota la costante di rigidità della molla del dinamometro è possibile calcolare la forza associata allo spostamento.

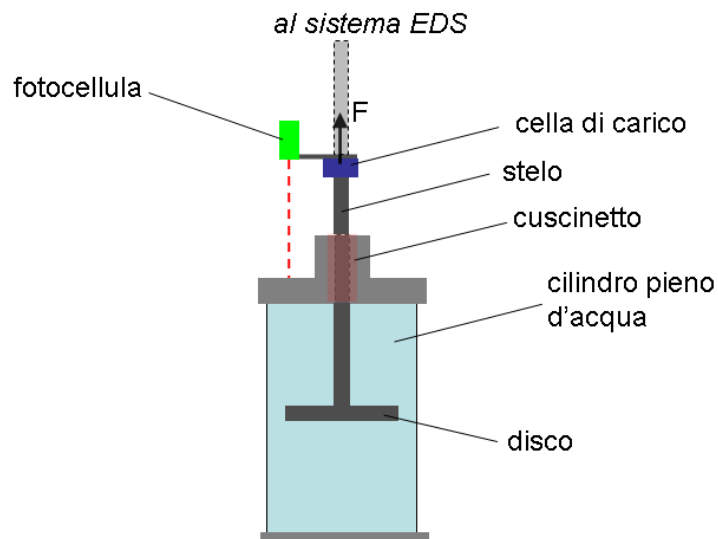


Fig. 3.10: Schema dello smorzatore e del sistema di misura



Fig. 3.11: Dinamometro e fotocellula per le misure sulla pala

Durante le prove per lo studio del rendimento del sistema EDS, le wave gauges per la misura dell'altezza d'acqua, ognuna montata su appositi supporti per appoggiarle sopra il canale, vengono posizionate una a monte della spiaggia e una a lato del galleggiante, in modo da avere una verifica delle caratteristiche delle onde "al largo"

Set Up Sperimentale

per ogni osservazione, e valutare lo sfasamento tra onda incidente e movimento del galleggiante.

Le fotocellule e le wave gauges restituiscono valori in Volt, mentre la cella di carico in milliVolt. Tutti gli strumenti sono stati collegati a un modulo di acquisizione ad alta precisione (NI 9205, 16 bit con fondo scala regolabile) della National Instruments®, che, tramite un cavo USB, permette di inviare i dati forniti dalla strumentazione al computer.

Per poter effettuare la conversione dei dati ottenuti tramite LabView da Volt alla grandezza di interesse, metri per le fotocellule e le sonde, newton per la cella di carico, sono state effettuate delle tarature degli strumenti. La taratura delle sonde è trattata da Fioletti e Cometti nel loro lavoro di tesi [6], la taratura delle fotocellule è stata effettuata tramite l'utilizzo di riferimenti posti a distanze crescenti dalla fotocellula misurati con calibro decimale, ricostruendo un legame tra distanza e voltaggio. La cella di carico è stata tarata vincolandola a un sostegno indeformabile e caricandola, sia in trazione che in compressione, mediante l'utilizzo di pesi calibrati riuscendo a costruire la curva di Fig. 3.12.

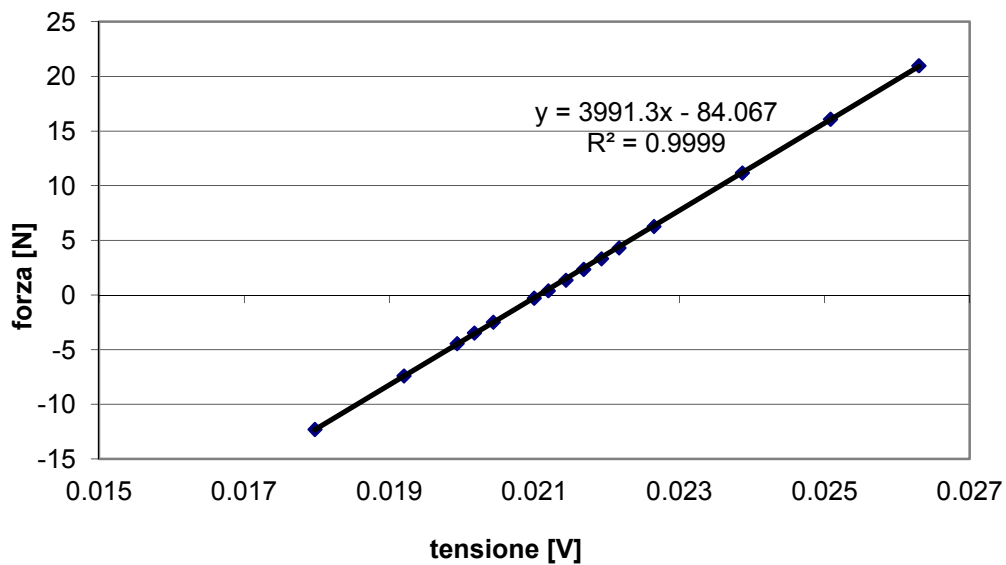


Fig. 3.12: Curva di taratura della cella di carico

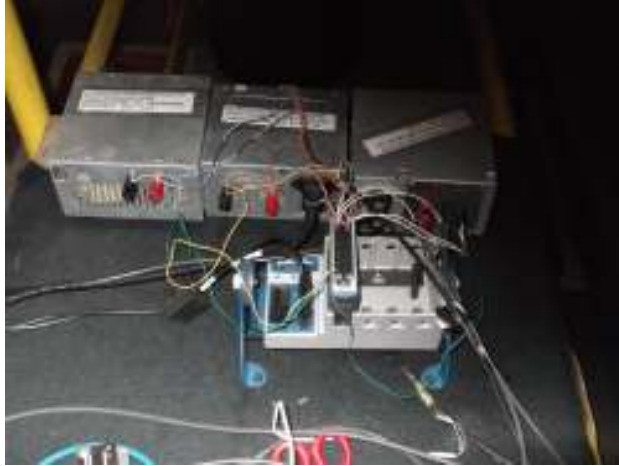


Fig. 3.13: Modulo di acquisizione con gli alimentatori degli strumenti

Per acquisire i dati è stato utilizzato LabView. Per i test sull'EDS è stato creato un task a 5 canali e, per ciascun canale, è stato settato il range di valori su cui lo strumento collegato lavora. Ad esempio la cella di carico utilizzata lavora in un range da 18 a 26 mVolt, mentre le fotocellule tra 0 e 10 Volt. Utilizzare un fondo scala inferiore permette di ottenere misure con una precisione maggiore.

3.3.2. *Caratterizzazione dello smorzatore*

Prima di essere montato sul sistema EDS, lo smorzatore è stato caratterizzato mediante test specifici, per poterne ricavare delle indicazioni utili per il calcolo della potenza assorbita.

Applicando una forza nota, tramite l'utilizzo di opportuni pesi calibrati, sullo stelo, è stata registrata la velocità di caduta del disco all'interno del cilindro, tramite la fotocellula solidale con lo stelo. Sono state testate tre configurazioni di disco differenti: un disco grande (disco 1, diametro 0.10 m, spessore 0.01 m) senza fori, il medesimo disco con 4 fori, ed un disco di dimensioni inferiori (disco 2, diametro 0.09 m, spessore 0.006 m) con 8 fori. Per ogni configurazione si sono effettuate prove con forze applicate differenti, i risultati sono mostrati in Fig. 3.14.

Set Up Sperimentale

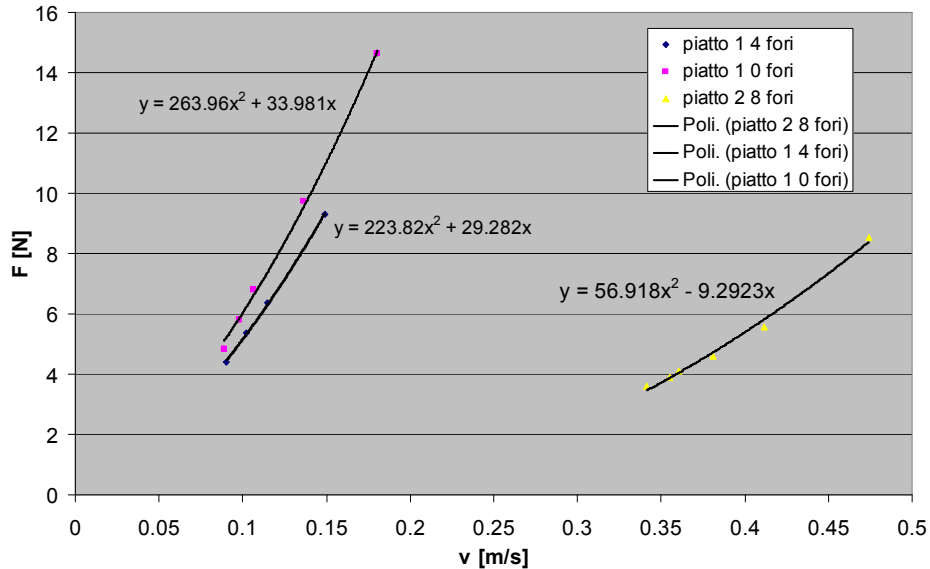


Fig. 3.14: Risultati dei test di caratterizzazione dello smorzatore

Si può affermare che lo smorzamento non è viscoso, ovvero lineare; una composizione di smorzamento quadratico e lineare sembra invece restituire un buon fit con i dati sperimentali. Nonostante il comportamento dello smorzatore non sia lineare,

si è calcolato il rapporto F/v di ogni prova (

Tab. 3-G), per quantificare, in prima approssimazione, lo smorzamento lineare associabile ad ogni configurazione.

Un'altro parametro importante che caratterizza uno smorzatore di questo tipo è il coefficiente di massa aggiunta del disco, il quale indica la quantità di fluido che si assume muoversi insieme al disco; in sostanza questa quantità aumenta l'inerzia del disco durante il suo movimento. Alcuni test di oscillazione del disco nel cilindro pieno di acqua e vuoto sono stati effettuati, ma il calcolo del coefficiente di massa aggiunta si è rivelato problematico a causa dell'elevato smorzamento. Ad ogni modo, come verrà spiegato di seguito, l'effetto della massa aggiunta è stato verificato a posteriori.

Set Up Sperimentale

Tab. 3-G: elenco dei test effettuati sullo smorzatore

nome prova	disco	n°fori	forza applicata [N]	v [m/s]	F/v [N/(m/s)]
120726_p01	1	4	4.40	0.090	48.66
120726_p03	1	4	5.38	0.102	52.71
120726_p02	1	4	6.36	0.115	55.30
120726_p04	1	4	9.30	0.149	62.48
120726_p05	1	0	4.83	0.089	54.38
120726_p06	1	0	5.81	0.098	59.27
120726_p07	1	0	6.79	0.106	63.80
120726_p08	1	0	9.73	0.136	71.44
120726_p09	1	0	14.64	0.181	81.09
120802P_010	2	8	3.61	0.341	10.60
120802P_011	2	8	4.10	0.360	11.39
120802P_012	2	8	4.60	0.381	12.07
120802P_013	2	8	5.58	0.412	13.54
120802P_014	2	8	8.52	0.474	17.97
120807_s01	2	8	3.91	0.355	11.00

3.4. Analisi dei dati

I file ottenuti dal software di acquisizione sono stati successivamente elaborati con Matlab, tramite l'utilizzo di routine create appositamente dall'ingegner Negri.

Tutti i segnali acquisiti sono stati mediati in fase, cioè, partendo dai dati acquisiti sperimentalmente, si suddivide il segnale in una serie di sinusoidi separate che vengono successivamente sovrapposte, in questo modo si calcolano le proprietà medie temporali di ogni grandezza ricostruendo un periodo di oscillazione rappresentativo del fenomeno medio. Tutte le grandezze calcolate (forze, potenze, velocità, ecc.) si riferiscono quindi al periodo medio di oscillazione.

Durante un test EDS vengono acquisite le seguenti grandezze (Fig. 3.15: Esempio di acquisizione dei segnali):

- posizione del disco
- forza sul disco
- posizione della molla
- livello d'acqua di fianco al galleggiante
- livello d'acqua prima dell'inizio della spiaggia

Un test si compone di due acquisizioni: una ad acqua ferma e una con le onde. La prova ad acqua ferma serve per avere il riferimento di zero per alcune le grandezze misurate.

Per ogni test con le onde vengono calcolate le seguenti grandezze medie:

- periodo di oscillazione del sistema
 - ampiezza di oscillazione del disco
 - ampiezza della forza sul disco
 - energia assorbita dal disco nella fase di salita e discesa
 - massimo allungamento della molla della pala
 - massima forza sulla molla
 - energia immagazzinata dalla molla
 - smorzamento equivalente di disco e molla
-

Set Up Sperimentale

- sfasamento tra movimento del galleggiante e onda

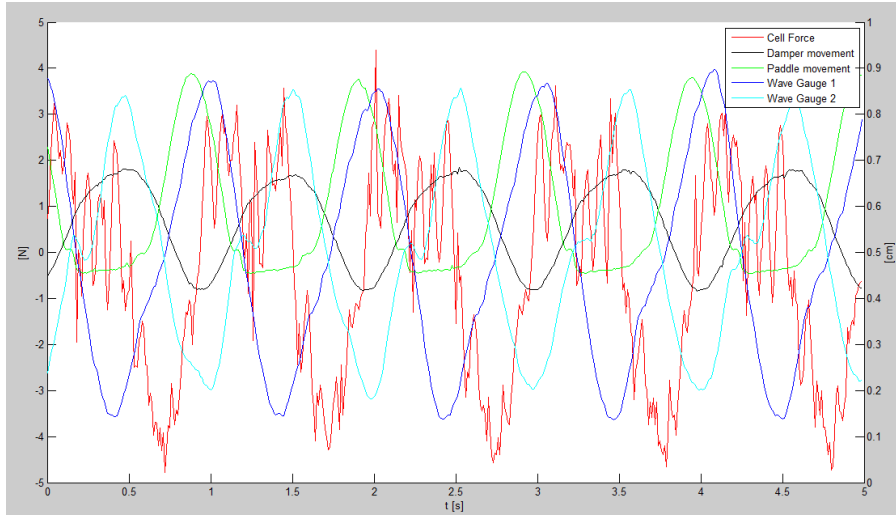


Fig. 3.15: Esempio di acquisizione dei segnali

Legare gli spostamenti della molla alle forze ottenute è piuttosto semplice, in quanto si può ricavare la costante elastica della molla dalla scala graduata presente sul cilindro esterno del dinamometro, ricordando che:

$$F = k \Delta L$$

Con k costante elastica della molla e ΔL l'allungamento.

La forza totale registrata dalla cella di carico è:

$$F = (m + m_A) \cdot \ddot{z} + F_d(\dot{z}) + (W - B(z))$$

- m [kg] massa degli oggetti sostenuti dalla cella (stelo e disco)
- m_A [kg] massa aggiunta del disco
- W [N] peso degli oggetti sostenuti dalla cella (stelo e disco)
- B [N] spinta idrostatica su stelo e disco
- F_d forza di smorzamento totale, comprende anche l'attrito

Con F positiva a trazione, asse z rivolto verso l'alto (Fig. 3.16: Schema dello Stelo).

La spinta idrostatica B varia poco con la posizione del disco, ed è dovuta al grado di immersione dello stelo (essendo il disco sempre sommerso); può essere quindi, in

Set Up Sperimentale

prima approssimazione considerata costante. Per ottenere la forza di smorzamento, che è responsabile della dissipazione di energia, bisogna depurare la forza totale F misurata dalla cella di carico dalla forza di inerzia, dalla forza peso e dalla forza di galleggiamento; questo calcolo richiede, quindi, la conoscenza del coefficiente di massa aggiunta.

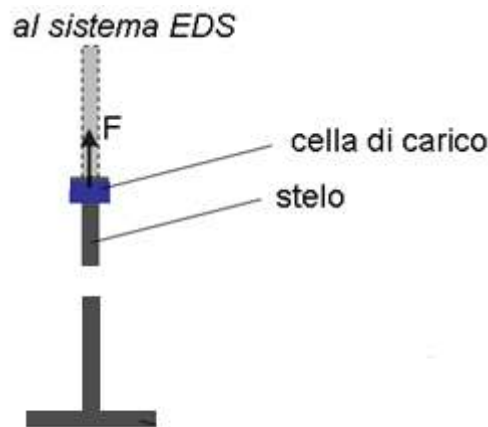


Fig. 3.16: Schema dello Stelo

La forza di smorzamento totale si ottiene dalla seguente relazione :

$$F_d = F - (m + m_A) \cdot \ddot{z} - (W - B(z))$$

La potenza media assorbita dallo smorzatore sarà quindi:

$$F_d = \frac{1}{T} \int_{t=0}^T F_d \cdot \dot{z} \cdot dt ,$$

dove \dot{z} è la velocità dello smorzatore.

\dot{z} e \ddot{z} sono stati calcolati numericamente a partire dal segnale di spostamento z , precedentemente filtrato con un filtro passabanda al fine di diminuire il rumore numerico che si genera con la derivazione dei dati di spostamento. È stato possibile ricavare (a posteriori) il valore di massa aggiunta, partendo dalla considerazione che, essendo la potenza dissipata sempre positiva, la forza di damping deve essere in fase con la velocità. Si è quindi trovato il valore di CA che minimizza lo sfasamento tra forza di damping e velocità. È stato osservato che il valore di CA non influenza

Set Up Sperimentale

molto il valore della forza di damping (Fig. 3.17); comunque, in prima approssimazione, il valore di CA per cui lo sfasamento è minimo (oppure che rende sempre positiva la potenza dissipata) è CA=0.

È utile calcolare lo smorzamento equivalente del disco bI_{eq} , come controllo del buon funzionamento dello smorzatore (valori troppo maggiori di bI_{eq} rispetto a quelli ricavati nei test preliminari dello smorzatore, indicano che lo stelo fa troppo attrito nel cuscinetto).

$$bI_{eq} = \frac{\int_0^T F_d \cdot v dt}{\int_0^T v^2 dt}$$

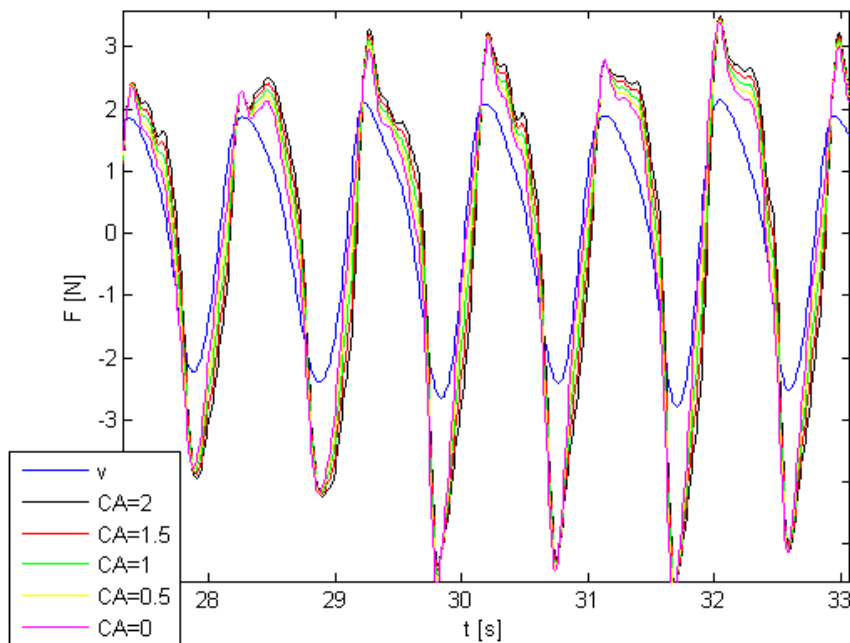


Fig. 3.17: parte di test 120810_p19 (stelo mosso manualmente). Velocità e forza di smorzamento istantanee del disco.

Inoltre, poiché non è noto quanto questo smorzatore riproduca similmente lo smorzatore reale che andrà sulla macchina EDS, il coefficiente di smorzamento equivalente fornisce un'indicazione per il confronto con uno smorzatore in scala reale.

Set Up Sperimentale

Come già detto, la pala non è fornita di uno smorzatore. Essendo la molla conservativa non è possibile calcolare a rigore la potenza assorbita, in quanto il lavoro di una molla su un ciclo è nullo. Un'approssimazione della potenza assorbita può essere calcolata come l'energia accumulata dalla molla nella fase di allungamento. Allo stesso modo di quanto fatto per lo smorzatore, può essere calcolato uno smorzamento equivalente b_{2eq} per una molla.

$$b_{2eq} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} k \cdot x \cdot \dot{x} dt}{\int_{t_1}^{t_2} \dot{x}^2 dt} = \frac{\frac{1}{2} k x_{max}^2}{\int_{t_1}^{t_2} \dot{x}^2 dt}$$

Dove in t_1 la molla è a riposo e in t_2 è al massimo allungamento x_{max} .

3.4.1. *Calcolo della potenza assorbita*

L'energia assorbita dal sistema EDS è calcolata quindi attraverso le seguenti relazioni (si divide l'energia in fase di salita e fase di discesa in quanto il PTO del sistema EDS reale è in grado di assorbire energia solo nella fase di salita del galleggiante):

$$E_{G-up} = \int_{t_{up}} F_D \cdot v \cdot dt$$

nella fase di salita del galleggiante (discesa del disco)

$$E_{G-down} = \int_{t_{down}} F_D \cdot v \cdot dt$$

nella fase di discesa del galleggiante (salita del disco)

Set Up Sperimentale

$$E_P = \frac{1}{2} k x_{max}^2$$

Dove:

- F_D forza di damping del disco
- v velocità del disco
- x_{max} massimo allungamento della molla

L'energia

Da cui è possibile ricavare le corrispondenti potenze medie in un ciclo (ricordando che la potenza è l'energia assorbita nell'unità di tempo) e i corrispondenti rendimenti rispetto alla potenza d'onda disponibile nel fronte d'onda di larghezza pari al galleggiante:

$$\eta_{G-up} = \frac{P_{G-up}}{P_{av} \cdot D} = \frac{E_{G-up}}{P_{av} \cdot D}$$

$$\eta_{G-down} = \frac{P_{G-down}}{P_{av} \cdot D} = \frac{E_{G-down}}{P_{av} \cdot D}$$

$$\eta_P = \frac{P_P}{P_{av} \cdot D} = \frac{E_P}{P_{av} \cdot D}$$

Dove:

- P_{av} potenza per metro di fronte d'onda
- D diametro del galleggiante
- T periodo di oscillazione

Da cui il rendimento totale ed il rendimento "sfruttabile" dal sistema EDS è pari a:

Set Up Sperimentale

$$\eta_{tot} = \eta_{G-up} + \eta_{G-down} + \eta_P$$

$$\eta_{sfrut} = \eta_{G-up} + \eta_P$$

La routine e le funzioni utilizzate per l'analisi dei dati e il calcolo della potenza restituiscono una serie di grafici attraverso cui si possono visualizzare i risultati ottenuti graficamente e non solo in forma numerica.

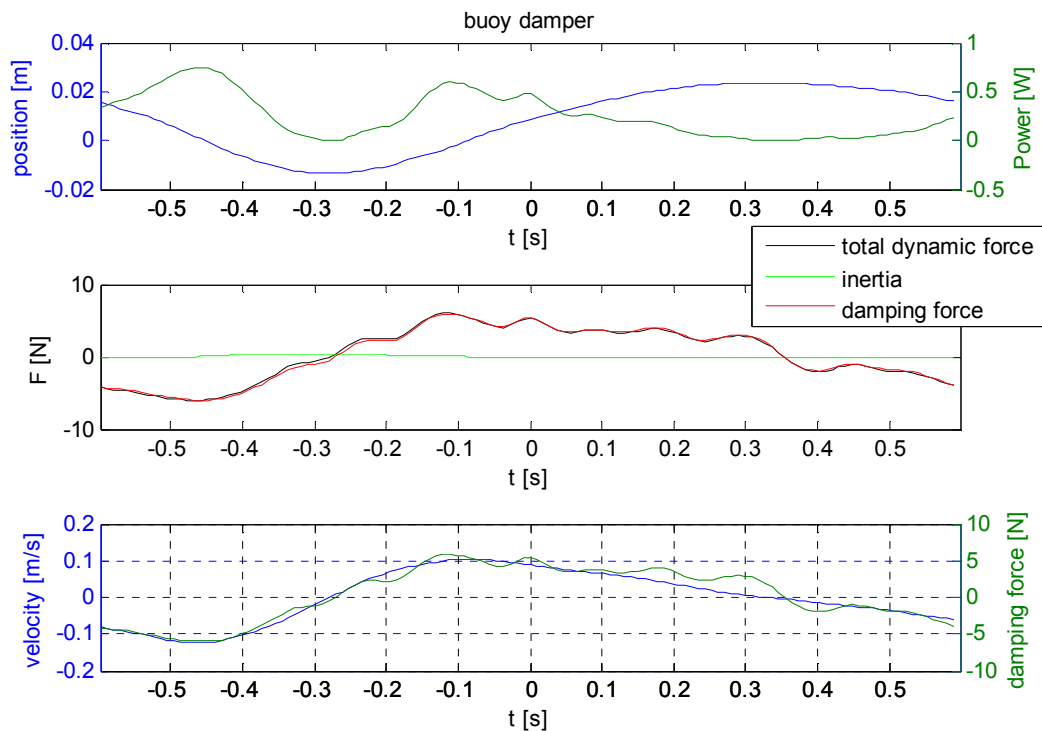


Fig. 3.18: Esempio Analisi del disco smorzante

In Fig. 3.18 è riportata la dinamica del disco smorzante: la potenza in funzione della posizione, le forze agenti sul disco e la forza di damping (responsabile della dissipazione di potenza) in funzione della velocità del disco. Le oscillazioni nella forza dinamica, nel secondo grafico della figura, sono legate all'attrito dovuto alla trasmissione del movimento dall'asta del galleggiante allo smorzatore tramite le due cerniere. Le due cerniere non eliminano gli sforzi di taglio trasmessi dall'asta, generando attrito nel movimento dello stelo all'interno del cuscinetto. Nel terzo

Set Up Sperimentale

grafico, sempre in Fig. 3.18, si può notare che forza di damping e velocità cambiano di segno nello stesso momento, dando un'indicazione sulla bontà del modello del sistema smorzante e dell'acquisizione.

In Fig. 3.19 è riportata la potenza istantanea del disco e della molla; le aree colorate dei due grafici rappresentano l'energia assorbita, in verde nella fase di salita del galleggiante, e in rosso nella fase di discesa. Nel secondo grafico l'energia potenziale dovuta all'allungamento della molla è colorata in giallo; come detto precedentemente, essendo la molla conservativa, si ottengono anche valori negativi di potenza quando la molla si riporta in posizione iniziale.

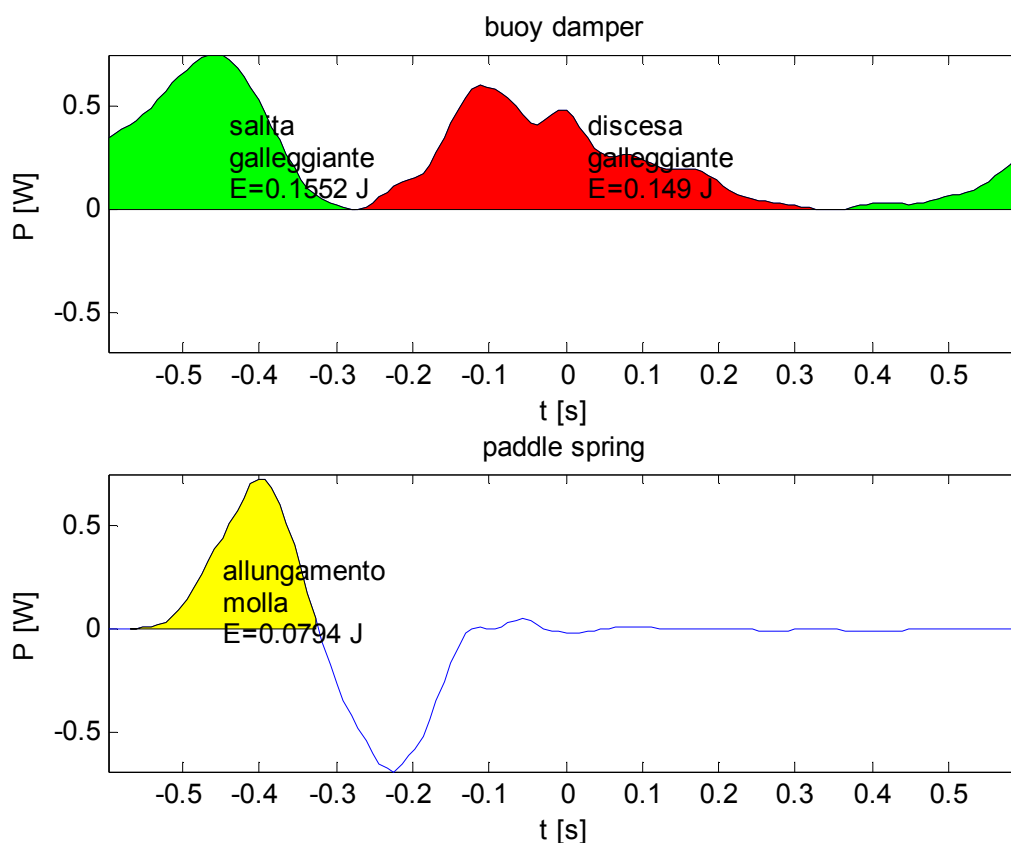


Fig. 3.19: Esempio di grafico della Potenza istantanea del galleggiante e della pala

In Fig. 3.20 sono riportati il movimento, la forza, la potenza del disco smorzante del galleggiante e del dinamometro connesso alla pala.

In Fig. 3.21 è riportata la posizione del disco smorzante cambiata di segno (per coerenza con il movimento del galleggiante) e il livello d'acqua al lato del

Set Up Sperimentale

galleggiante per evidenziare lo sfasamento tra onda e galleggiante, visualizzabile come la distanza sull'asse orizzontale tra i picchi dei due segnali.

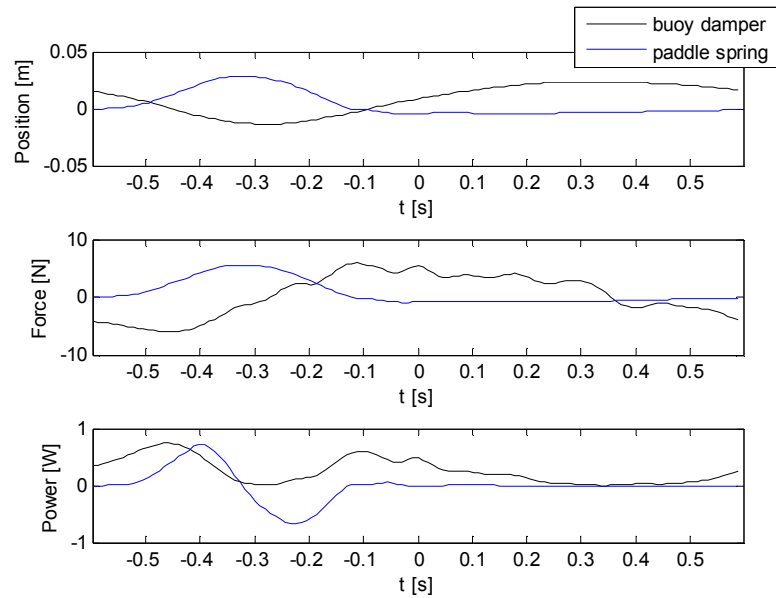


Fig. 3.20: Posizione, forza e potenza del disco smorzante e della molla della pala.

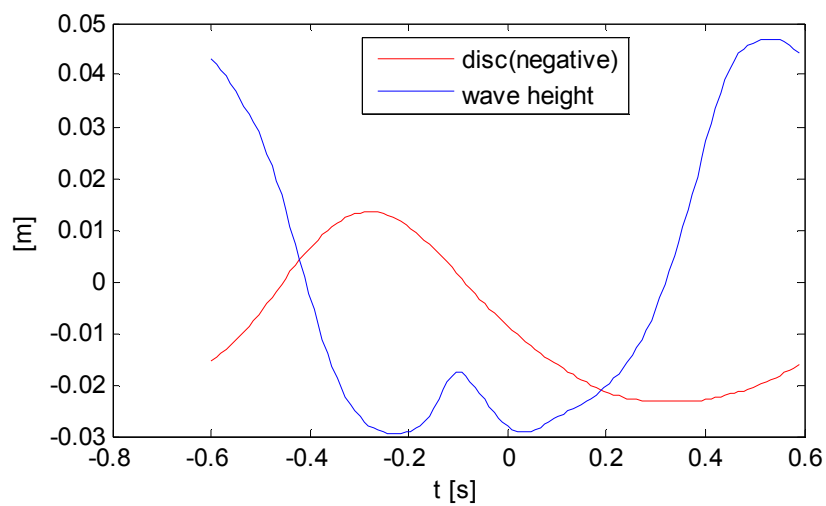


Fig. 3.21: Posizione del galleggiante e del pelo libero a lato del galleggiante.

Capitolo 4

TEST DEL MODELLO EDS

Nel seguente capitolo verranno presentati i risultati ottenuti durante la campagna sperimentale sul modello EDS. I primi studi sono stati effettuati su un modello preliminare differente da quello presentato nel capitolo 3; questi studi, come verrà illustrato, hanno soltanto valore indicativo, e non possono essere considerati per valutazioni quantitative. Vengono ugualmente riportati per descrivere con completezza il lavoro di tesi.

4.1. Primo modello EDS

4.1.1. Descrizione del primo modello e prove effettuate

Il primo modello fornitoci da Tecnomac presentava una massa superiore a quelle del sistema definitivo (Tab. 4-A) . Questo modello era privo dello smorzatore; un dinamometro era montato sull'asta principale (Fig. 4.1, Fig. 4.2)

Tab. 4-A: Masse del primo modello eds senza pala

Elemento	Massa [kg]
galleggiante	1.086
asta galleggiante	2.735
molla	0.1

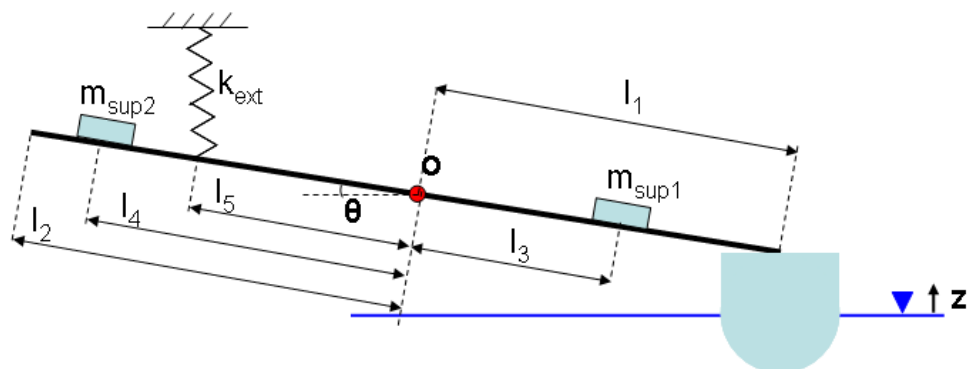


Fig. 4.1: schema del primo modello EDS senza pala.

Non avendo alcun tipo di informazione sul comportamento che avrebbe dovuto avere il sistema reale, con riferimento agli studi esposti da Vantorre [7], si è ipotizzato che il sistema dovesse essere risonante.

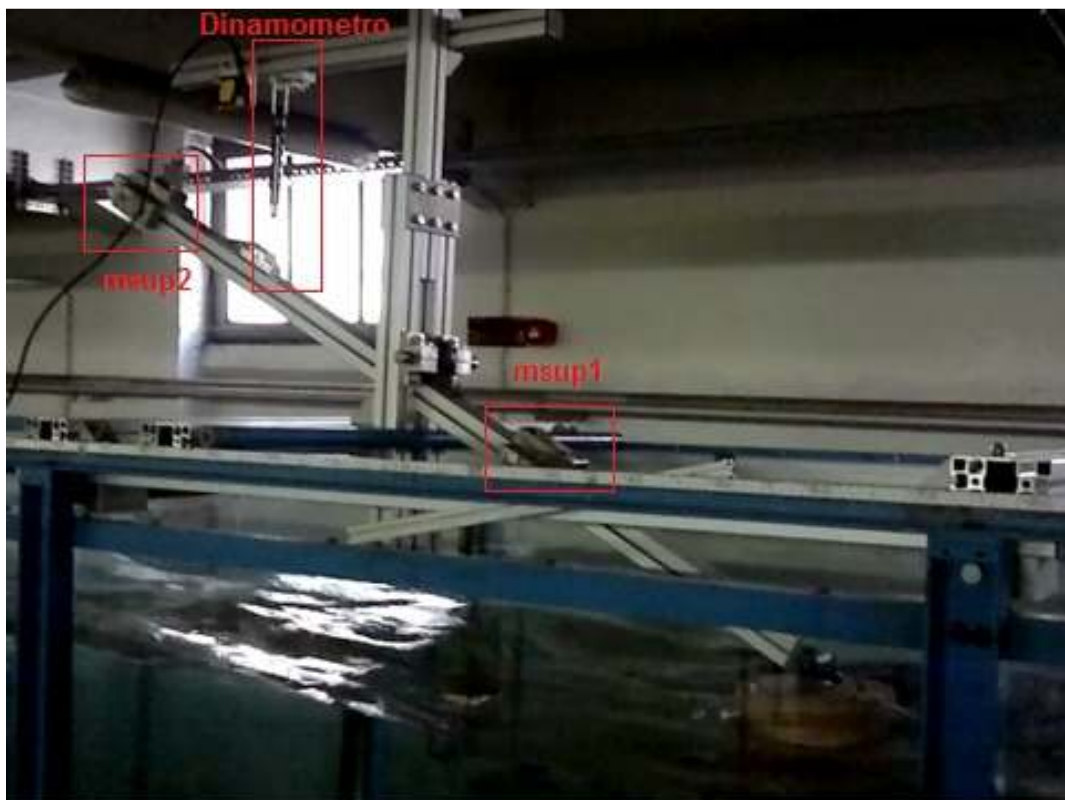


Fig. 4.2: primo modello EDS senza pala

Per verificare questa condizione sul modello sono state inizialmente eseguite una serie di prove di oscillazione naturale, imponendo uno spostamento iniziale al galleggiante, in acqua ferma. Queste prove di oscillazione naturale sono state effettuate per validare la frequenza teorica di oscillazione del sistema in configurazione con solo galleggiante calcolata come:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_{hyd} + k_{ext} \frac{l_5}{l_1}}{m + a(\omega_n) + m_{sup1} \frac{l_3}{l_1} + m_{sup2} \frac{l_4}{l_1}}}$$

Inoltre con queste prove si è calcolato lo smorzamento idrodinamico b_{hyd} del galleggiante. Attraverso questi test si è potuta ricavare che la frequenza naturale teorica e quella reale differivano, in tutti i casi, di qualche centesimo di Hz; per quanto riguarda lo smorzamento, si è verificato che il b_{hyd} del galleggiante sferico è poco sensibile alle variazioni di set-up del sistema, ed è pari a circa 3 N·s/m. Questo è un parametro importante, in quanto per un galleggiante oscillante in heave, lo smorzamento ideale esterno b_{ext} è dipendente anche dallo smorzamento idrodinamico b_{hyd} .

Tab. 4-B: Valori di smorzamento idrodinamico del sottosistema galleggiante

Assetto galleggiante	b_{hyd} [N·m/s]	b_{hyd}/b_{crit} [%]
$m_{sup1}=0$, $m_{sup2}=0$, parte sferica totalmente immersa	3	3
$m_{sup1}=0$, $m_{sup2}=0$, parte sferica parzialmente immersa	2.8	3
$m_{sup1}=3$ kg, $m_{sup2}=3$ kg, $l_3=70$ cm, $l_4=70$ cm	3.3	2.7
$m_{sup1}=3$ kg, $m_{sup2}=0$, $l_3=54$ cm	2.5	2.3

Si sono effettuati dei test per stabilire quale fosse la forma del galleggiante che producesse la maggior sollecitazione dinamica (Fig. 4.3). Per questi primi test il sistema è stato posto in centro canale, con una profondità d'acqua di 50 cm, e sollecitato con le seguenti onde:

- onda 2k50: H=5.9 cm, T=1.02 s, P=4.0 W/m h=0.5 m
- onda 3k50: H=8.6 cm, T=1.19 s, P=10.9 W/m h=0.5 m
- onda 4k50: H=11.7 cm, T=1.41 s, P=22.2 W/m h=0.5 m



Fig. 4.3: Forme di galleggiante testate

E' risultato che la forma del galleggiante che globalmente faceva registrare le maggiori forze era quella sferica, sebbene senza una grande differenza rispetto alle altre forme. In Tab. 4-C: Test per la scelta della forma del galleggiante sono riportati i dati relativi a questi test.

Tab. 4-C: Test per la scelta della forma del galleggiante

Onda	Forma galleggiante	I1 [m]	I2 [m]	I3 [m]	I4 [m]	I5 [m]	m_{sup1} [kg]	m_{sup2} [kg]	k [N/m]	F [kgf]
2k50	Cono 90	74	76	37	70	40	3	3	490.3	3.43
3k50	Cono 90	74	76	58	70	40	3	3	490.3	2.97
4k50	Cono90	74	76	58	70	40	3	3	490.3	3.42
2k50	Cono 120	74	76	22	70	40	3	3	490.3	3.39
3k50	Cono 120	74	76	55	70	40	3	3	490.3	3.27
4k50	Cono 120	74	76	55	70	40	3	3	490.3	3.26
2k50	Sfera	74	76	35	70	40	3	3	490.3	3.54
3k50	Sfera	74	76	53	70	40	3	3	490.3	3.00
4k50	Sfera	74	76	66	70	40	3	3	490.3	3.55

Seppur la condizione di risonanza possa sembrare vantaggiosa per le forze generate è difficilmente raggiungibile per il sistema reale EDS, se non per onde piccole.

A valle della caratterizzazione del sistema con solo il galleggiante, si è testato il sistema EDS in configurazione completa aggiungendo alla configurazione sopra descritta la pala basculante dotata di un secondo dinamometro a molla per la misura della forza impressa dall'onda incidente sulla pala. In Tab. 4-D: Masse del primo modello EDS con pala viene riportato il riepilogo delle masse dei vari elementi del

sistema. In Fig. 4.4: schema Modello preliminare EDS con pala è riportato uno schema del modello; per questo modello è stata utilizzata solamente la massa aggiuntiva dalla parte opposta rispetto al galleggiante. Poiché il sottoinsieme pala, con il proprio peso, tende ad immergere il galleggiante, la massa supplementare va a ridurre questo effetto perché, essendo posizionata a tergo della cerniera, tende a sollevare il galleggiante.

Tab. 4-D: Masse del primo modello EDS con pala

Elemento	massa [kg]
galleggiante	1.086
asta galleggiante	2.735
molla galleggiante	0.1
pala	2.17
molla pala +supporto molla pala	0.51

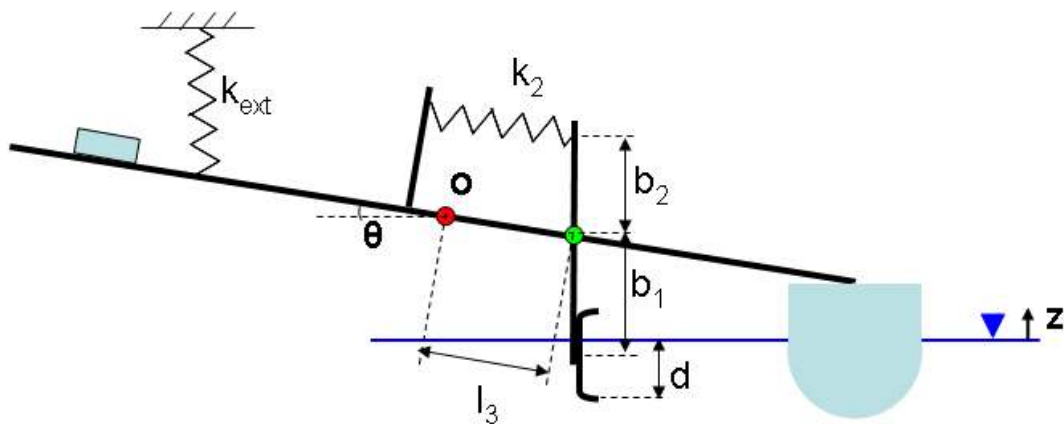


Fig. 4.4: schema Modello preliminare EDS con pala

Nella configurazione completa sopra descritta si sono eseguiti una serie di test al largo, cioè al centro del canale, lontano dal fondale inclinato. Queste prove hanno evidenziato che la pala riceveva una spinta trascurabile dalle onde. Perciò si è spostato il modello sulla spiaggia verificando che la spinta orizzontale, impressa dalle onde sulla pala, assumeva valori significativi.

Test Sul Modello EDS

Da questo punto in poi, per motivi pratici di gestione del sistema EDS, si è abbassato il livello d'acqua nel canale da 0.5 m a 0.4 m (le caratteristiche delle onde ottenute sono descritte nel Cap.3).

Per individuare la posizione ottimale del sistema rispetto alla linea di costa sono state effettuate prove in tre posizioni.



Fig. 4.5: Modello preliminare EDS con pala

Il funzionamento del sistema EDS dipende da molti parametri (affondamento del galleggiante, posizione della pala, affondamento della pala). Per valutare l'influenza di questi parametri sono state effettuate varie prove, variandoli a partire da quelli più significativi.

Una prima serie di prove è stata fatta variando i seguenti parametri:

- rigidità della molla
- distanza pala-galleggiante
- affondamento della pala (acqua ferma)
- posizione del sistema lungo la spiaggia, x_s

Test Sul Modello EDS

Il set-up di partenza, denominato EDS1, è stato ottenuto spostando la massa supplementare fino a che il galleggiante potesse muoversi senza essere sommerso dall'onda incidente. In **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** sono riepilogate le prime prove effettuate; in arancio sono evidenziate le caratteristiche che differenziano una prova dal setup di partenza. Come ipotizzato, si è verificato sperimentalmente che la risposta del sistema è sensibile alla rigidità della molla stessa, pertanto si ottengono diversi valori di forza a seconda della molla che si va ad utilizzare: una risposta più rigida del sistema corrisponde a forze registrate maggiori.

Non è stata utilizzata l'onda 2000 poiché le forze registrate sul galleggiante erano inferiori a 1 Kg e non si evidenziavano variazioni sensibili cambiando i parametri al contorno.

Tab. 4-E: Test effettuati sul modello EDS con molle

nome set up	onda	distanza perno-gall.	distanza perno-fine asta	distanza perno-pala	distanza perno-masse sup	distanza perno-molla	massa suppl.	braccio 1 pala [cm]	braccio 2 pala [cm]	Immersione pala a riposo	molla gall.	molla pala	incl. asta gall.	distanza perno-linea di costa	Forza Galleggianti	Forza Pala
-	-	I1 [cm]	I2 [cm]	I3 [cm]	I4 [cm]	I5 [cm]	m _{sup} [kg]	b1 [cm]	b2 [cm]	d [cm]	k1 [N/m]	k2 [N/m]	θ [°]	x _s [m]	F _G [Kg]	F _P [Kg]
EDS1	3000	74	76	28	60	45	2	28	28	5.5	490.3	490.3	23	0.50	1.8	0.7
EDS1	3000	74	76	28	60	45	2	28	28	5.5	490.3	490.3	24	0.50	1.7	0.9
EDS1	3000	74	76	28	60	45	2	28	28	5.5	490.3	490.3	25	0.70	1.6	0.7
EDS1	4000	74	76	28	60	45	2	28	28	5.5	490.3	490.3	25	0.70		
EDS2	3000	74	76	28	60	45	2	28	28	5.5	980.6	490.3	26	0.90	2.7	1
EDS3	3000	74	76	28	60	45	2	28	28	5.5	490.3	196.12	23	0.70	1.7	0.5
EDS4	3000	74	76	28	60	45	2	28	28	5.5	196.12	490.3	22	0.70	1	0.4
EDS4	3000	74	76	28	60	45	2	28	28	5.5	196.12	490.3	22	0.70	1.1	0.7
EDS5	3000	74	76	38	60	45	2	18	28	1	490.3	490.3	23	0.70	1.4	0.1
EDS6	3000	74	76	38	60	45	2	23	28	5.5	490.3	490.3	23	0.50	1.5	0.6
EDS7	3000	74	76	28	70	45	3	28	28	5.5	490.3	490.3	23	0.70	1.9	0.2
EDS7	4000	74	76	28	70	45	3	28	28	5.5	490.3	490.3	23	0.70	2.1	0.5
EDS7	4000	74	76	28	70	45	3	28	28	5.5	490.3	490.3	23	0.70	2.2	0.7
EDS7	4000	74	76	28	70	45	3	28	28	5.5	490.3	490.3	23	0.70	1.8	0.4
EDS7	4000	74	76	28	70	45	4	28	28	5.5	490.3	490.3	23	0.70		
EDS8	4000	74	76	28	70	45	3	23	28	0	490.3	490.3	23	0.90	1.9	0.2
EDS9	3000	74	76	28	60	45	2	28	28	3	980.6	490.3	26	0.70	2.6	0.4
EDS10	3000	74	76	28	60	45	2	28	28	9	980.6	490.3	26	1.10	2.7	1.2
EDS11	3000	74	76	55	60	45	3	18	28	1	490.3	196.12	23	1.10	(1.6)	(0.2)

È stato individuato il set-up che fornisce le forze maggiori quando sollecitato dall'onda 3000 (EDS 10 in Tab. 4-E: Test effettuati sul modello EDS con molle); per ottenerlo si è proceduto scegliendo di variare un parametro per volta e, una volta individuata la condizione migliore, si è fissato il parametro al valore ottenuto e si è spostata l'attenzione su un nuovo parametro. Come si può notare dalla Tab. 4-F, spesso la variazione di un parametro ha portato a modifiche anche su altri parametri

perché, per le caratteristiche costruttive di questo primo modello, i parametri sono correlati tra loro.

A partire da un set-up iniziale si è variato l'affondamento della pala, osservandone un massimo in corrispondenza del valore 9 cm, cioè dove la pala viene interamente investita dall'onda senza esserne sormontata.

Si è poi variata la distanza tra il perno della pala e il perno dell'asta basculante, cioè la distanza pala galleggiante, constatando una diminuzione della forza ricevuta dal galleggiante all'avvicinarsi della pala.

È stato ipotizzato che ciò sia un problema legato alla presenza della molla per la misura della forza sul galleggiante, poiché, come già introdotto precedentemente, la molla, necessitando di essere precaricata per poter misurare l'intera oscillazione del galleggiante, applica una forza di richiamo che tende a immergere il galleggiante; inoltre quando la pala viene avvicinata al galleggiante, tende ad immergere ulteriormente quest'ultimo, a causa del proprio peso. Si è osservato durante le prove che il galleggiante risulta molto appesantito da questa condizione e l'onda incidente fatica a sollevarlo.

Diminuire il braccio della massa supplementare, l_4 , ovvero avvicinarla all'aggancio della molla, riduce la forza registrata dal galleggiante probabilmente per lo stesso motivo, in quanto la massa supplementare lavora in opposizione al peso della pala, e avvicinandola al perno si riduce l'effetto della massa sul sistema.

Queste considerazioni sono supportate anche dai risultati ottenuti aumentando il peso della massa supplementare.

L'ultima colonna del grafico di Tab. 4-F: Prove sul primo modello con onda 3000 fa riferimento a una prova con l'asta del galleggiante inclinata maggiormente rispetto alle prove precedenti. Si voleva verificare se aumentarne l'inclinazione potesse garantire qualche beneficio.

Successivamente si è studiato il comportamento del sistema quando sollecitato dall'onda 4000, a partire dalla configurazione migliore trovata per l'onda 3000.

Test Sul Modello EDS

Tab. 4-F: Prove sul primo modello con onda 3000

nome serie	onda	forma gall.	distanza perno-gall. [cm]	distanza perno-linea costa [cm]	distanza perno-pala [cm]	distanza perno-masse sup [cm]	distanza perno-molla [cm]	massa suppl. [kg]	braccio 1 pala [cm]	braccio 2 pala [cm]	Profondità acqua canale [cm]	immersione pala a riposo [cm]	molla gall. [kgf]	molla pala [kgf]	Profondità acqua al gall. [cm]	distanza galleggiante-linea di costa [m]	Forza Galleggiante [Kg]	Forza Pala [Kg]	Forza TOT [Kg]
-	-	-	I1 [cm]	I2 [cm]	I3 [cm]	I4 [cm]	I5 [cm]	msup [kg]	b1 [cm]	b2 [cm]	h [cm]	d [cm]	F5k1 [kgf]	F5k2 [kgf]	h _a [cm]	m	Kg	Kg	Kg
SetUp Iniziale	3k40	Sferico	74	76	28	60	45	2	28	28	40	5.5	10	5	20	1.4	2.7	1	3.7
d=3cm	3k40	Sferico	74	76	28	60	45	2	25	28	40	3	10	5	20	1.4	2.5	0.4	2.9
d=9cm	3k40	Sferico	74	76	28	60	45	2	31	28	40	9	10	5	20	1.4	2.7	1.2	3.9
d=10cm	3k40	Sferico	74	76	28	60	45	2	32	28	40	10	10	5	20	1.4	2.8	1	3.8
I3=23cm	3k40	Sferico	74	76	23	60	45	2	32	28	40	9	10	5	20	1.4	2.7	1.1	3.8
I3=33cm	3k40	Sferico	74	76	33	60	45	2	31	28	40	9	10	5	20	1.4	2.4	1.2	3.6
I3=38cm	3k40	Sferico	74	76	38	60	45	2	31	28	40	9	10	5	20	1.4	2.1	1.2	3.3
Lc=1.6m	3k40	Sferico	74	76	28	60	45	2	31	28	40	9	10	5	24	1.6	2.6	1.1	3.7
Lc=1.8m	3k40	Sferico	74	76	28	60	45	2	31	28	40	9	10	5	28	1.8	2.3	1.1	3.4
I4=70cm	3k40	Sferico	74	76	28	70	45	2	31	28	40	9	10	5	20	1.4	2.7	1.2	3.9
I4=45cm	3k40	Sferico	74	76	28	45	45	2	31	28	40	8.5	10	5	20	1.4	2.3	1.2	3.5
Msup=3kg	3k40	Sferico	74	76	28	60	45	3	32	28	40	9	10	5	20	1.4	2.7	1.2	3.9
Msup=1kg	3k40	Sferico	74	76	28	60	45	1	31	28	40	8	10	5	20	1.4	1.1	1.2	2.3
Gall. Inclinato	3k40	Sferico	74	76	28	60	45	2	31	28	40	9	10	5	20	1.4	2.5	1.2	3.7



Fig. 4.6: Risultati delle prove con onda 3000

Si è subito riscontrato un problema relativo al galleggiante, il quale rimaneva affondato sotto l'onda incidente. A distanza 1.4 m del galleggiante dalla linea di costa si è verificata l'impossibilità di impedire la sommersione del galleggiante; si è quindi spostato il modello in modo che il galleggiante fosse a 1.6 m dalla linea di costa e si sono variati i valori del braccio della massa supplementare e il peso della stessa in modo da bilanciare la spinta della molla, come già effettuato per trovare il set-up iniziale per l'onda 3000. Si è così trovato il set-up iniziale per l'onda 4000 (prima riga Tab. 4-G).

A partire dal set-up trovato si è operato in modo analogo a quanto fatto per l'onda 3000, ottenendo un numero minore di risultati (Tab. 4-G, Fig. 4.7) poiché è risultato complesso impedire che l'onda incidente sormontasse il galleggiante.

Test Sul Modello EDS

Contrariamente ai risultati ottenuti con l'onda 3000, si è verificato un aumento della forza impressa dall'onda alla pala, diminuendo l'affondamento a riposo. Questo risultato è imputabile alla diversa altezza dell'onda 4000 rispetto all'onda 3000; essendo l'onda 4000 più alta, la pala, con l'immersione in acqua ferma migliore trovata per l'onda 3000, risulta completamente sormontata dall'onda 4000. Portando la pala ad un'immersione inferiore essa viene interamente investita dall'onda incidente, senza esserne sormontata, massimizzando la forza ottenibile.

Avvicinando la pala al galleggiante, diminuendo l_3 , si è verificato un peggioramento della forza registrata sullo stesso, e contemporaneamente un aumento della forza registrata sulla pala, analogamente a quanto ottenuto dalle prove con onda 3000.

L'ultima colonna di Fig. 4.7 è stata effettuata ponendo la pala con il supporto inclinato in modo che la pala fosse più vicina al galleggiante, senza spostarne il perno, per poter osservare se questa soluzione potesse aumentarne le prestazioni.

Tab. 4-G: Prove sul primo modello con onda 4000.

colore/home serie	onda	forma gall.	distanza perno-gall.	distanza perno-fine asta	distanza perno-pala	distanza perno-masse sup	distanza perno-molla	massa suppl.	braccio 1 pala [cm]	braccio 2 pala [cm]	Profondità acqua canale	Immersione pala a riposo	molla gall.	molla pala	Profondità acqua al gall.	distanza galleggiante-linea di costa	Forza Galleggiante	Forza Pala	Forza TOT
-	-	-	l1 [cm]	l2 [cm]	l3 [cm]	l4 [cm]	l5 [cm]	m sup [kg]	b1 [cm]	b2 [cm]	h [cm]	d [cm]	FSk1 [kgf]	FSk2 [kgf]	h _a [cm]	m	kg	kg	kg
Set Up Iniziale	4k40	Sferico	74	76	28	70	45	3	31	28	40	8.5	10	5	22	1.6	3.6	0.9	4.5
d=7cm	4k40	Sferico	74	76	28	70	45	3	29	28	40	7	10	5	22	1.6	3.6	0.6	4.1
d=6cm	4k40	Sferico	74	76	28	70	45	3	28	28	40	6	10	5	22	1.6	3.9	0.9	4.8
d=5cm	4k40	Sferico	74	76	28	70	45	3	27	28	40	5	10	5	22	1.6	4	0.8	4.8
l3=38cm	4k40	Sferico	74	76	38	70	45	3	26	28	40	6	10	5	22	1.6	3	1.1	4.1
Pala Inclinata	4k40	Sferico	74	76	38	70	45	3	25	28	40	6	10	5	22	1.6	3	0.9	3.9

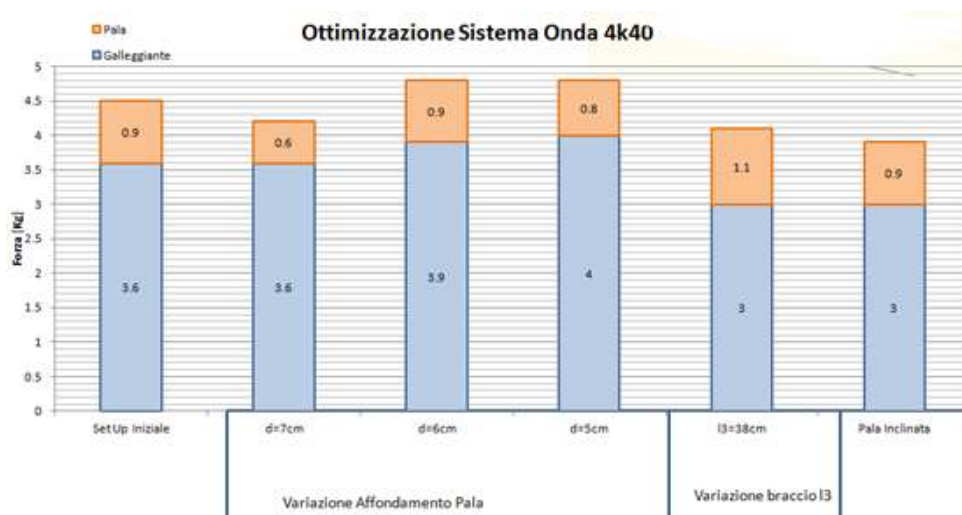


Fig. 4.7: Risultati delle prove con onda 4000

4.1.2. *Osservazioni sul primo modello EDS*

Sono state effettuate prove per varie configurazioni, sollecitate dall'onda 3000, e si ritiene di aver raggiunto un set-up che massimizza le forze ottenibili. Per l'onda 4000 il lavoro è stato più difficoltoso a causa dei problemi di immersione del galleggiante già citati. Inoltre il movimento del galleggiante dipendeva dalla rigidità della molla che viene montata sull'asta principale, pertanto i risultati ottenibili con un sistema smorzante non sono prevedibili.

La presenza di uno smorzatore, rappresentando un sistema più simile a quello reale, permetterebbe, in teoria, di utilizzare la massa supplementare in modo da gestire la frequenza naturale del modello, mentre in questa configurazione è stata utilizzata per bilanciare la forza data dalla molla che tende ad affondare il galleggiante. Come già detto i dati ricavati dal questo primo modello (configurazione con i due dinamometri), sono da considerare solo per avere un indicazione puramente qualitativa sul comportamento del sistema che, soprattutto per quanto riguarda la dinamica del galleggiante, non è rappresentativo del sistema reale.

4.2. Secondo Modello EDS

Confrontandosi con Tecnomac si è deciso di sviluppare un secondo modello EDS. Come già descritto nel Cap.3, la molla per la misura della forza sull'asta del galleggiante è conservativa e non permette di calcolare l'energia estratta dal modello in un ciclo; per questa ragione si è scelto di sostituirla con uno smorzatore, che compiendo un lavoro dissipativo, permette di valutare l'energia estratta dal sistema. Inoltre si è scelto di ridurre peso e dimensioni dell'asta del galleggiante perché il primo modello, in scala reale, sarebbe risultato eccessivamente pesante e ingombrante. Si è deciso di alleggerire notevolmente anche il galleggiante, realizzandone uno in plastica anziché in legno, in modo da poter sperimentare l'influenza del valore della massa supplementare sia sull'affondamento del galleggiante in acqua ferma, sia sulle prestazioni del sistema.

Durante la sperimentazione sul secondo modello, così come era stato fatto per il primo modello completo, si è utilizzata un'altezza d'acqua nel canale di 0.4 m.

Per come è stato costruito il secondo modello EDS, i parametri che si possono variare (e che ne influenzano il funzionamento) sono:

- Lunghezza del braccio del galleggiante (l_1)
- Lunghezza del braccio dello smorzatore (l_2)
- Inclinazione dell'asta del galleggiante (θ)
- Rapporto tra i bracci della pala (b_2/b_1)
- Affondamento della pala a riposo (d)
- Inclinazione della pala a riposo
- Costante elastica della molla della pala (k)
- Inclinazione della molla della pala
- Distanza pala-galleggiante (D_{pg})
- Massa supplementare (m_{sup})
- Posizione del modello rispetto alla linea di costa (x_s)
- Coefficiente di smorzamento del disco (b_{hyd})
- Massa del sistema

Data la numerosità di questi parametri, e non essendoci stato fornito alcun vincolo preciso riguardo le dimensioni geometriche e le caratteristiche della macchina EDS reale, si è seguito un percorso di ottimizzazione per step successivi, variando i parametri che potenzialmente avevano più influenza sul sistema. I parametri posizione del sistema lungo la spiaggia (definita come distanza del perno dell'asta del galleggiante dalla riva, x_s) e massa supplementare sul galleggiante, sono stati variati considerando per la massa supplementare il limite di galleggiamento del galleggiante (quando sollecitato dalle onde) e per la posizione del sistema il limite di interferenza del sistema con il fondale. Si è variata anche la distanza pala galleggiante (D_{pg}), calcolata come la distanza effettiva orizzontale tra il bordo posteriore del galleggiante e il montante della pala, e l'affondamento della pala, in posizione verticale a piombo, in acqua ferma (d).

Si è deciso di iniziare le prove sperimentali da questa configurazione:

- Galleggiante semisferico, in plastica
- l_1 0.67 m
- l_2 0.41 m
- b_2 0.24 m
- D_{pg} 0.08 m

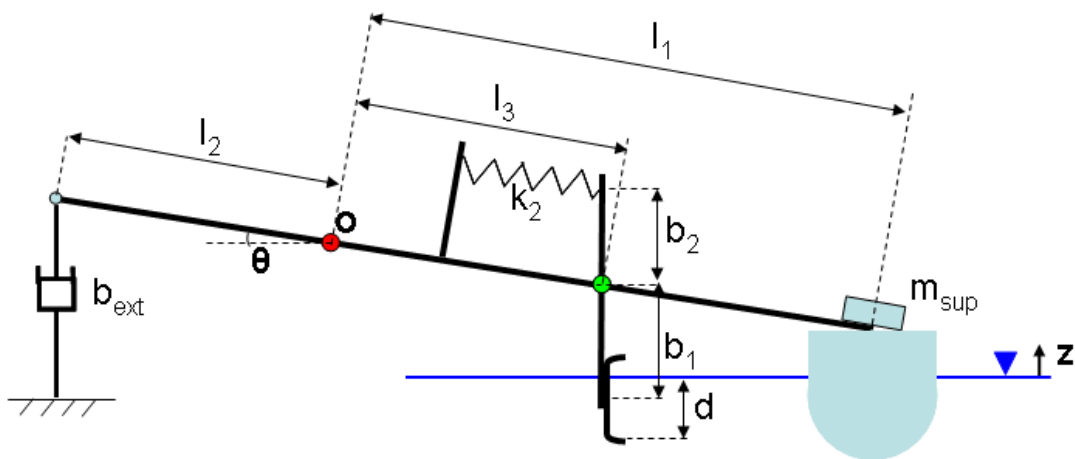


Fig. 4.8: Schema del secondo modello EDS

La migliore condizione di funzionamento è stata definita come la condizione per la quale risultasse massimo il rendimento attualmente sfruttabile dal prototipo di trasformazione di energia: come già descritto nel capitolo 3, per quanto riguarda il galleggiante il sistema è in grado di produrre energia solo nella fase di salita dello

stesso. Per completezza si riportano i risultati relativi anche all'energia ottenibile nella fase di discesa del galleggiante.

I risultati saranno qui riportati solamente in forma grafica, per i risultati in forma numerica, con i dati geometrici dei parametri variati, e i dati di forza e spostamento rilevati, si faccia riferimento all'appendice A.

Si noterà che la variazione di un parametro del galleggiante influisce anche sul rendimento della pala, così come la variazione di un parametro relativo alla pala influenzerà anche il rendimento del galleggiante.

4.2.1. *Test sul secondo modello EDS*

- *Massa del galleggiante e distanza dalla linea di costa*

Questo primo set di prove è stato effettuato variando due parametri, la massa supplementare e la distanza dalla linea di costa. Per ogni distanza dalla linea di costa, si è andato ad indagare il rendimento del sistema con diverse configurazioni di massa. Nelle pagine seguenti sono riportati i risultati in forma grafica, suddivisi per set a distanza dalla costa fissata (Fig. 4.9, Fig. 4.10, Fig. 4.11).

A distanza x_s pari a 0.61 m il limite di massa sul galleggiante per cui il sistema lavora correttamente è di 2 kg, in quanto con pesi superiori il galleggiante va a impattare il fondale.

A distanza x_s pari a 1.11 m e 1.61 m il limite di massa è di 3 Kg, in quanto soluzioni con masse superiori portano il galleggiante ad essere ampiamente sommerso dall'onda incidente, situazione non compatibile con il sistema reale. Le prove con m_{sup} pari a 4 Kg, dove realizzate, sono state acquisite e i risultati sono riportati per completezza.

Nell'osservare i risultati si deve tenere in considerazione il limite imposto dal PTO realizzato da Tecnomac, ovvero l'impossibilità di sfruttare la fase di discesa (G-Down) del galleggiante. Nel riepilogare le prove seguenti non si è evidenziata questa distinzione, in quanto le crescite del rendimento sfruttabile e del rendimento totale sono concordi, e riportare entrambi i grafici non fornirebbe informazioni ulteriori rispetto alle scelte effettuate.

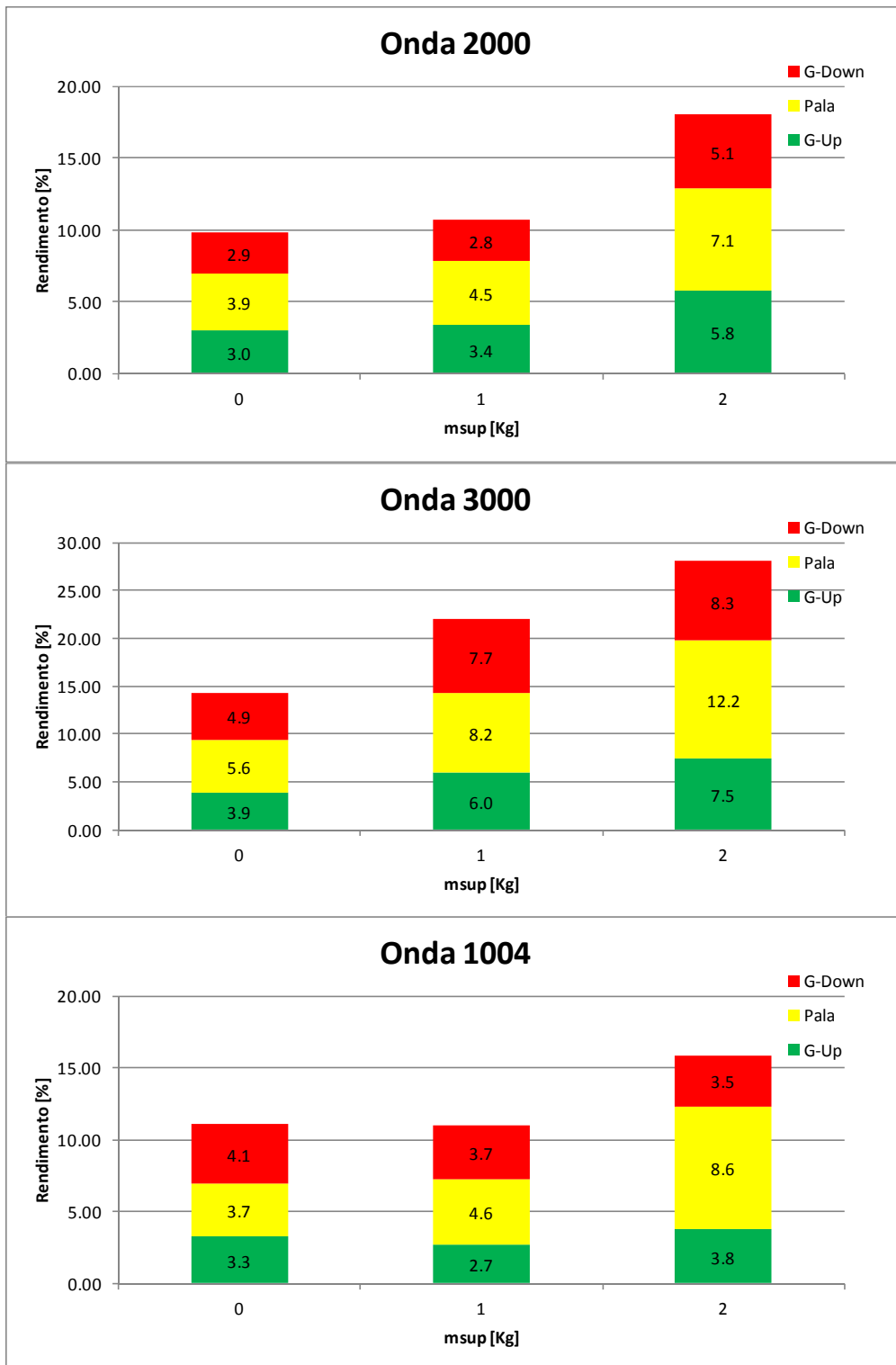


Fig. 4.9: Rendimento al variare della massa supplementare ($x_s = 0.61$ m)

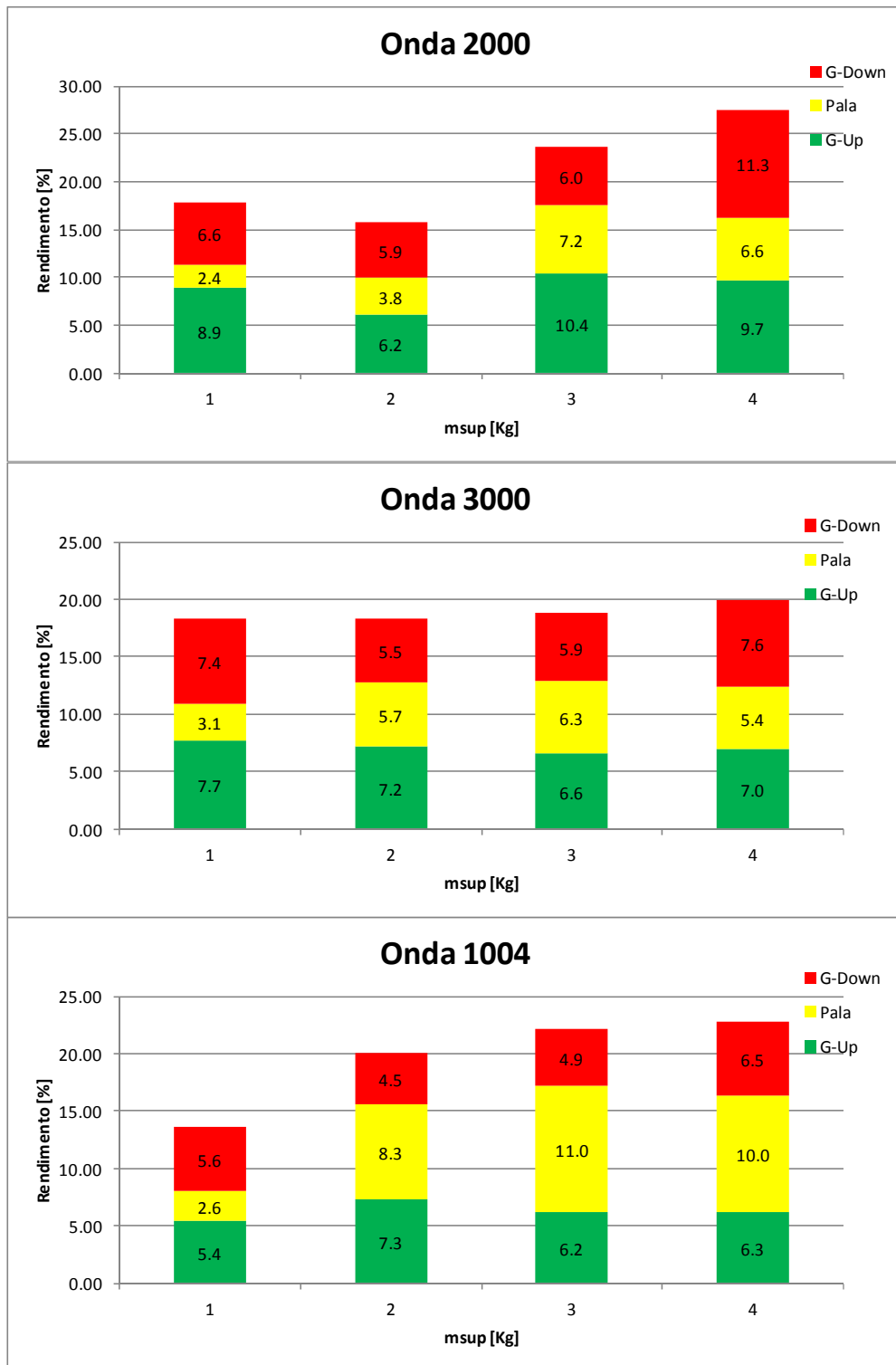


Fig. 4.10: Rendimento al variare della massa supplementare (xs = 1.11 m)

Test Sul Modello EDS

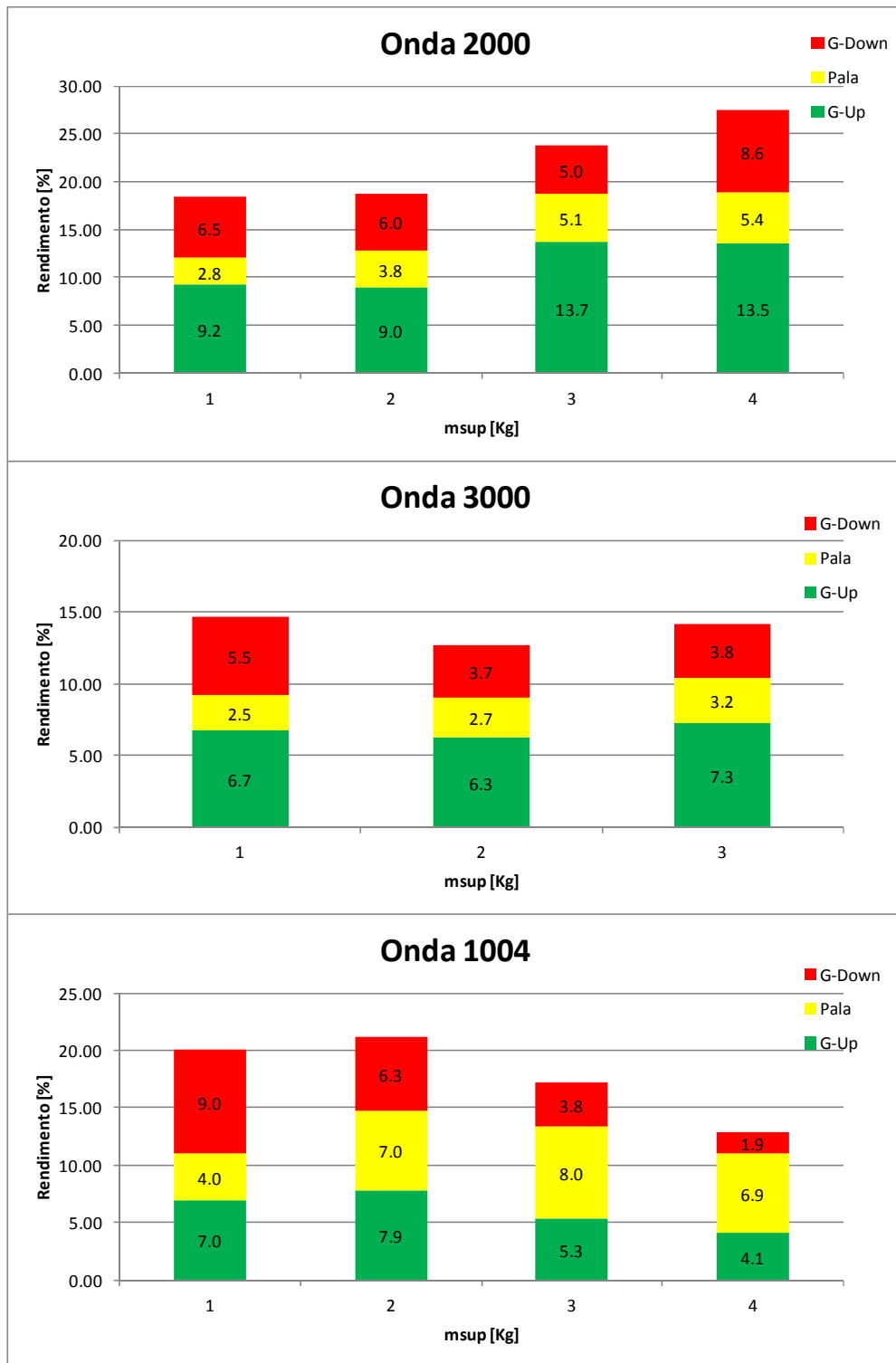


Fig. 4.11: Rendimento al variare della massa supplementare (xs = 1.61 m)

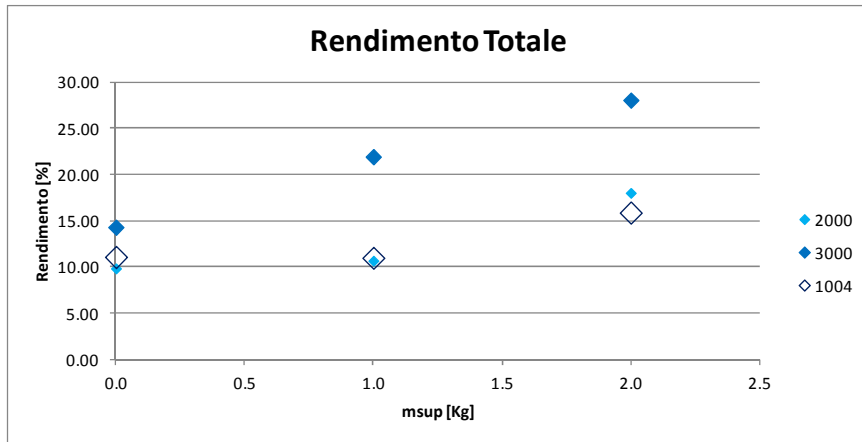


Fig. 4.12: Riepilogo (xs = 0.61 m)

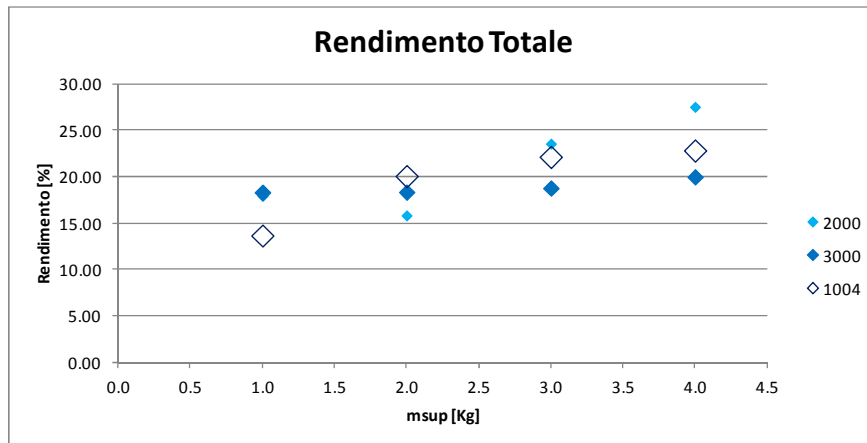


Fig. 4.13: Riepilogo (xs = 1.11 m)

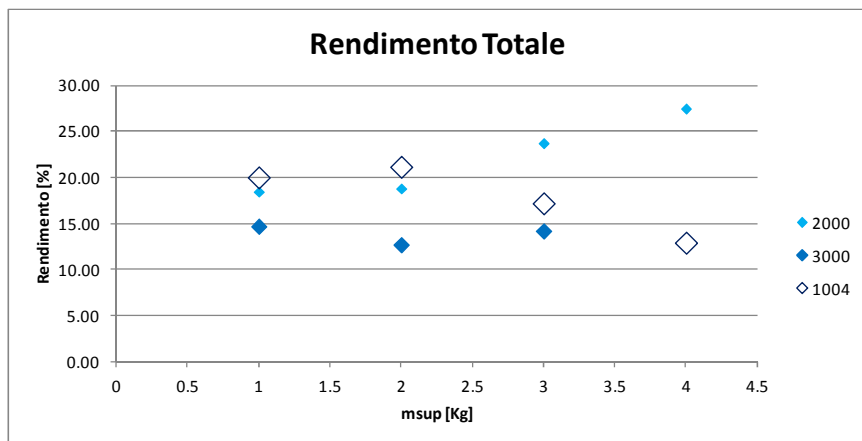


Fig. 4.14: Riepilogo (xs = 1.61 m)

Di seguito si riportano i risultati, visti sopra, in funzione della distanza dalla linea di costa (x_s), per le prove con m_{sup} pari a 2 e 3 Kg

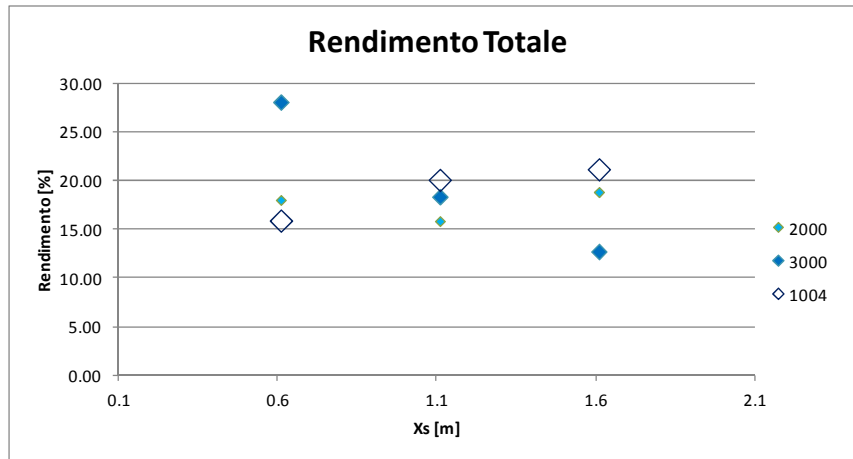


Fig. 4.15: Rendimento in funzione di x_s con $m_{sup}=2Kg$

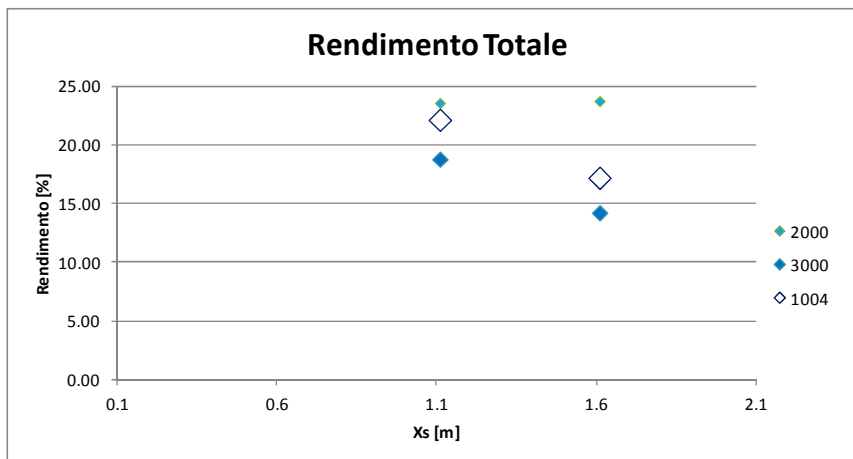


Fig. 4.16: Rendimento in funzione di x_s con $m_{sup}=3Kg$

Nonostante il rendimento vicino alla costa sia superiore (Fig. 4.15), per l'onda 3000, si è scelto di proseguire la sperimentazione con x_s pari a 1.1 m, per poter sfruttare pienamente l'aumento di rendimento osservabile all'aumentare del peso sul galleggiante. Osservando le Fig. 4.12, Fig. 4.13, Fig. 4.14 si nota infatti un miglioramento netto del rendimento al crescere della m_{sup} . La soluzione preferita è

stata quella con m_{sup} pari a 3 Kg, avendo discusso i problemi relativi all'utilizzo di 4 Kg.

Si può notare in Fig. 4.16 come il rendimento per le onde più alte crolli allontanandosi dalla linea di costa, con m_{sup} paria 3 Kg, e non registri incrementi sensibili per l'onda più piccola (2000), che giustifica la scelta di fissare x_s pari a 1.1 m.

- ***Affondamento della pala e distanza pala-galleggiante***

Mantenendo fisse la posizione e la massa supplementare trovate precedentemente, si è deciso di indagare l'influenza dell'affondamento della pala sul rendimento della macchina.

Gli affondamenti della pala provati corrispondono all'immersione per il 25%, 50%, 75% e 100% dello sviluppo verticale della pala, in acqua ferma. Per poter visualizzare se esiste un trend nel comportamento del sistema, si è scelto di ripetere le stesse prove per tre differenti distanze tra pala e galleggiante (D_{pg}). Si noti che per il terzo set di prove, quelle con D_{pg} maggiore, non è stato possibile effettuare prove con la pala interamente immersa: allontanando il perno della pala dal galleggiante, questo viene a trovarsi a una quota, rispetto al pelo libero, superiore a quella che ha con D_{pg} inferiori (a causa dell'inclinazione dell'asta principale), e, di conseguenza, anche sfruttando l'intera lunghezza disponibile del braccio della pala, b_1 , risulta impossibile immergerla interamente.

Si può osservare come aumentando l'immersione della pala, il rendimento della stessa cresca, per poi decrescere quando la pala risulta interamente immersa. Osservando il movimento della pala durante le acquisizioni, si è notato che questo comportamento è dovuto al fatto che la pala immersa interamente viene sormontata ampiamente dall'onda incidente; se immersa per il 75% invece, la pala, viene interamente investita dall'onda senza esserne sensibilmente sormontata.

Contrariamente al set di prove precedente, nella serie di risultati di questo paragrafo rendimento sfruttabile e rendimento totale non hanno andamento sempre concorde, per questa ragione il riepilogo delle prove sarà riportato, sia in termini di rendimento totale che in termini di rendimento sfruttabile.

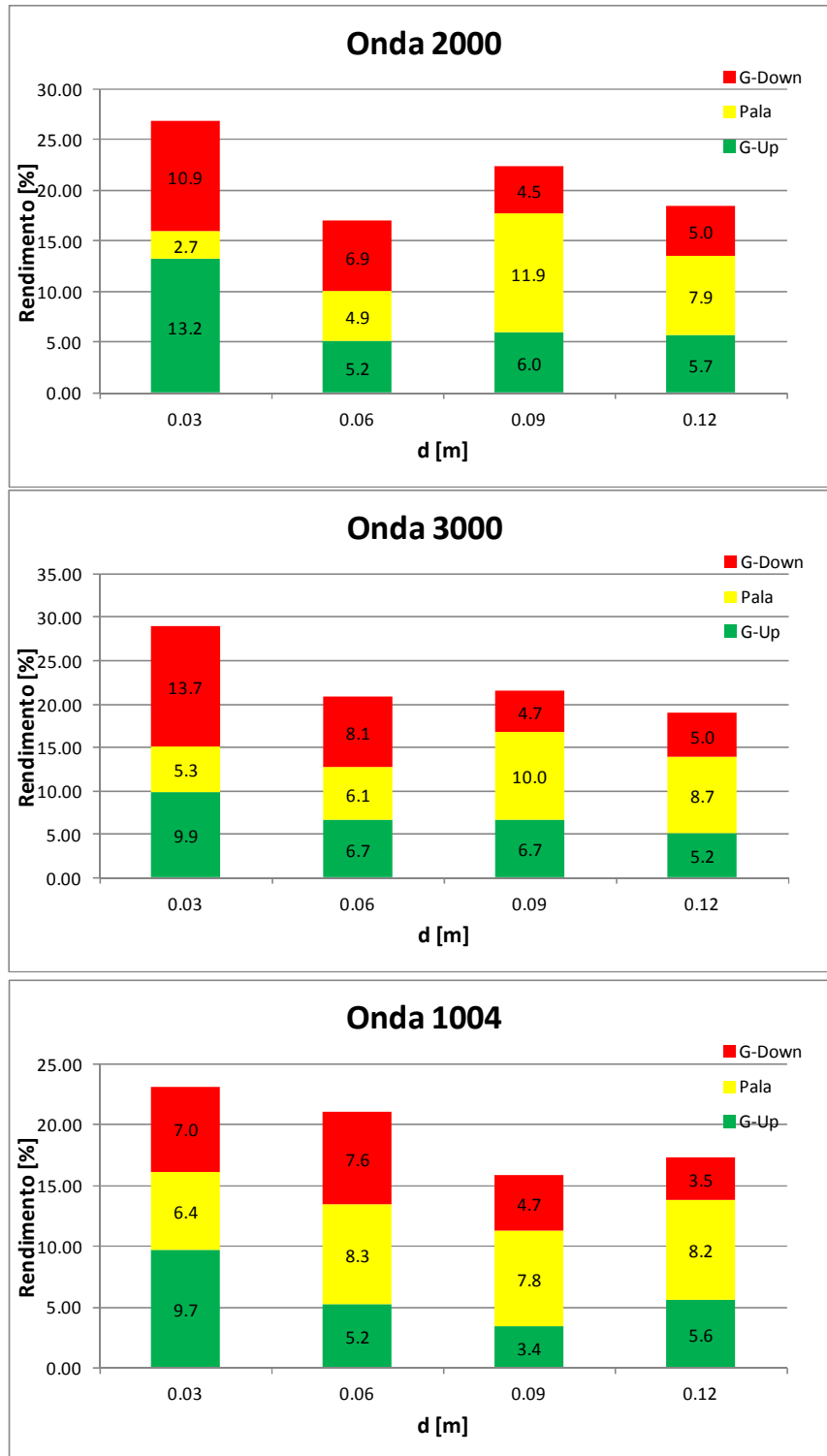


Fig. 4.17: Variazione dell'affondamento della pala in acqua ferma ($D_{pg}=0.04$ m)

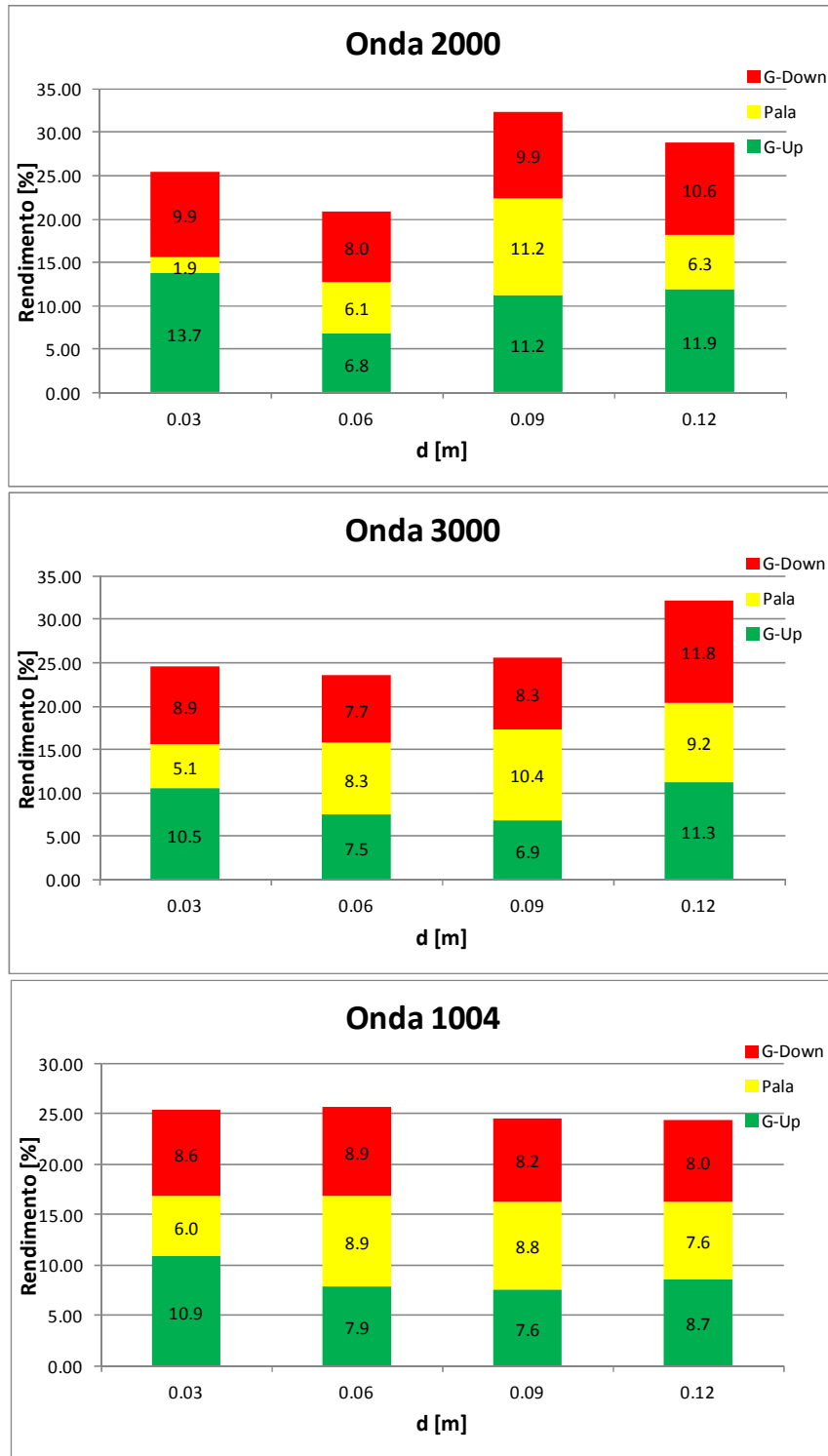


Fig. 4.18: Variazione dell'affondamento della pala in acqua ferma ($D_{pg}=0.106\text{ m}$)

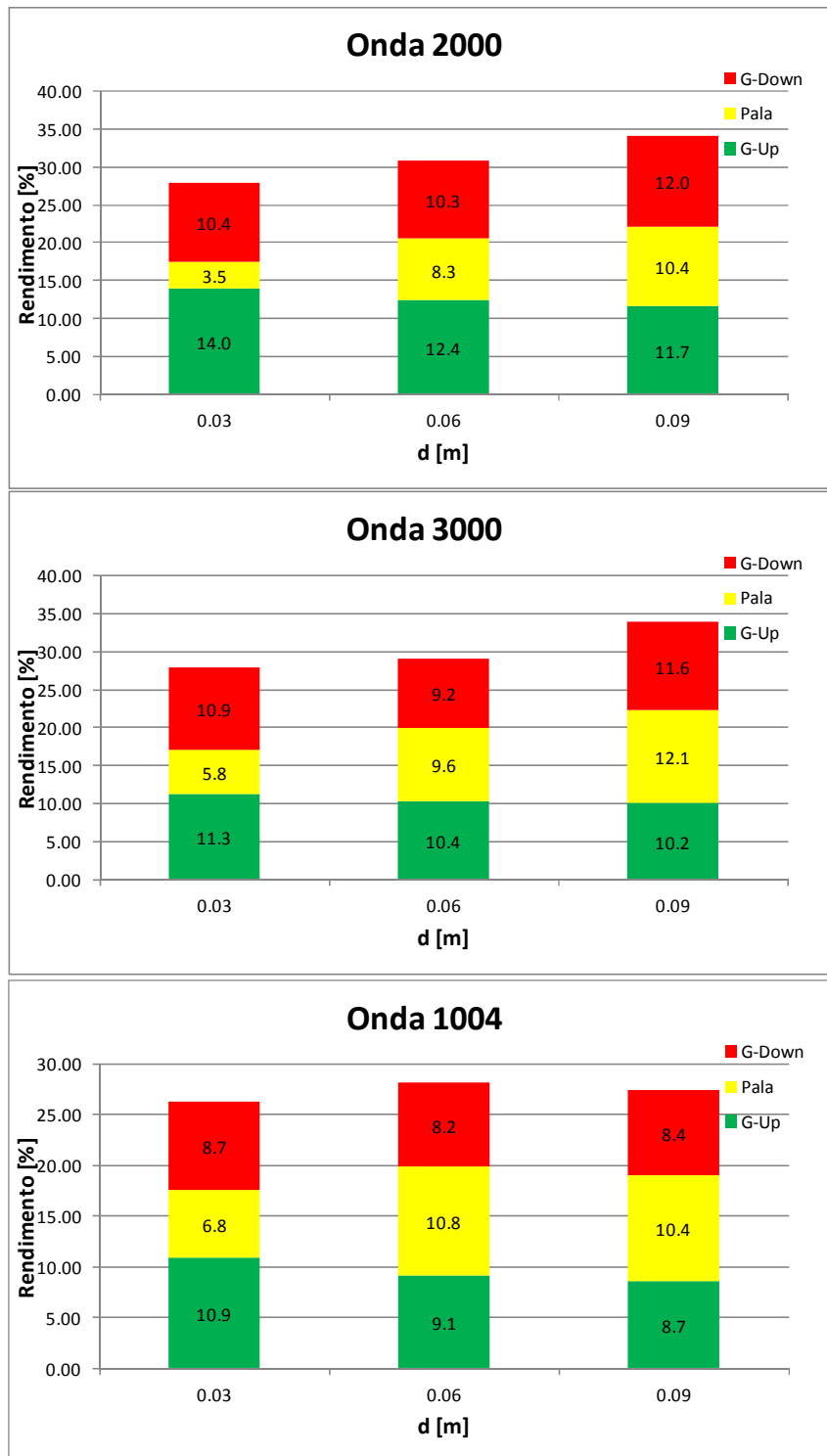


Fig. 4.19: Variazione dell'affondamento della pala in acqua ferma ($D_{pg}=0.186$ m)

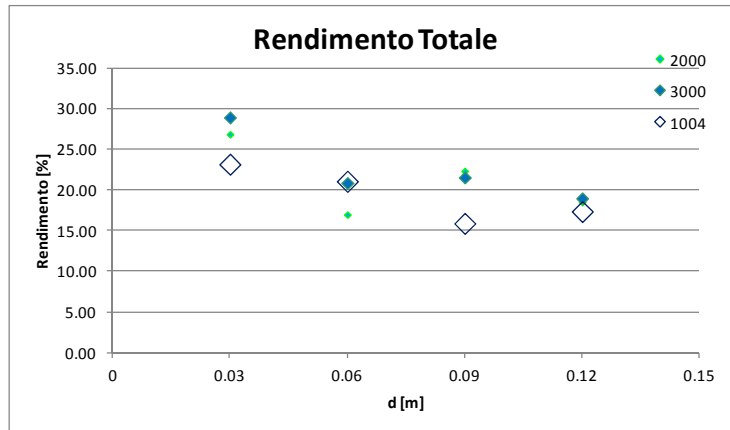


Fig. 4.20: Riepilogo per Dpg=0.04 m

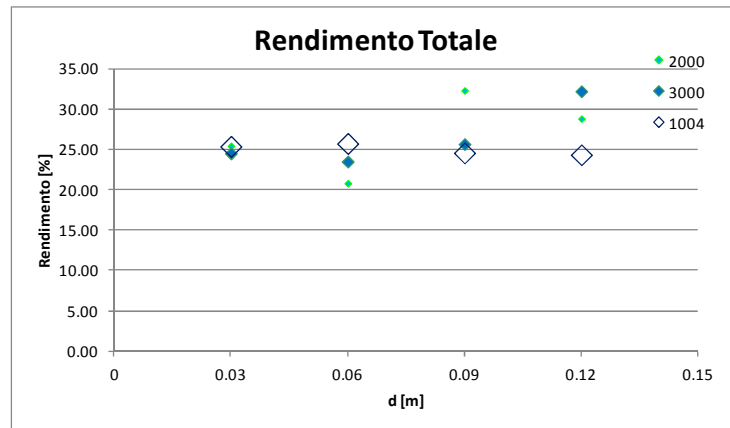


Fig. 4.21: Riepilogo per Dpg=0.106 m

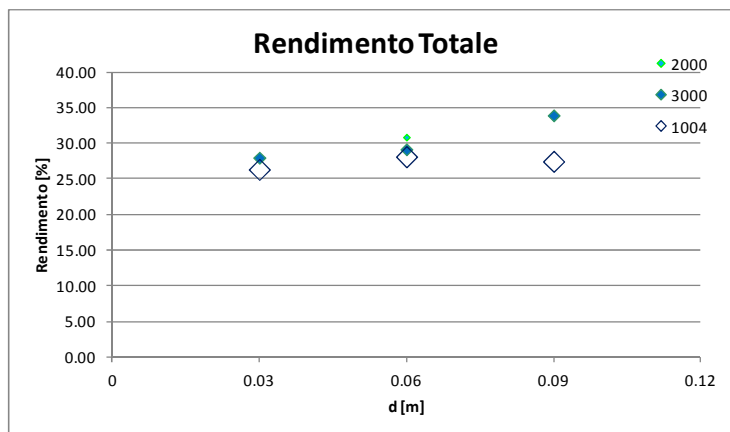


Fig. 4.22: Riepilogo per Dpg=0.186 m

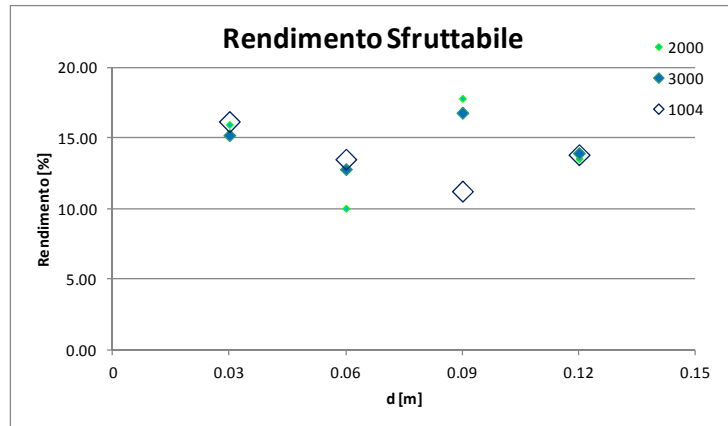


Fig. 4.23: Riepilogo per Dpg=0.04 m (sfruttabile)

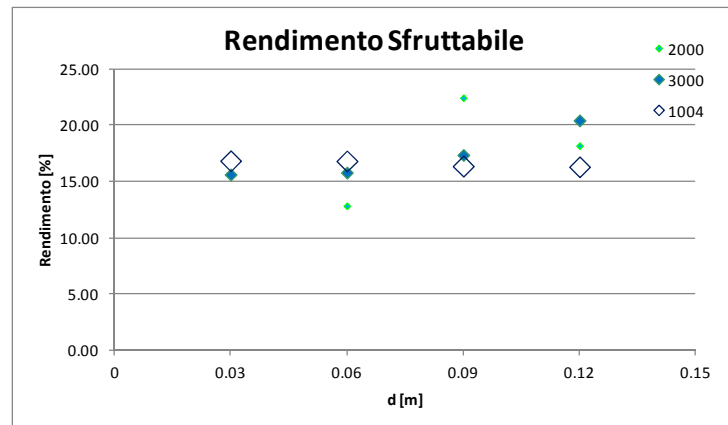


Fig. 4.24: Riepilogo per Dpg=0.106 m (solo rendimento sfruttabile)

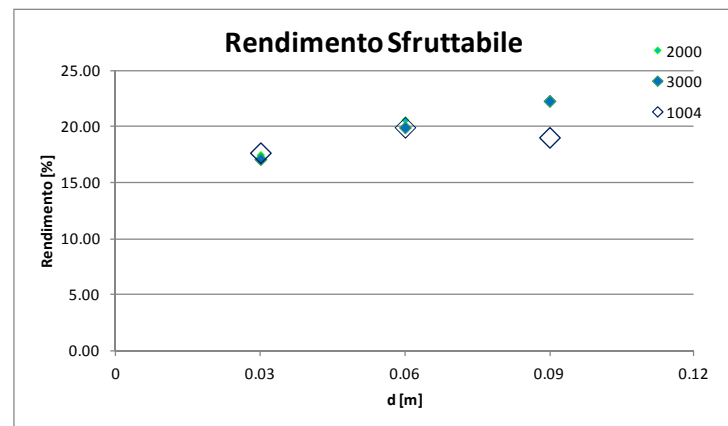


Fig. 4.25: Riepilogo per Dpg=0.186 m (sfruttabile)

Osservando i risultati si è deciso di utilizzare un affondamento di 0.09 m, in quanto è quello che permette di ottenere risultati migliori con l'onda 2000, che risulta essere l'onda più frequente nel mar Mediterraneo, tra quelle considerate. Si riporta, per d , pari a 0.09 m, l'andamento dei risultati al variare della distanza pala galleggiante.

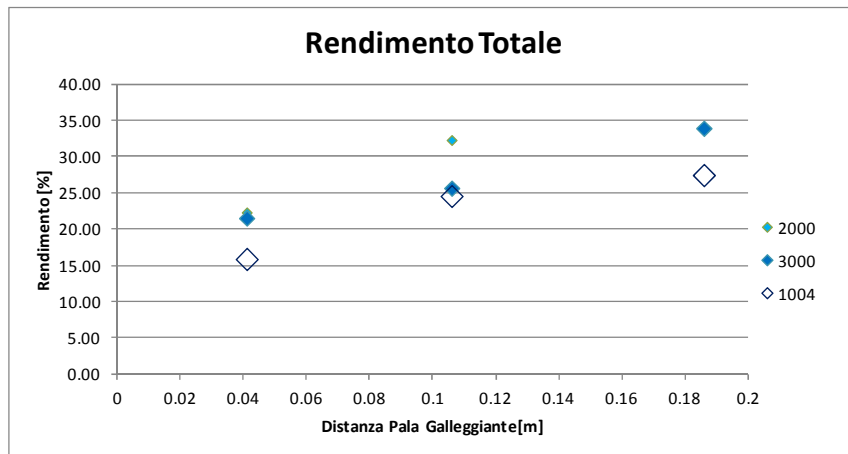


Fig. 4.26: Riepilogo per D_{pg} Variabile

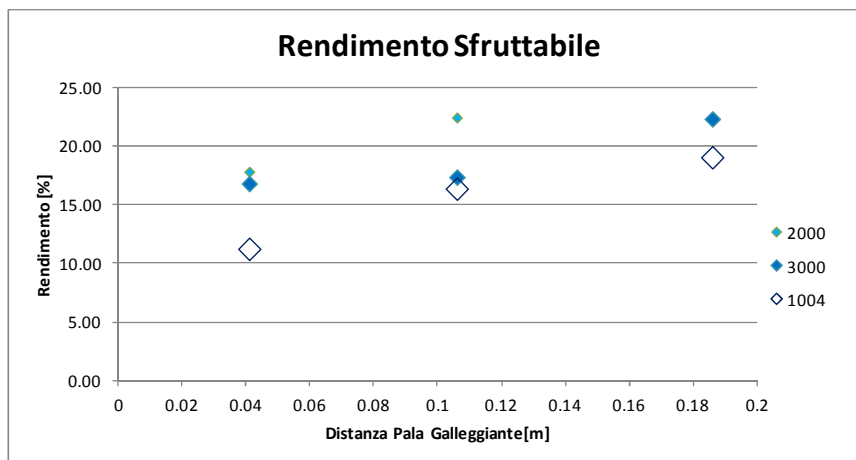


Fig. 4.27: Riepilogo per D_{pg} Variabile (sfruttabile)

Osservando i risultati in funzione di D_{pg} si può notare come un eccessivo avvicinamento della pala al galleggiante provochi dei disturbi al funzionamento di entrambi e dunque dei risultati peggiori in termini di rendimento.

Non è stato possibile aumentare ulteriormente D_{pg} mantenendo $d = 0.09$ m, per le ragioni esposte precedentemente riguardo l'impossibilità di immergere interamente la pala per D_{pg} elevati.

L'onda 2000 è quella che permette il maggior rendimento assoluto in confronto ai rendimenti ottenibili con le altre onde. Questo accade perché vi è una dipendenza tra la dimensione d'onda e la dimensione del galleggiante ideale per massimizzare il rendimento per ciascuna onda. Onde più grandi (3000, 1004) necessitano di galleggianti di dimensioni maggiori per essere sfruttate maggiormente.

- ***Inclinazione del dinamometro e dell'asta principale***

Nei test precedenti la molla della pala era inclinata come l'asta del galleggiante senza una reale giustificazione, ma solo per comodità pratica; si è voluto verificare se questo parametro influenza il rendimento del sistema. Per effettuare questa prova sono stati eseguiti dei test mantenendo la molla in posizione orizzontale. La scelta di mantenere la molla orizzontale è giustificata dal fatto che, essendo la pala verticale in posizione di riposo, il movimento di questa, quando viene impattata dall'onda, è circa orizzontale, e quindi nella stessa direzione dell'allungamento della molla in questa nuova posizione. Si può osservare dai risultati ottenuti che la soluzione con molla orizzontale, oltre a essere fisicamente giustificata, porta ad ottenere risultati migliori, sia per il rendimento della pala, sia per il rendimento totale.

Successivamente sono state effettuate delle prove al variare dell'angolo a riposo dell'asta principale rispetto all'orizzontale.

Per problemi di assemblaggio, in questa serie di test, la distanza pala galleggiante (D_{pg}) è stata fissata pari a 13 cm. Per poter variare l'angolo si è sfruttata la possibilità di alzare o abbassare il perno intorno a cui bascula l'asta. L'angolo di 26° corrisponde alla quota più bassa imponibile al perno, mentre l'angolo di 42° rappresenta il limite entro cui si poteva mantenere $d = 0.09$ m e $D_{pg} = 0.13$ m.

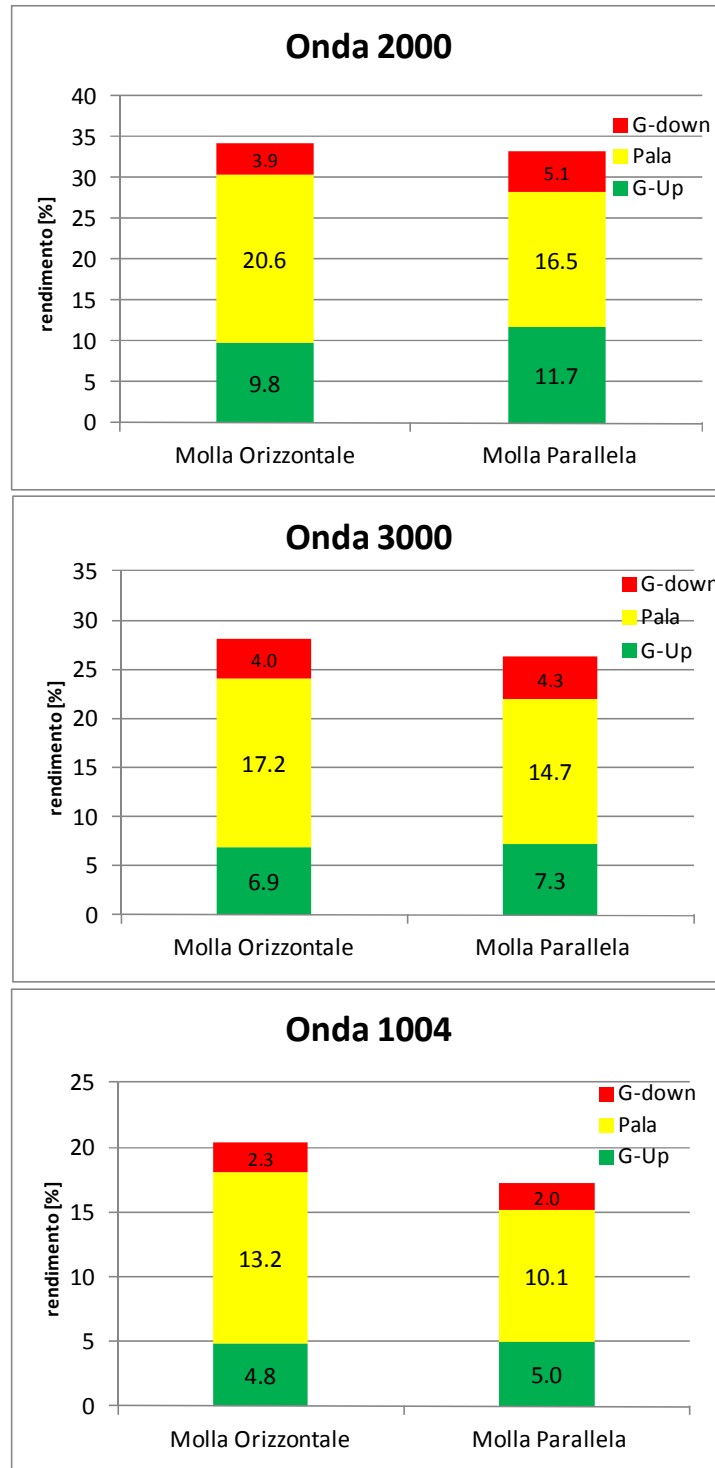


Fig. 4.28: Confronto Molla Orizzontale e Parallela all'asta del galleggiante

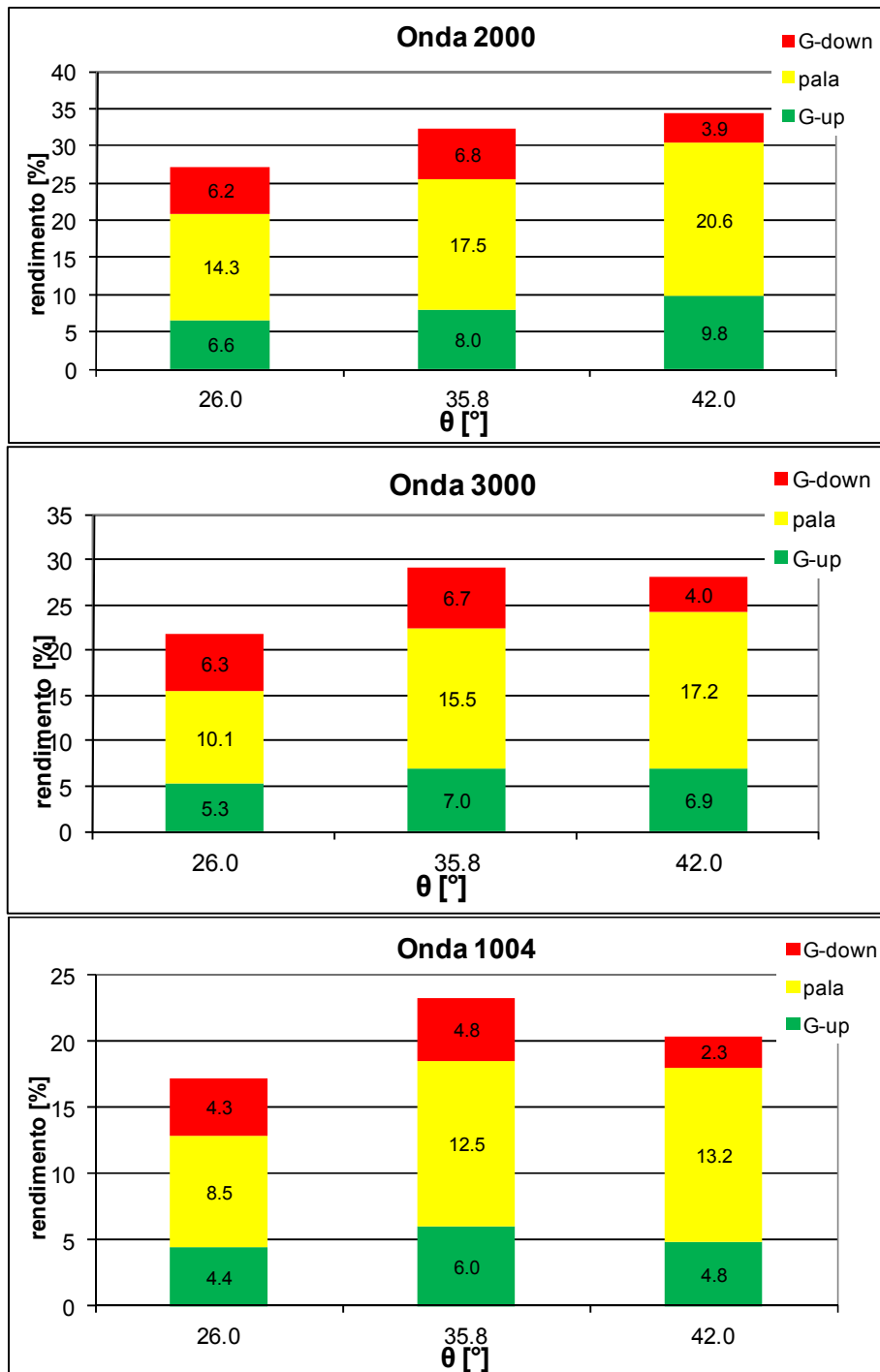


Fig. 4.29: Variazione dell'angolo a riposo

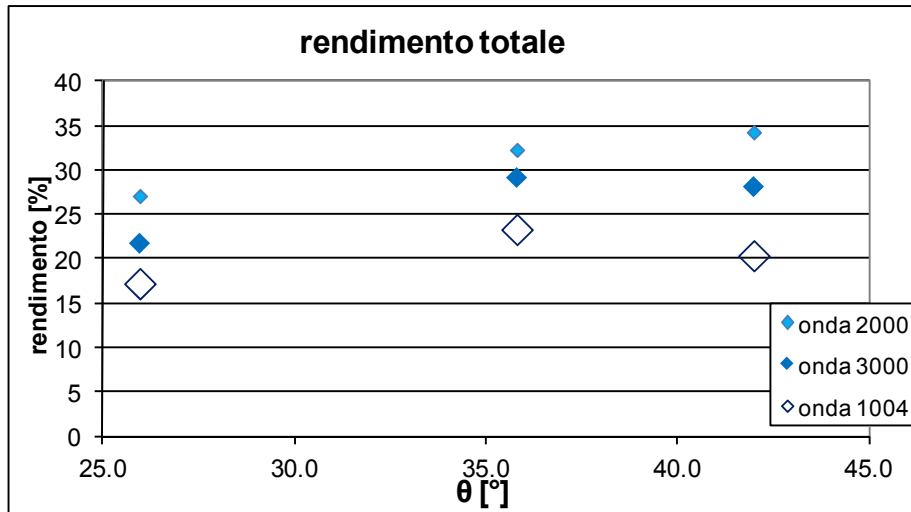


Fig. 4.30: Riepilogo Variazione dell'angolo a riposo

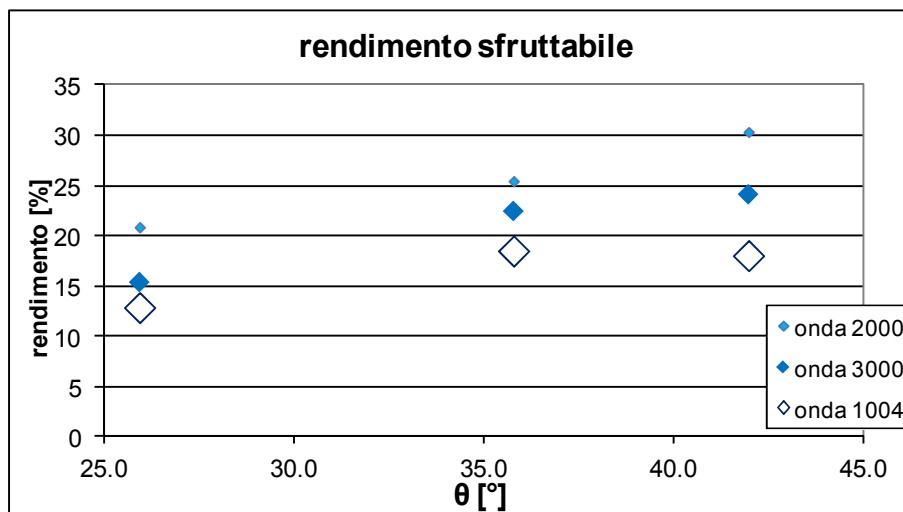


Fig. 4.31: Riepilogo Variazione dell'angolo a riposo(Sfruttabile)

I grafici evidenziano come il rendimento della pala aumenta con l'inclinazione dell'asta del galleggiante. Questo risultato non era a priori ipotizzabile, e non si è individuata la causa fisica che lo giustifica.

È interessante notare come all'aumentare dell'inclinazione dell'asta del galleggiante, l'energia assorbita nella fase di salita del galleggiante cresce a discapito di quella in discesa (non sfruttabile con l'attuale sistema di trasformazione). Si tratta di un risultato inaspettato, in quanto si ipotizzava che lo smorzatore lavorasse meglio se l'asta fosse stata più vicina all'orizzontale.

Se invece si considera il rendimento del galleggiante (G-up + G-down), si può osservare come il rendimento presenti un valore massimo 35.8°, tra le tre posizioni testate.

Si nota facilmente che per l'onda 2000 (più piccola) il rendimento (sia totale che sfruttabile) cresce al crescere dell'angolo. Questo trend si verifica anche con l'onda 3000, per quanto riguarda il rendimento sfruttabile, mentre si ha un calo (lieve per quanto riguarda il rendimento sfruttabile, più marcato nel rendimento totale) per l'onda 1004. Come già detto in precedenza, essendo l'onda 2000 quella con frequenza più alta nel Mediterraneo si è preferito orientarsi verso soluzioni per cui risultasse massimizzato il rendimento per quest'onda. Inoltre si può osservare come l'onda 2000 sia quella che garantisce anche rendimenti migliori.

In seguito sono state eseguite delle modifiche alla struttura della pala, non potendo inizialmente mantenere costante l'immersione (d) e la distanza (D_{pg}) aumentando l'angolo fino a 42°.

Per ottenere una conferma dei risultati precedentemente ottenuti allontanando la pala dal galleggiante, si è posizionata la pala a 0.16 m dal galleggiante, nuovo limite della struttura della pala compatibilmente con la scelta di θ pari a 42°, ottenendo, come ipotizzabile dai risultati delle prove precedenti, un miglioramento dei risultati all'aumentare di D_{pg} .

I risultati di queste prove sono riportati in Fig. 4.32 nella pagina seguente.

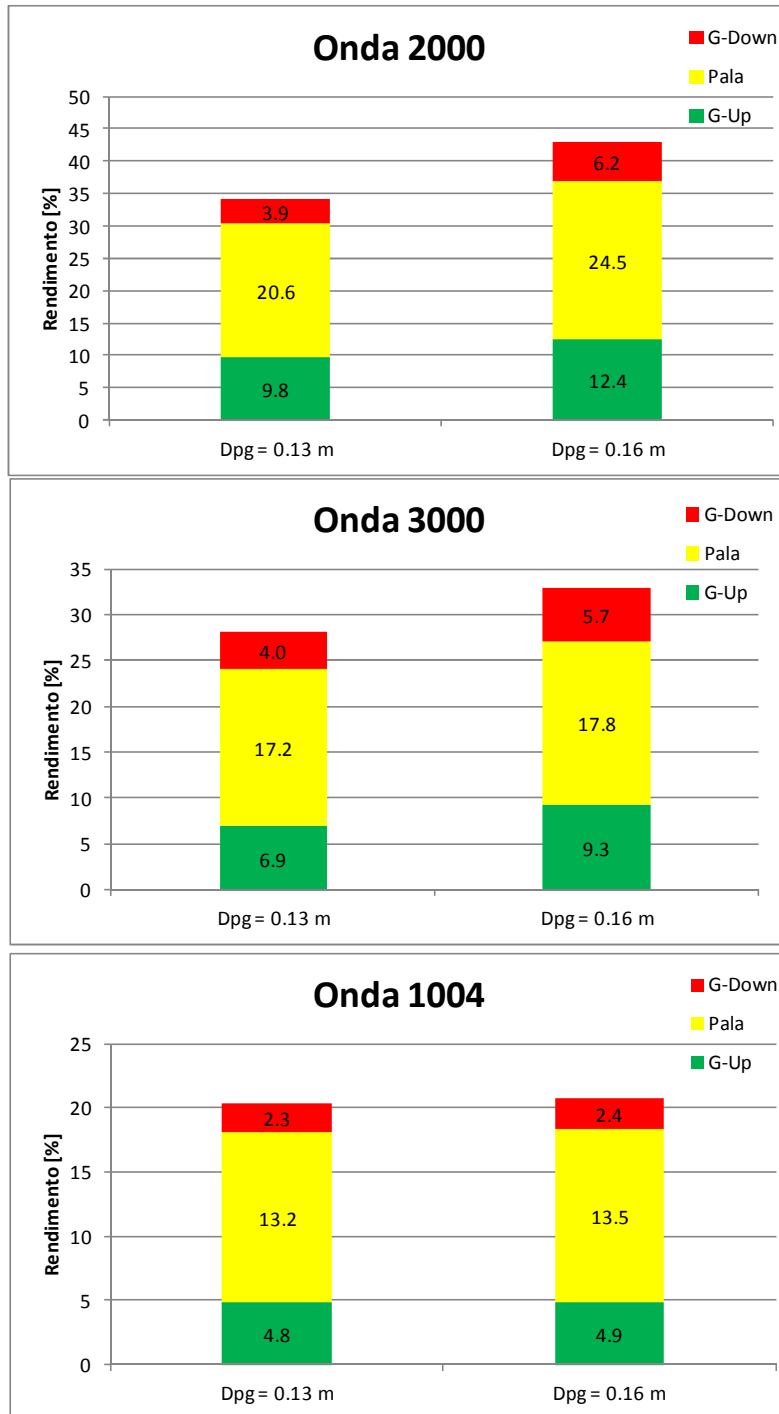


Fig. 4.32: confronto distanze Dpg con $\theta=42^\circ$

- **Posizione di pala e galleggiante rispetto alla costa**

Alla luce dei risultati fin qui ottenuti, si è scelto di fare le prove presentate in questo paragrafo per cercare di capire se il miglioramento, evidenziato da questa lieve differenza di distanza pala-galleggiante, fosse effettivamente dovuto all'allontanamento della pala dal galleggiante, oppure all'avvicinamento della pala alla costa (e quindi in una posizione più vantaggiosa per sfruttare l'incipiente frangimento dell'onda).

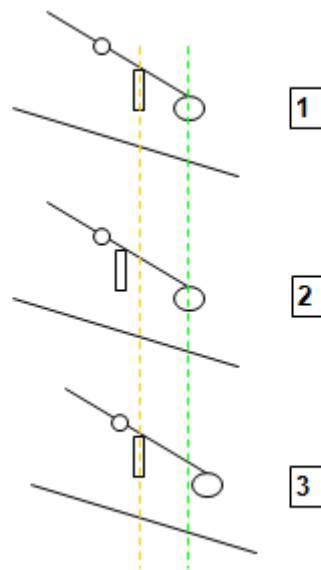


Fig. 4.33: Schema delle posizioni analizzate nel paragrafo precedente

Per comprendere a cosa riferiscono i grafici si faccia riferimento allo schema di Fig. 4.33.

Le configurazioni numero 1 e 2 corrispondono alle prove del paragrafo precedente, ovvero con la D_{pg} variata mantenendo la posizione del galleggiante fissa, la configurazione numero 3 invece è pensata per avere la pala nella stessa posizione rispetto alla costa della condizione 1, ma con D_{pg} pari a quella della configurazione numero 2, pertanto si ottiene una configurazione in cui il galleggiante è a una distanza maggiore dalla linea di costa rispetto alle prove precedenti.

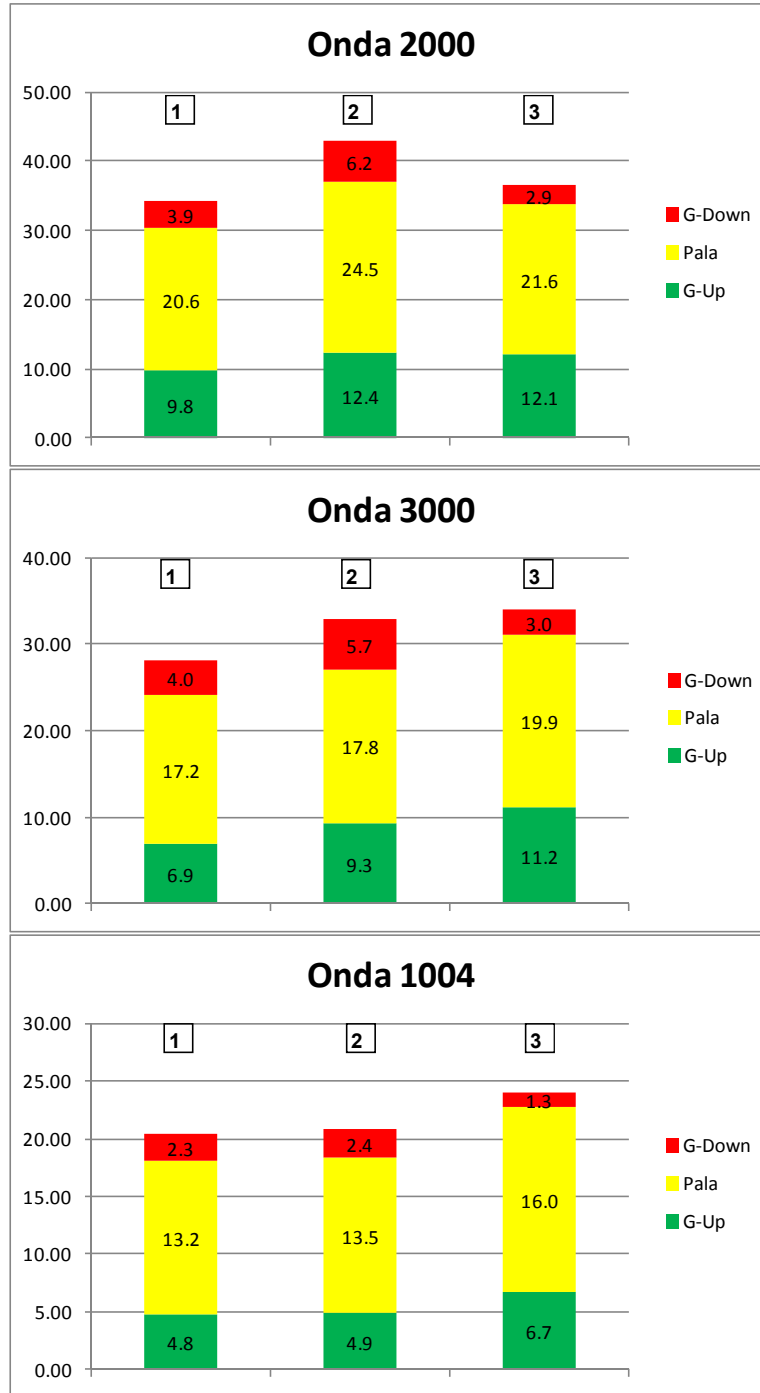


Fig. 4.34: Prove con riferimento a Fig. 4.33

Si può notare come, per l'onda 2000, la configurazione più vantaggiosa è la 2 (quella con la pala più vicina alla riva), mentre per le altre due onde la configurazione 3 è la più vantaggiosa; questo può essere spiegato dal fatto che l'onda 2000 frange più vicina alla costa rispetto alle altre due onde, essendo più piccola.

Le onde 3000 e 1004, essendo più grandi, frangono più lontano dalla costa, quindi la pala posizionata troppo vicino a riva, condizione 2, si trova investita dall'onda in frangimento, che come spiegato nel Cap.2, sta dissipando velocemente energia. Pertanto la potenza disponibile d'onda è inferiore rispetto a quella disponibile con la pala posizionata più lontana dalla linea di costa, a monte del frangimento dell'onda.

- ***Rapporto tra i bracci della pala***

Un ulteriore parametro che potrebbe influenzare il rendimento del sistema è legato alle caratteristiche di ancoraggio della pala che ne determinano la risposta alla forzante dell'onda.

Per verificarlo si è valutata l'influenza della quantità), sul rendimento del sistema:

$$k_2 \frac{b_2}{b_1} \text{ (rappresenta la rigidezza effettiva della pala)}$$

Per variare il parametro si è scelto di variare solo il braccio b_2 portandolo al minimo valore compatibile con la struttura di sostegno della pala.

Osservando i risultati di Fig. 4.35, si può affermare che, tra i due valori provati, il valore maggiore di $k_2 \frac{b_2}{b_1}$ aumenta il rendimento della pala, ma diminuisce sensibilmente quello del galleggiante, sia in fase di salita che di discesa.

Questo è dovuto al fatto che l'impatto dell'onda sulla pala si ripercuote sulla rotazione dell'asta del galleggiante, una maggior rigidezza, pur permettendo uno sfruttamento maggiore della pala, rende maggiore questo effetto sul galleggiante influenzandone notevolmente il movimento, e il rendimento.

Nel complesso, il valore più basso di $k_2 \frac{b_2}{b_1}$ testato, dà i migliori risultati.

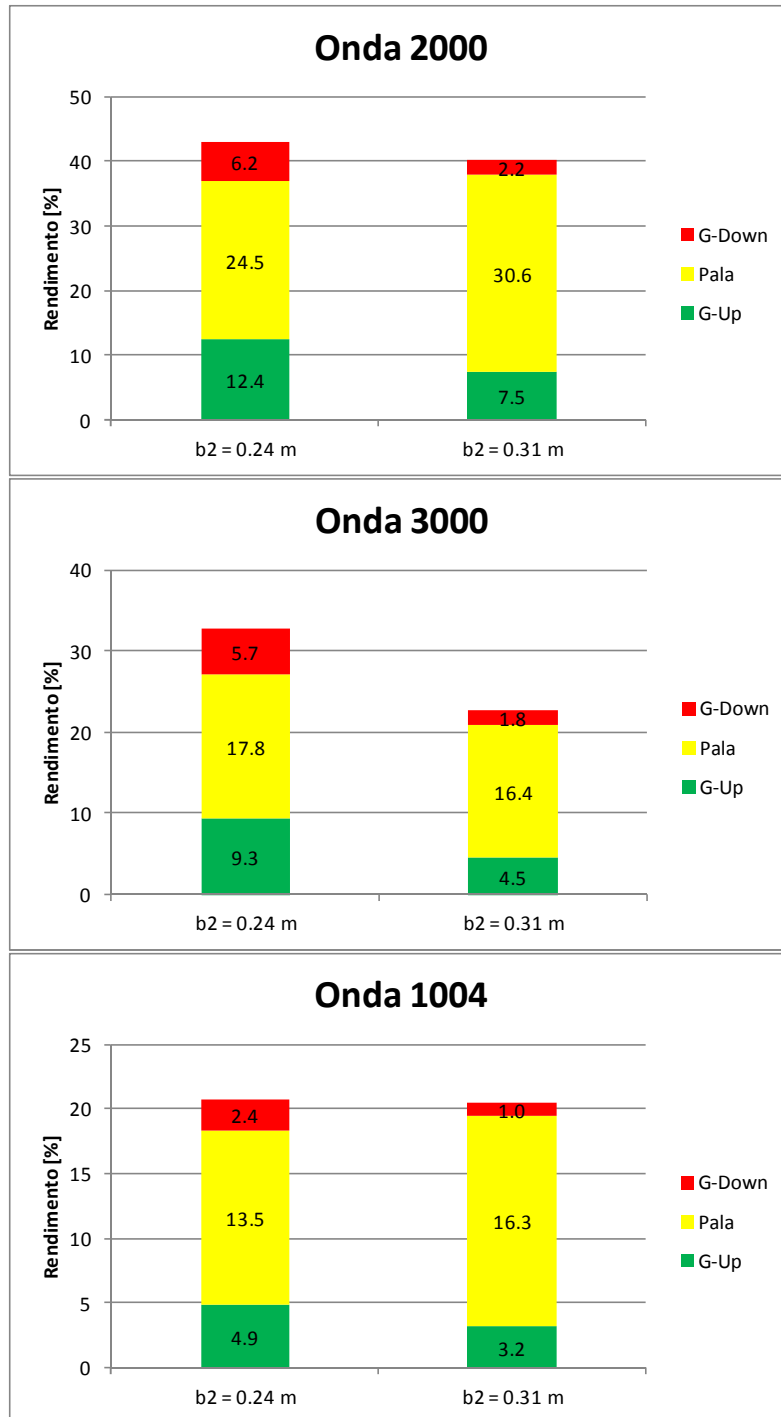


Fig. 4.35: Variazione della rigidità equivalente della molla tramite il parametro b_2

I risultati di queste prove evidenziano ancora una volta come il rendimento del sistema sia influenzato da numerosi parametri e molti di questi sono legati al sistema di trasformazione dell'energia. Nel sistema reale, la molla sarà sostituita da uno smorzatore, e ugualmente il rapporto $b_{2eq} \frac{b_2}{b_1}$ influirà sulla quantità di energia assorbita dalla pala. Queste prove dunque sono da considerarsi indicative, in quanto una valutazione corretta di questo effetto dovrà essere effettuata dotando la pala di un appropriato sistema di smorzamento similmente a quanto fatto per il galleggiante.

- ***Massa supplementare da entrambi i lati della cerniera***

Si è voluta effettuare una prova appesantendo il sistema, nella configurazione migliore trovata. Questa prova è stata effettuata per valutare l'effetto dell'aumento di inerzia del sistema a parità di inclinazione dell'asta principale. Per fare ciò è stata aggiunta una massa da entrambi i lati della cerniera:

- 1 kg a 36 cm dal perno verso lo smorzatore
- 1 kg a 33.5 cm dal perno verso il galleggiante

In aggiunta ai 3 Kg posizionati sul galleggiante come nelle prove precedenti.

I risultati indicano una maggior resa per il sistema con minore inerzia, ovvero più leggero. Tuttavia, non potendo misurare sperimentalmente la frequenza naturale del sistema (lo smorzatore impedisce al sistema di compiere più di una oscillazione in acqua ferma), non si è stati in grado di verificare se questa soluzione avvicina o allontana la frequenza naturale del sistema da quella dell'onda incidente.

Come detto nel capitolo 2, teoricamente la condizione in cui le due frequenze coincidono è quella che massimizza l'energia assorbibile dal galleggiante.

Nel caso del sistema EDS la teoria non è applicabile a priori, in quanto pala e galleggiante si influenzano a vicenda, motivo per cui sarebbe necessario studiare il sistema con uno smorzatore che abbia uno smorzamento inferiore; in questo modo si potrebbe calcolare la frequenza in acqua ferma del modello al variare della posizione e del valore delle masse, operando così da poter sviluppare un set di prove in funzione del rapporto tra la frequenza naturale del sistema e quella dell'onda incidente.

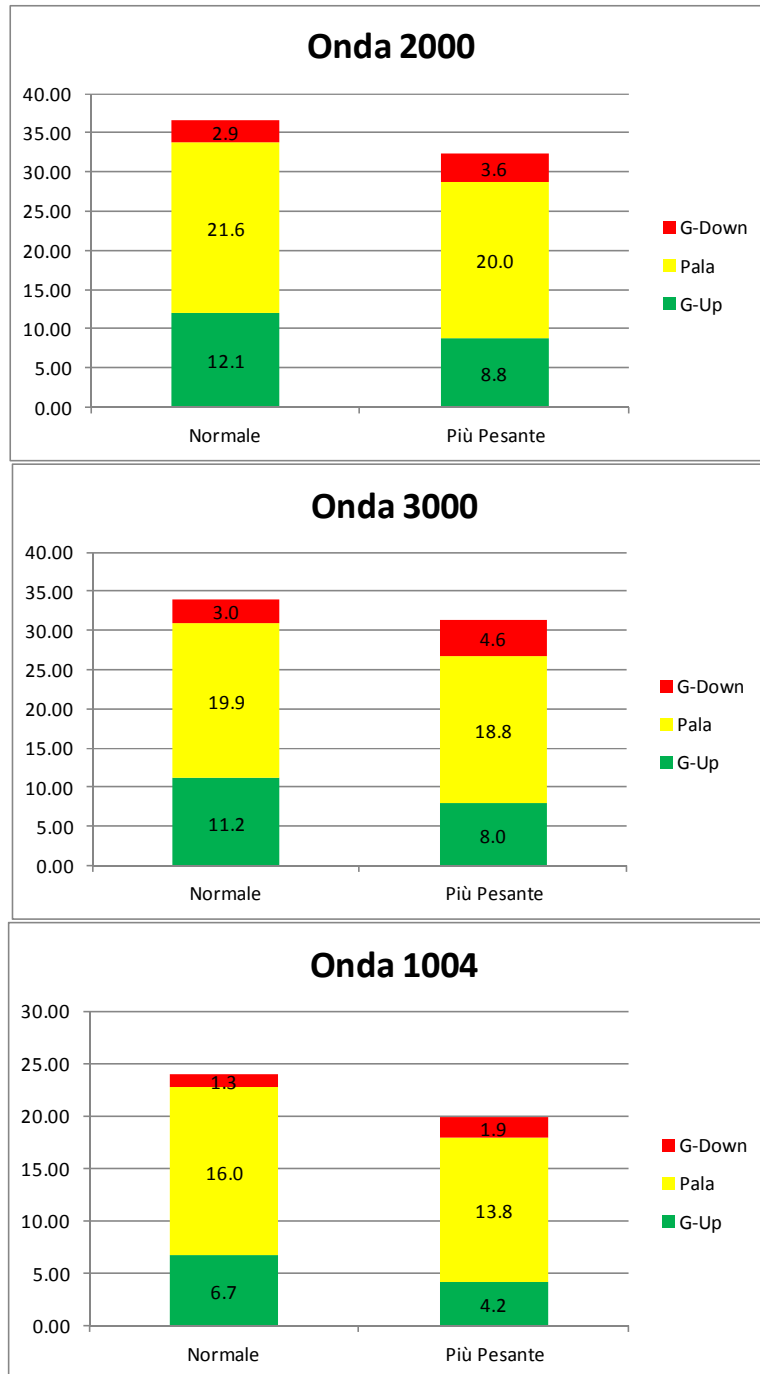


Fig. 4.36: Sistema con più inerzia e sistema normale

- **Forma della pala**

Nella migliore condizione di funzionamento raggiunta fino a questo punto è stata poi valutata sperimentalmente anche l'influenza della forma della pala (Fig. 4.37). Per uniformità è stata mantenuta costante la dimensione dell'area di impatto frontale (20X12 cm) delle diverse pale considerate.

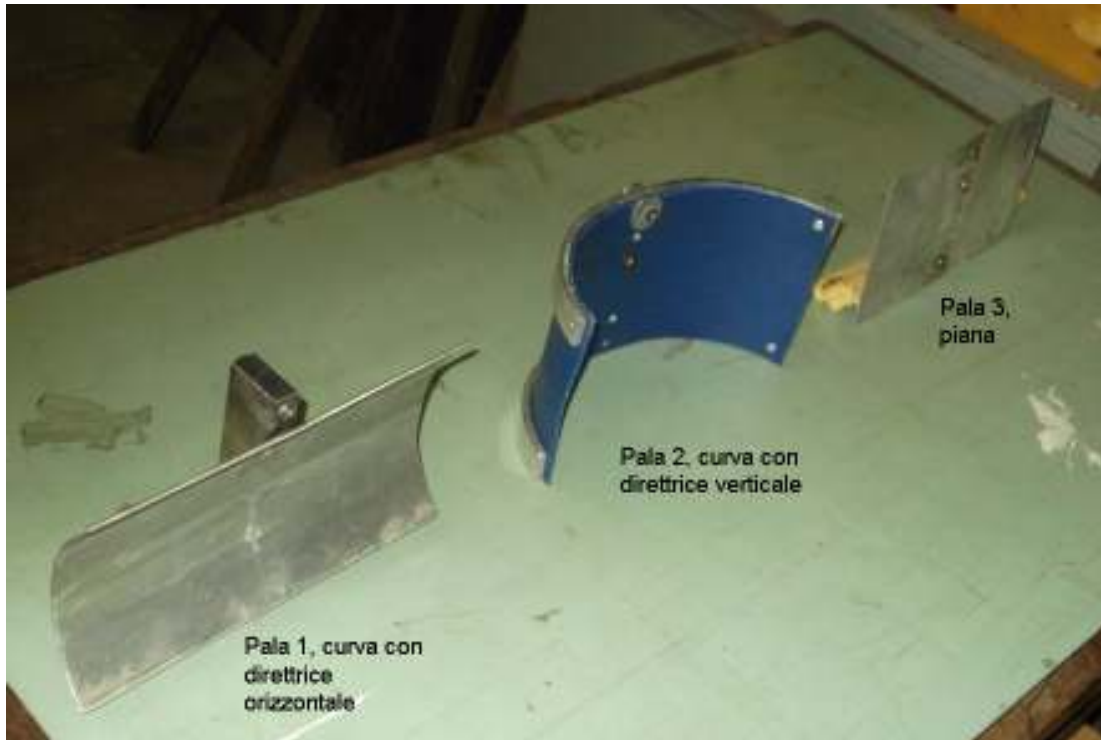


Fig. 4.37: Diversi tipi di pale testate

Come evidenziano i risultati delle prove (Fig. 4.38), la pala 1 (curva con direttrice orizzontale) risulta la configurazione migliore per l'onda 2000, sia per il rendimento della sola pala, sia per quanto riguarda il rendimento sfruttabile dall'attuale sistema di trasformazione Tecnomac, sia per quello totale.

Se si osservano le onde 3000 e 1004, invece, si nota come i rendimenti delle diverse pale non siano molto diversi tra loro. In termini di rendimento totale la pala 3 risulta essere la soluzione migliore. I valori ottenuti con la pala 3 sono poco superiori alle soluzioni con la pala 1, e tali da non giustificare una preferenza per questa pala.

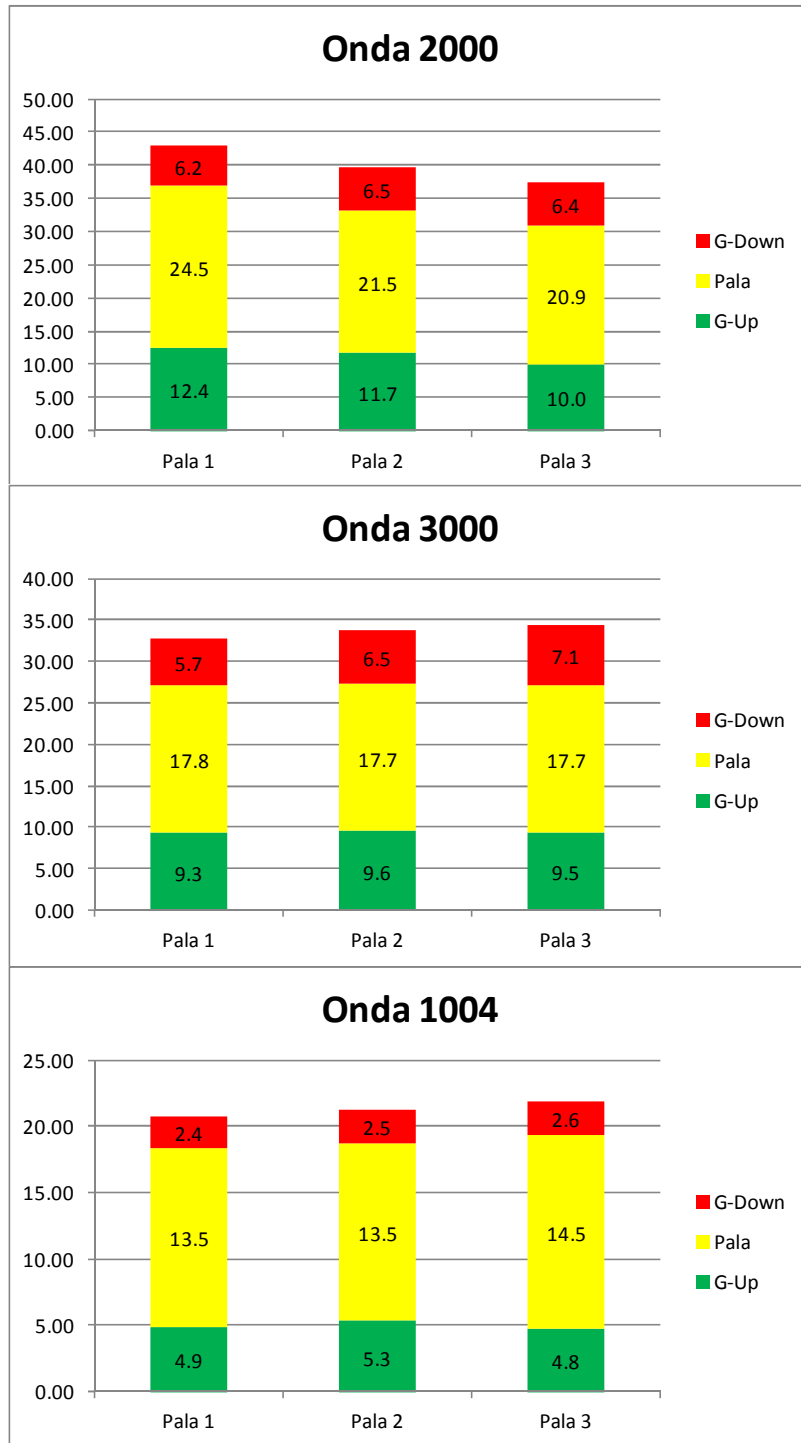


Fig. 4.38: Risultati per pale di forma diversa

4.2.1. Osservazioni sul modello EDS

Dopo aver effettuato queste prove siamo arrivati a una condizione che massimizza le possibilità del modello EDS rispetto all'onda 2000.

In Tab. 4-H: Tabella riassuntiva dell'indagine sul modello EDS si riportano i parametri fissati e quelli variati con i rispettivi valori, e i valori dei parametri variabili per la soluzione ottimale.

Tab. 4-H: Tabella riassuntiva dell'indagine sul modello EDS

	l_1 [m]	l_2 [m]	b_{2eq} [N/m]	α [°]	Masse	Direzione Pala a Riposo	Direzione Smorzamento	Dimensione area frontale
Valori Fissati	0.67	0.41	25	7	Tab. 4-D	Verticale	Verticale	20 x 12
	θ [°]	m_{sup} [Kg]	D_{pg} [m]	d [m]	b_{1eq} [N/(m/s)]	Forma pala	Orientamento molla pala	x_s [m]
Valori indagati	26-36-42	0-1-2-3-4	0.02-0.08-0.13-0.16	0.06-0.09-0.12	12-50	Piatta-Curva direttrice orizzontale- Curva direttrice verticale	Orizzontale-Inclinata	0.6-1.1-1.6
	θ [°]	m_{sup} [Kg]	D_{pg} [m]	d [m]	b_{1eq} [N/(m/s)]	Forma pala	Orientamento molla pala	x_s [m]
Soluzione Ottimale	42	3	0.16	0.09	50	Curva direttrice orizzontale	Orizzontale	1.1

La migliore configurazione raggiunta per il modello EDS è schematizzata in Fig. 4.39. Questa configurazione assicura il miglior comportamento medio del sistema sulle tre onde testate.

In questa configurazione i rendimenti al momento sfruttabili dal sistema EDS (Pala; G-up) variano a seconda dell'onda da un minimo del 23% per l'onda 1004 (potenza 7.9 kW/m) ad un massimo 34 % per l'onda 2000 (potenza 2.2 kW/m). Questi valori che si elevano sfruttando tutta la potenza ricavabile (G-down; Pala; G-up).

Se si considera la condizione di massima efficienza assoluta si raggiunge un rendimento 37 % (Pala; G-up) e del 43 % (G-down; Pala; G-up) per l'onda 2000.

In Fig. 4.40 si può osservare la quantità di energia assorbita rispetto ai rendimenti della prova in condizioni migliori per l'onda 2000.

Il rendimento del sistema diminuisce all'aumentare della potenza dell'onda (o delle sue dimensioni); questo fa presupporre come esista una dimensione ottimale del sistema (diametro del galleggiante) per ogni onda. In fase di progetto quindi, la

Test Sul Modello EDS

dimensione del sistema è da valutare in funzione dello spettro del moto ondoso del sito, al fine di ottenere la massima produzione di energia.

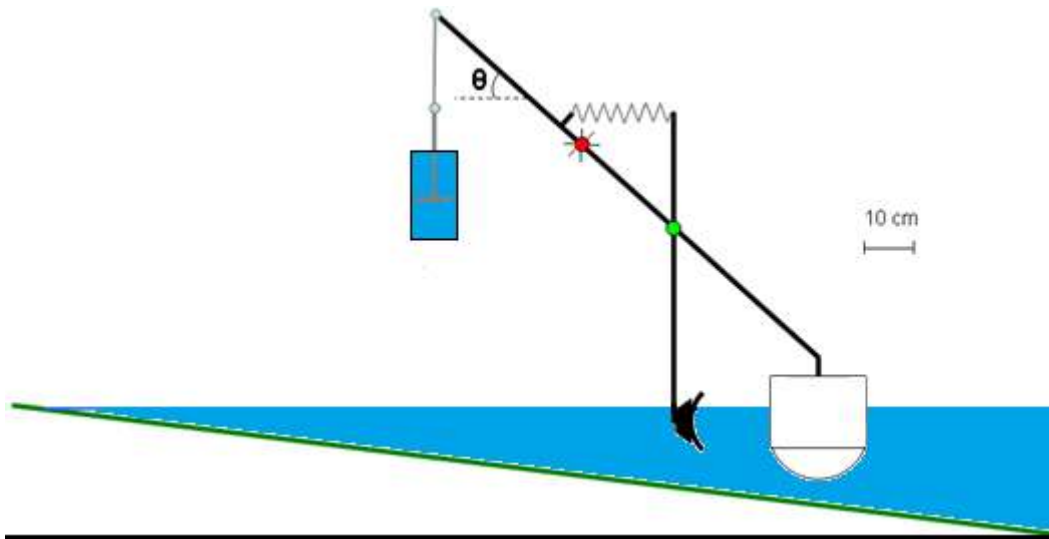


Fig. 4.39: Configurazione ottimale del secondo modello EDS (disegno in scala, tranne le parti del modello in grigio)

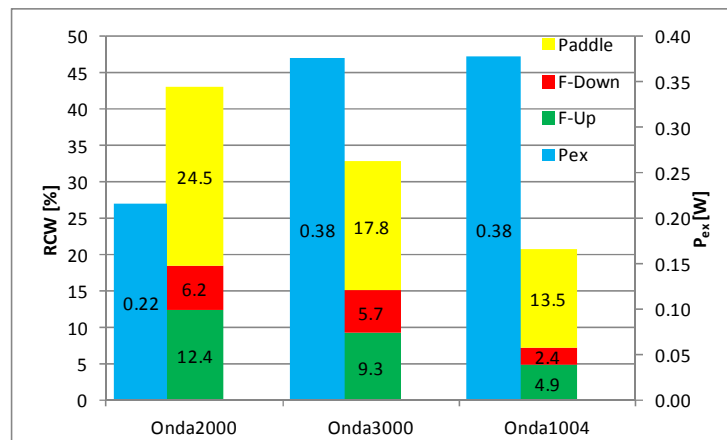


Fig. 4.40: Risultati della condizione ottimale e potenza totale assorbita

Per la condizione ottimale trovata, si è voluto confrontare il movimento effettivo di galleggiante e pala, con il movimento ipotizzato da Tecnomac per il sistema (Fig. 4.41). Si consideri che l'onda visualizzata è considerata acquisita a lato del galleggiante, e non è riferita alla posizione della pala.

Test Sul Modello EDS

Nella condizione teorica: l'onda raggiunge il galleggiante e lo solleva, determinando l'inizio della fase attiva del movimento verticale; in questo stadio di movimento, la pala non viene mai a contatto con l'acqua, risultando così ininfluente. La pala si inserisce nell'onda al termine della fase di spinta in salita del galleggiante, e si riporta in posizione di riposo quando il galleggiante ha raggiunto il cavo dell'onda, ovvero prima dell'inizio della nuova fase di spinta attiva del galleggiante.

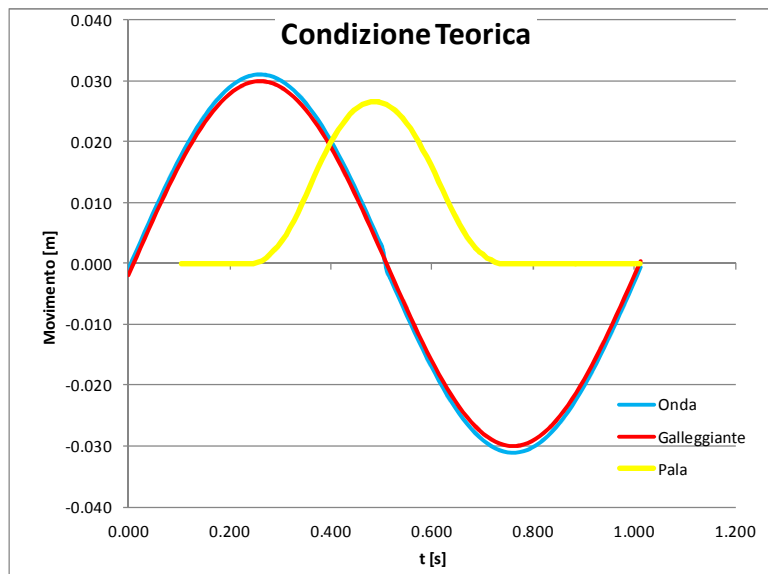


Fig. 4.41: Movimento ipotizzato del sistema EDS

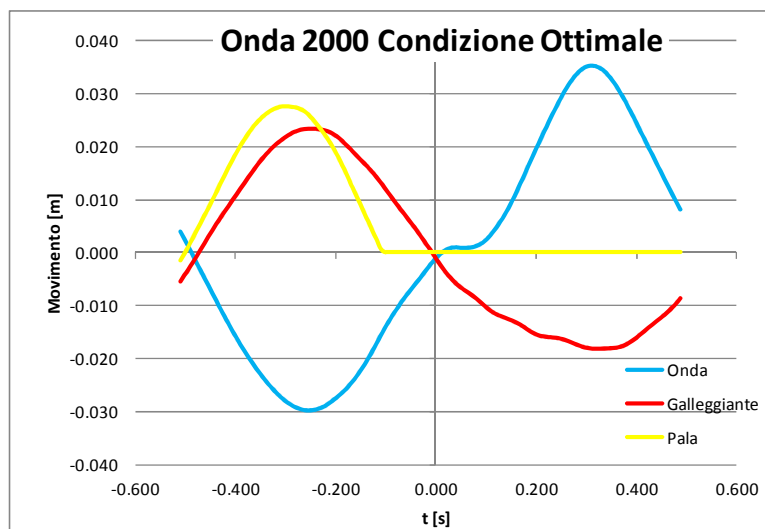


Fig. 4.42: Movimento reale del sistema EDS nella condizione ottimale

Confrontando la Fig. 4.41 con la Fig. 4.42 si può notare come il movimento reale, per la configurazione ottimale del sistema EDS ottenuta in questo lavoro, differisca dal movimento ipotizzato.

Il movimento del galleggiante non è in fase con il movimento della superficie libera, anzi si muove sfasato di un angolo di circa 180° . Questo fatto è dovuto al peso del sistema, soprattutto del galleggiante stesso. Per poter seguire perfettamente il movimento dell'onda, il galleggiante dovrebbe essere molto leggero; le prime prove effettuate dimostrano invece come una soluzione con galleggiante leggero porti ad avere rendimenti contenuti rispetto a soluzioni con il galleggiante appesantito.

La condizione teorica migliore per il galleggiante corrisponde a una condizione in cui il movimento del galleggiante è sfasato di 90° rispetto alla forzante (o alla superficie libera, in un'onda di piccola ampiezza). In questa condizione il galleggiante è in risonanza con l'onda incidente, ed è la soluzione che massimizza l'energia ottenibile dal galleggiante [7].

Per quanto riguarda la pala, nella condizione ottimale trovata, il movimento inizia quando il galleggiante è ancora in fase di ascesa, al contrario di quanto ipotizzato inizialmente. Questo comportamento è probabilmente dovuto sia al movimento reale del galleggiante, sfasato rispetto all'onda incidente, sia al fatto che la pala era inizialmente stata pensata per essere posta molto vicina al galleggiante e rialzata rispetto alla superficie libera, condizioni che però si sono dimostrate entrambe svantaggiose durante la campagna sperimentale.

4.2.2. *Verifica sul modello EDS*

Si è voluto poi verificare come lavorassero pala e galleggiante separati, posti nella stessa condizione della configurazione finale ottimale trovata per il sistema EDS. Questi test hanno lo scopo di fornire una prima indicazione sull'interazione galleggiante-pala, ovvero sulla validità dell'idea alla base del sistema EDS.

Per realizzare queste prove il galleggiante è stato provato, con la pala agganciata, ma sollevata dall'acqua, in modo da non alterare il peso e la distribuzione dei pesi del sistema. Per provare la pala invece si è bloccata l'asta di sostegno del galleggiante, in posizione tale che l'immersione della pala a riposo fosse di 0.09 m, e si è rimosso il galleggiante in modo che non modificasse il fronte d'onda incidente

In Fig. 4.43 sono visualizzati i risultati come sistema completo, e come somma dei risultati ottenuti con gli elementi separati.

Per quanto riguarda l'onda 2000 (onda rispetto a cui il modello del sistema EDS è stato ottimizzato) i rendimenti degli elementi separati sono inferiori a quelli del sistema completo. In questa condizione si può ipotizzare che il movimento del galleggiante dia dei vantaggi al funzionamento della pala, pur subendo una riduzione del proprio rendimento.

Per le onde 3000 e 1004, pala e galleggiante lavorano meglio se separati. In particolare, l'aumento di rendimento che si osserva considerando gli elementi separatamente, è legato principalmente a un aumento del rendimento del galleggiante, probabilmente perché non disturbato dal movimento della pala. Per queste onde il galleggiante non pare influire positivamente sulla pala.

L'ampiezza di movimento del galleggiante e, di conseguenza, l'escursione in verticale della pala non sono state analizzate in questo lavoro. In prima battuta si può ipotizzare che, data la massa elevata del galleggiante, l'ampiezza di movimento dello stesso sia contenuta, rispetto alla dimensione dell'onda incidente (3000 e 1004), e quindi non rechi vantaggio al movimento della pala. Tuttavia questa ipotesi andrebbe verificata esaminando l'ampiezza di movimento del galleggiante nella prova con onda 2000 e successivamente confrontandola con prove per cui risulti massimizzato il rendimento del modello rispetto alle altre onde.

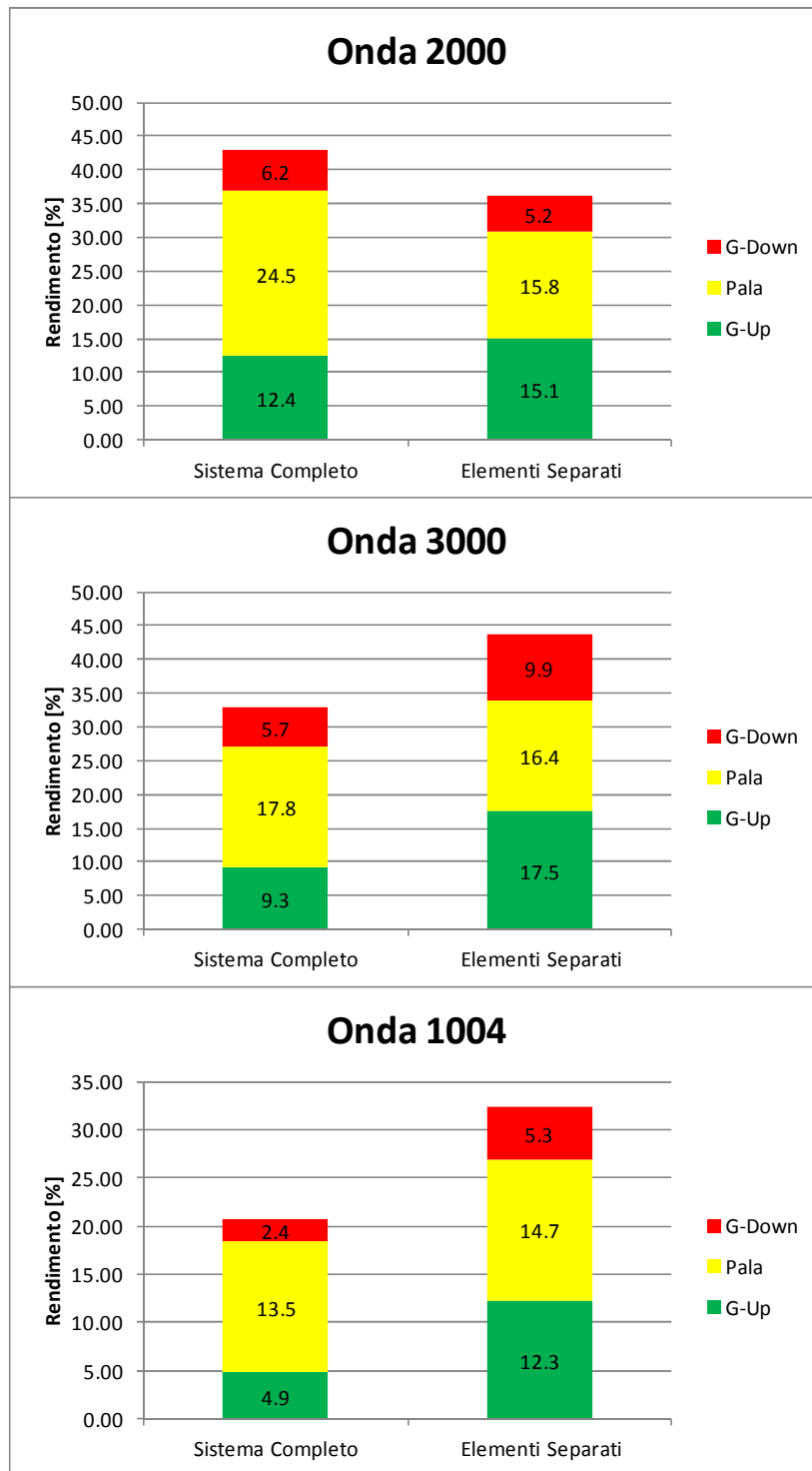


Fig. 4.43: Sistema completo e sistema a elementi separati

Identificando l'angolo di fase come la distanza temporale tra il picco del movimento del galleggiante e il picco dell'onda: in Fig. 4.44 i grafici relativi alla fase tra onda e galleggiante, con la pala immersa e, in Fig. 4.45, con la pala non immersa, per l'onda 2000.

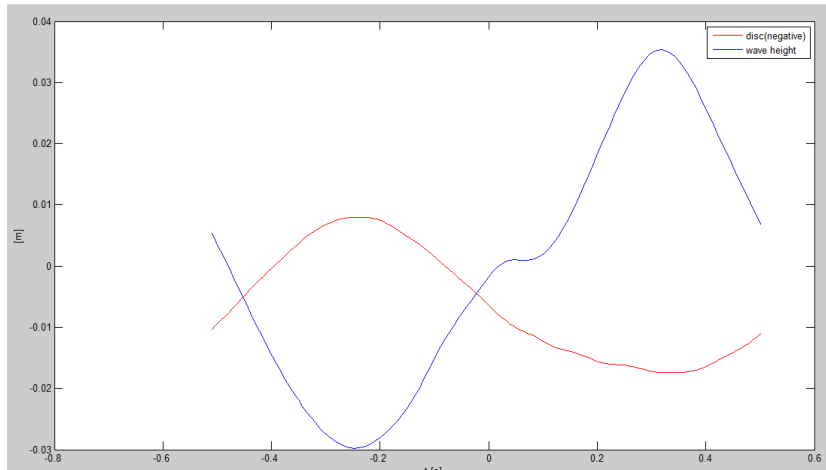


Fig. 4.44: Fase tra galleggiante (blu) e onda(rosso) con pala

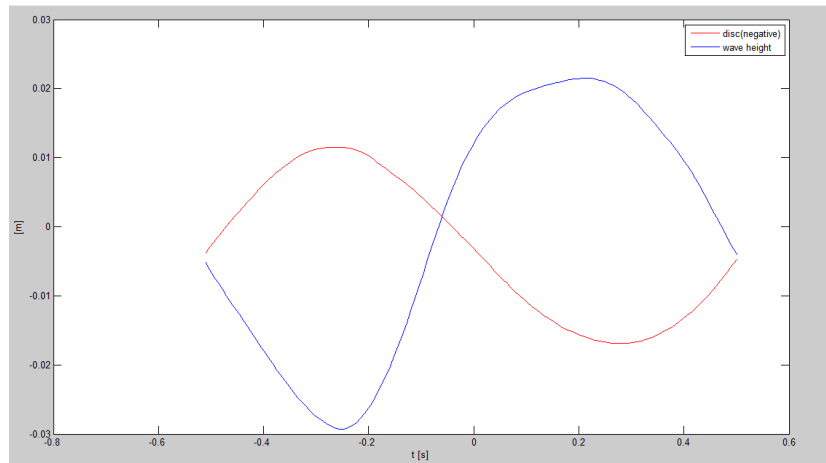


Fig. 4.45: Fase tra galleggiante (blu) e onda(rosso) senza pala

Si può notare come il movimento del galleggiante con e senza pala non pare subire variazioni facilmente visibili in termini di sfasamento. Questo risultato era prevedibile poiché lo sfasamento tra onda e galleggiante è legato alla frequenza naturale del sistema, che dipende principalmente dalle masse in gioco, che sono le stesse in entrambe le prove.

Test Sul Modello EDS

Appare invece evidente come la presenza della pala immersa modifichi l'onda acquisita della wave gauge poiché riflette in parte l'onda incidente.

Infine, prendendo in considerazione i dati pubblicati (Fig. 4.46 [19]) dalla Wave Star Energy, riguardanti un prototipo in scala 1:2 sollecitato da onde reali, si evidenziano risultati compresi tra il 30% e il 40% per onde di potenza superiore a 2kW/m; risultati simili a quelli ottenuti dal modello del sistema EDS, sollecitato però da onde monoarmoniche.

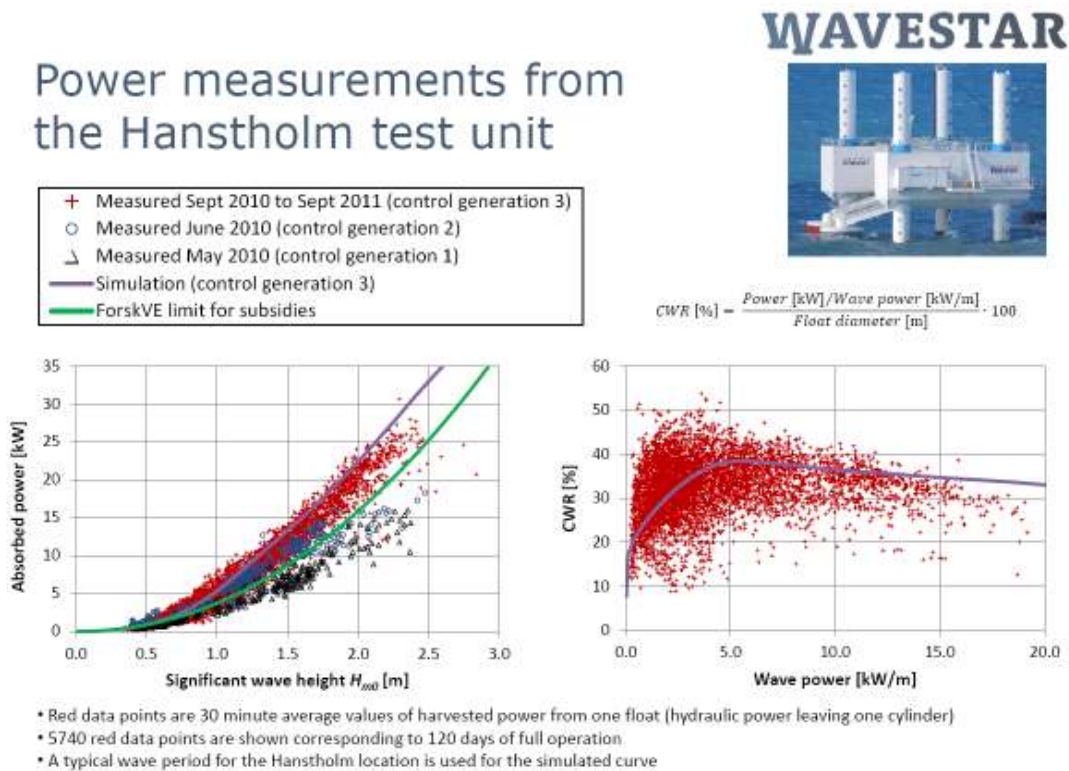


Fig. 4.46: Prestazioni del sistema Wave Star Energy

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

In questo lavoro di tesi è stato sviluppato e studiato un modello in scala di EDS, un sistema innovativo per la produzione di energia dal moto ondoso. È stata sviluppata una campagna sperimentale con l'intento di studiare l'influenza di alcuni parametri sul sistema: per farlo si sono effettuate diverse prove variando i parametri ritenuti inizialmente più significativi ed analizzando i risultati ottenuti in termini di rendimento del modello; altri parametri sono stati mantenuti costanti, in quanto ritenuti meno significativi in questa fase del lavoro.

La ricerca svolta ha evidenziato come tutti i parametri analizzati influenzino il rendimento dell'EDS, e, più precisamente, di ciascuno dei due elementi preposti ad assorbire l'energia dell'onda incidente: galleggiante (diviso in fase di salita e discesa) e pala.

Sia per quanto riguarda la pala sia per quanto riguarda il galleggiante i risultati portano a sostenere che la situazione in cui si hanno risultati migliori è quella per cui l'intero elemento viene investito dall'onda (nel caso della pala) o immerso interamente in essa (il galleggiante), senza esserne sormontato. Il fatto che si ottengano rendimenti inferiori con onde più grandi porta a ipotizzare che, per ciascuna onda, esistano dimensioni specifiche del galleggiante e della pala che permettono di ottimizzare il rendimento del sistema.

Complessivamente il sistema testato pare dare buoni risultati su onde di piccola ampiezza, se paragonate alle dimensioni del galleggiante, tuttavia all'aumentare dell'altezza e potenza dell'onda l'utilizzo congiunto di pala e galleggiante sembrerebbe disturbare il movimento del galleggiante riducendone il rendimento

anche della metà, rispetto a un galleggiante non dotato di pala nella stessa condizione.

La pala invece pare beneficiare del movimento impostole dal galleggiante. Se osserviamo le verifiche effettuate nell'ultima fase del lavoro, si può osservare come per l'onda più piccola testata, l'onda con cui si ottiene il rendimento maggiore, il rendimento della pala sia notevolmente maggiore se accoppiata con il galleggiante, mentre per onde più grandi il rendimento della pala rimane sostanzialmente invariato se la pala è accoppiata o meno al galleggiante.

Uno dei parametri più delicati nelle applicazioni reali è la distanza dell'EDS dalla riva (ovvero la profondità d'acqua in cui lavora). Come descritto nel Cap. 2.1 il processo di frangimento dipende dalla pendenza della spiaggia e dalla ripidità dell'onda. L'identificazione della posizione ottimale di una macchina EDS reale sarà quindi legata alle caratteristiche del sito considerato, morfologia del fondale e spettro dell'onda.

Il modello in scala di laboratorio ha permesso di ottenere importanti informazioni riguardo il funzionamento del sistema EDS e per il dimensionamento del prototipo, mostrando come il sistema EDS abbia buone potenzialità; ulteriori miglioramenti del modello in scala permetterebbero uno studio più raffinato del problema individuando con maggior precisione potenzialità e criticità. Inoltre, diversi aspetti necessitano di essere ancora indagati.

Per proseguire con i test sul modello EDS saranno necessarie prima di tutto alcune modifiche, per migliorarlo e per renderlo più simile ad una ipotetica macchina EDS reale:

- Modificare il sistema smorzante del galleggiante, rendendolo più simile al sistema smorzante reale, sia per quanto riguarda il tipo di smorzamento (ad oggi, il PTO ipotizzato per la macchina reale è unidirezionale). Inoltre, il sistema smorzante va migliorato (il manovellismo attuale produce attrito) e alleggerito, ed il suo punto di aggancio sull'asta principale deve essere regolabile.
- Dotare la pala di un sistema smorzante
- Alleggerire ulteriormente l'intero sistema

Conclusioni e Sviluppi Futuri

Tutto il lavoro deve essere vincolato ai limiti reali di realizzazione e funzionamento della macchina, che devono essere forniti da Tecnomac, come ad esempio: masse e dimensioni massime ammissibili, caratteristiche imprescindibili del PTO.

A valle di ciò, sarebbe interessante eseguire una più precisa ottimizzazione del modello EDS, ponendo particolare attenzione all'effetto dello smorzamento sulla pala, e alle differenze nell'utilizzo di uno smorzatore unidirezionale sul galleggiante.

Anche il tipo di moto ondoso sollecitante potrebbe essere rivisto al fine di sperimentare onde differenti, di potenza uguale a quelle già utilizzate, ma di altezza, lunghezza e/o periodo diversi. Fondamentale inoltre sarebbe testare il modello sottoposto all'azione di onde random.

Sempre per quanto concerne il moto ondoso sarebbe utile poter lavorare anche su tipi di frangimento differenti; come già spiegato il frangimento dipende dalle caratteristiche dell'onda e dalla ripidità della spiaggia, pertanto sarebbe utile riprogettare la spiaggia in modo che si possa variare la sua inclinazione. In questo modo si potrebbe individuare una configurazione ottimale di lavoro per il sistema EDS.

Il passo successivo sarebbe quindi quello di ricercare un sito avente caratteristiche ottime per il funzionamento della macchina EDS (morfologia della costa, spettro del moto ondoso), ed effettuare una stima teorica della produzione media annua di energia, verificando così la fattibilità economica del sistema.

BIBLIOGRAFIA E RIFERIMENTI

- [1] *A.Clément et al.*
“*Wave energy in Europe: current status and perspectives*”
Renewable and sustainable energy reviews
2002, Vol.6, 405-431, Elsevier Science Ltd.
- [2] *D. Vicinanza, L.Cappiotti, V.Ferrante e P.Contestabile*
“*Estimation of the wave energy in the Italian offshore*”
Journal of coastal research
2011, SI 64, 613-617
- [3] *A. Angelis-Dimakis et al.*
“*Methods and tools to evaluate the availability of renewable energy sources*”
Renewable and sustainable energy reviews
2010, Vol.15, 1183-1200, Elsevier Science Ltd.
- [4] *A. F. de O. Falcão.*
“*Wave energy utilization: a review of the technologies*”
Renewable and Sustainable Energy Reviews
2010, Vol.14, 899 - 918, Elsevier Science Ltd.
- [5] *M. Folley, T.J.T. Whittaker*
“*The nearshore wave energy resource*”
Renewable and Sustainable Energy Reviews
2009, Vol.12, 1709-1715, Elsevier Science Ltd.

Bibliografia e Riferimenti

- [6] *S. Cometti, S. Fioletti*
“Wave Energy Converter EDS: progettazione e messa in opera del modello fisico”
Politecnico di Milano 2011.
- [7] *M. Vantorre, R. Banasiak, R. Verhoeven*
“Modelling of hydraulic performance and wave energy extraction by a point absorber in heave”
Applied ocean research
2004, Vol.26, 61-72
- [8] *Wave star A/S*
“Wave star energy: status report document to Energinet.dk”
2011
- [9] *D. Hazlett, I. Inculet, D. R. Inculet.*
“Electric power generation by “Surfing” water waves”
Renewable and Sustainable Energy Reviews
2009, 2510-2514, Elsevier Science Ltd.
- [10] *R. G. Dean, R. A. Dalrymple*
“Water wave mechanics for engineers and scientists”
Advanced Series on Ocean Engineering
1991, Vol. 2, 2510-2514, World Scientific Publishing
- [11] *H.W. Iversen*
“Waves and breakers in shoaling water”
Proc. 3rd international conference on coastal engineering (Cambridge)
1952, 1-12, ASCE
-

Bibliografia e Riferimenti

- [12] C.J. Galvin
“Breaker type classification on three laboratory beaches”
Journal of Geophysical Research
1968, Vol. 73, 3651-3659
- [13] D.H. Peregrine
“Wave breaking”
Proc. Short course on design and reliability of coastal structures (Venice)
1983, 93-108, ASCE
- [14] D. Basco
“A qualitative description of wave breaking”
Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering
1985, Vol. 111, no 2, ASCE
- [15] A. Babarit, M. Guglielmi, A. Clément
“Declutching control of a wave energy converter”
Ocean Engineering
2009, Vol. 36, 1015-1024
- [16] *Archivio ISPRA (Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale)*
www.idromare.it
- [17] M.M. Purandare, P.A. Aswatha Naravana
“Wave power variation in the nearshore regions”
Coastal Engineering
1987, Vol. 11, 381-390
-

Bibliografia e Riferimenti

- [18] *J.E. Richardson*
“*Surf Similarity*”
1996, Flown Science
- [19] *L. Marquis, M. Kramer, P. Frigaard*
“*Performance and evaluation of the waviestar prototype*”
2011, EWTEC conference in Southampton (UK)
http://waviestarenergy.com/sites/default/files/EWTEC2011_2011-09-06.pdf

ALLEGATO A: CARATTERISTICHE DELLE PROVE SUL SECONDO MODELLO

nome prova	onda	peso aggiuntivo	tipo di prova	smorzatore	posizione sistema	immersione pala	distanza cerniera pala galleggiante	inclinazione asta galleggiante	distanza effettiva pala-gallegginate	Profondità d'acqua al galleggiante	Affondamento galleggiante	Braccio pala		distanza del galleggiante dalla riva (calcolata)	distanza della pala dalla riva (calcolata)	Tipo di pala
#	#	[Kg]			[m]	d [m]	l1-l3 [m]	θ [°]	Dpg [m]	[m]	a [m]	b1 [m]	b2 [m]	x_s [m]	[m]	
120823P_001	RIF	0.0	G+P	grande 4 fori	5.70	0.06	0.28	34.22	0.087	0.261	0.024	0.330	0.24	2.159	2.073	Pala 1
120823P_002	2000	0.0	G+P	grande 4 fori	5.70	0.06	0.28	34.22	0.087	0.261	0.024	0.330	0.24	2.159	2.073	Pala 1
120823P_003	3000	0.0	G+P	grande 4 fori	5.70	0.06	0.28	34.22	0.087	0.261	0.024	0.330	0.24	2.159	2.073	Pala 1
120823P_004	1004	0.0	G+P	grande 4 fori	5.70	0.06	0.28	34.22	0.087	0.261	0.024	0.330	0.24	2.159	2.073	Pala 1
120823P_005	RIF	0.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.09	0.28	34.22	0.087	0.261	0.024	0.360	0.24	2.159	2.073	Pala 1
120823P_006	2000	0.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.09	0.28	34.22	0.087	0.261	0.024	0.360	0.24	2.159	2.073	Pala 1
120823P_007	3000	0.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.09	0.28	34.22	0.087	0.261	0.024	0.360	0.24	2.159	2.073	Pala 1
120823P_008	1004	0.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.09	0.28	34.22	0.087	0.261	0.024	0.360	0.24	2.159	2.073	Pala 1
120823P_009	RIF	1.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.06	0.28	37.48	0.077	0.259	0.069	0.310	0.24	2.137	2.060	Pala 1
120823P_010	2000	1.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.06	0.28	37.48	0.077	0.259	0.069	0.310	0.24	2.137	2.060	Pala 1
120823P_011	3000	1.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.06	0.28	37.48	0.077	0.259	0.069	0.310	0.24	2.137	2.060	Pala 1
120823P_012	1004	1.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.06	0.28	37.48	0.077	0.259	0.069	0.310	0.24	2.137	2.060	Pala 1
120823P_013	RIF	1.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.09	0.28	37.48	0.077	0.259	0.069	0.340	0.24	2.137	2.060	Pala 1
120823P_014	2000	1.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.09	0.28	37.48	0.077	0.259	0.069	0.340	0.24	2.137	2.060	Pala 1
120823P_015	3000	1.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.09	0.28	37.48	0.077	0.259	0.069	0.340	0.24	2.137	2.060	Pala 1
120823P_016	1004	1.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.09	0.28	37.48	0.077	0.259	0.069	0.340	0.24	2.137	2.060	Pala 1
120823P_017	RIF	2.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.06	0.28	40.03	0.069	0.256	0.098	0.285	0.24	2.118	2.049	Pala 1
120823P_018	2000	2.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.06	0.28	40.03	0.069	0.256	0.098	0.285	0.24	2.118	2.049	Pala 1

Allegato A

nome prova	onda	peso aggiuntivo	tipo di prova	smorzatore	posizione sistema	immersione pala	distanza cerniera pala galleggiante	inclinazione asta galleggiante	distanza effettiva pala- gallegginate	Profondità d'acqua al galleggiante	Affondamento galleggiante	Braccio pala		distanza del galleggiante dalla riva (calcolata)	distanza della pala dalla riva (calcolata)	Tipo di pala
#	#	[Kg]			[m]	d [m]	l1-l3 [m]	θ [°]	Dpg [m]	[m]	a [m]	b1 [m]	b2 [m]	x_s [m]	[m]	
120823P_019	3000	2.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.06	0.28	40.03	0.069	0.256	0.098	0.285	0.24	2.118	2.049	Pala 1
120823P_020	1004	2.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.06	0.28	40.03	0.069	0.256	0.098	0.285	0.24	2.118	2.049	Pala 1
120823P_021	RIF	2.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.09	0.28	40.03	0.069	0.256	0.098	0.315	0.24	2.118	2.049	Pala 1
120823P_022	2000	2.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.09	0.28	40.03	0.069	0.256	0.098	0.315	0.24	2.118	2.049	Pala 1
120823P_023	3000	2.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.09	0.28	40.03	0.069	0.256	0.098	0.315	0.24	2.118	2.049	Pala 1
120823P_024	1004	2.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.09	0.28	40.03	0.069	0.256	0.098	0.315	0.24	2.118	2.049	Pala 1
120824P_001	RIF	0.00	G+P	grande 4 fori	4.70	0.06	0.28	34.22	0.087	0.140	0.024	0.330	0.24	1.159	1.073	Pala 1
120824P_002	2000	0.00	G+P	grande 4 fori	4.70	0.06	0.28	34.22	0.087	0.140	0.024	0.330	0.24	1.159	1.073	Pala 1
120824P_003	3000	0.00	G+P	grande 4 fori	4.70	0.06	0.28	34.22	0.087	0.140	0.024	0.330	0.24	1.159	1.073	Pala 1
120824P_004	1004	0.00	G+P	grande 4 fori	4.70	0.06	0.28	34.22	0.087	0.140	0.024	0.330	0.24	1.159	1.073	Pala 1
120824P_005	RIF	0.00	G+P	grande 4 fori	4.70	0.85	0.28	34.22	0.087	0.140	0.024	0.355	0.24	1.159	1.073	Pala 1
120824P_006	2000	0.00	G+P	grande 4 fori	4.70	0.85	0.28	34.22	0.087	0.140	0.024	0.355	0.24	1.159	1.073	Pala 1
120824P_007	3000	0.00	G+P	grande 4 fori	4.70	0.85	0.28	34.22	0.087	0.140	0.024	0.355	0.24	1.159	1.073	Pala 1
120824P_008	1004	0.00	G+P	grande 4 fori	4.70	0.85	0.28	34.22	0.087	0.140	0.024	0.355	0.24	1.159	1.073	Pala 1
120824P_009	RIF	1.00	G+P	grande 4 fori	4.70	0.06	0.28	37.95	0.076	0.137	0.062	0.310	0.24	1.134	1.058	Pala 1
120824P_010	2000	1.00	G+P	grande 4 fori	4.70	0.06	0.28	37.95	0.076	0.137	0.062	0.310	0.24	1.134	1.058	Pala 1
120824P_011	3000	1.00	G+P	grande 4 fori	4.70	0.06	0.28	37.95	0.076	0.137	0.062	0.310	0.24	1.134	1.058	Pala 1
120824P_012	1004	1.00	G+P	grande 4 fori	4.70	0.06	0.28	37.95	0.076	0.137	0.062	0.310	0.24	1.134	1.058	Pala 1

Allegato A

nome prova	onda	peso aggiuntivo	tipo di prova	smorzatore	posizione sistema	immersione pala	distanza cerniera pala galleggiante	inclinazione asta galleggiante	distanza effettiva pala- galleggiate	Profondità d'acqua al galleggiante	Affondamento galleggiante	Braccio pala		distanza del galleggiante dalla riva (calcolata)	distanza della pala dalla riva (calcolata)	Tipo di pala
#	#	[Kg]			[m]	d [m]	l1-l3 [m]	θ [°]	Dpg [m]	[m]	a [m]	b1 [m]	b2 [m]	x_s [m]	[m]	
120827P_001	RIF	1.00	G+P	grande 4 fori	4.70	0.09	0.28	37.48	0.077	0.138	0.062	0.340	0.24	1.137	1.060	Pala 1
120827P_002	2000	1.00	G+P	grande 4 fori	4.70	0.09	0.28	37.48	0.077	0.138	0.062	0.340	0.24	1.137	1.060	Pala 1
120827P_003	RIF	2.00	G+P	grande 4 fori	4.70	0.06	0.28	40.03	0.069	0.135	0.095	0.290	0.24	1.118	1.049	Pala 1
120827P_004	2000	2.00	G+P	grande 4 fori	4.70	0.06	0.28	40.03	0.069	0.135	0.095	0.290	0.24	1.118	1.049	Pala 1
120827P_005	3000	2.00	G+P	grande 4 fori	4.70	0.06	0.28	40.03	0.069	0.135	0.095	0.290	0.24	1.118	1.049	Pala 1
120827P_006	1004	2.00	G+P	grande 4 fori	4.70	0.06	0.28	40.03	0.069	0.135	0.095	0.290	0.24	1.118	1.049	Pala 1
120827P_007	1004	3.00	G+P	grande 4 fori	4.70	0.06	0.28	40.03	0.069	0.135	0.095	0.290	0.24	1.118	1.049	Pala 1
120827P_008	RIF	4.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.06	0.28	46.12	0.049	0.190	0.150	0.260	0.24	1.570	1.521	Pala 1
120827P_009	2000	4.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.06	0.28	46.12	0.049	0.190	0.150	0.260	0.24	1.570	1.521	Pala 1
120827P_010	3000	4.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.06	0.28	46.12	0.049	0.190	0.150	0.260	0.24	1.570	1.521	Pala 1
120827P_011	1004	4.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.06	0.28	46.12	0.049	0.190	0.150	0.260	0.24	1.570	1.521	Pala 1
120827P_012	RIF	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.06	0.28	43.83	0.057	0.192	0.130	0.280	0.24	1.589	1.532	Pala 1
120827P_013	2000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.06	0.28	43.83	0.057	0.192	0.130	0.280	0.24	1.589	1.532	Pala 1
120827P_014	3000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.06	0.28	43.83	0.057	0.192	0.130	0.280	0.24	1.589	1.532	Pala 1
120827P_015	1004	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.06	0.28	43.83	0.057	0.192	0.130	0.280	0.24	1.589	1.532	Pala 1
120828P_001	RIF	2.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.06	0.28	40.91	0.067	0.195	0.101	0.290	0.24	1.612	1.545	Pala 1
120828P_002	2000	2.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.06	0.28	40.91	0.067	0.195	0.101	0.290	0.24	1.612	1.545	Pala 1
120828P_003	3000	2.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.06	0.28	40.91	0.067	0.195	0.101	0.290	0.24	1.612	1.545	Pala 1

Allegato A

nome prova	onda	peso aggiuntivo	tipo di prova	smorzatore	posizione sistema	immersione pala	distanza cerniera pala galleggiante	inclinazione asta galleggiante	distanza effettiva pala- gallegginate	Profondità d'acqua al galleggiante	Affondamento galleggiante	Braccio pala		distanza del galleggiante dalla riva (calcolata)	distanza della pala dalla riva (calcolata)	Tipo di pala
#	#	[Kg]			[m]	d [m]	l1-l3 [m]	θ [°]	Dpg [m]	[m]	a [m]	b1 [m]	b2 [m]	x_s [m]	[m]	
120828P_004	1004	2.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.06	0.28	40.91	0.067	0.195	0.101	0.290	0.24	1.612	1.545	Pala 1
120828P_005	RIF	1.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.06	0.28	38.43	0.074	0.197	0.070	0.300	0.24	1.630	1.556	Pala 1
120828P_006	2000	1.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.06	0.28	38.43	0.074	0.197	0.070	0.300	0.24	1.630	1.556	Pala 1
120828P_007	3000	1.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.06	0.28	38.43	0.074	0.197	0.070	0.300	0.24	1.630	1.556	Pala 1
120828P_008	1004	1.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.06	0.28	38.43	0.074	0.197	0.070	0.300	0.24	1.630	1.556	Pala 1
120828P_009	2000	5.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.06	0.28									Pala 1
120828P_010	RIF	4.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.06	0.28	38.71	0.074	0.258	0.154	0.260	0.24	2.128	2.055	Pala 1
120828P_011	2000	4.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.06	0.28	38.71	0.074	0.258	0.154	0.260	0.24	2.128	2.055	Pala 1
120828P_012	3000	4.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.06	0.28	38.71	0.074	0.258	0.154	0.260	0.24	2.128	2.055	Pala 1
120828P_013	1004	4.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.06	0.28	38.71	0.074	0.258	0.154	0.260	0.24	2.128	2.055	Pala 1
120828P_014	RIF	3.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.06	0.28	35.07	0.084	0.261	0.129	0.275	0.24	2.154	2.070	Pala 1
120828P_015	2000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.06	0.28	35.07	0.084	0.261	0.129	0.275	0.24	2.154	2.070	Pala 1
120828P_016	3000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.06	0.28	35.07	0.084	0.261	0.129	0.275	0.24	2.154	2.070	Pala 1
120828P_017	1004	3.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.06	0.28	35.07	0.084	0.261	0.129	0.275	0.24	2.154	2.070	Pala 1
120828P_018	RIF	2.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.06	0.28	32.45	0.091	0.263	0.101	0.295	0.24	2.171	2.080	Pala 1
120828P_019	2000	2.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.06	0.28	32.45	0.091	0.263	0.101	0.295	0.24	2.171	2.080	Pala 1
120828P_020	3000	2.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.06	0.28	32.45	0.091	0.263	0.101	0.295	0.24	2.171	2.080	Pala 1
120828P_021	1004	2.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.06	0.28	32.45	0.091	0.263	0.101	0.295	0.24	2.171	2.080	Pala 1

Allegato A

nome prova	onda	peso aggiuntivo	tipo di prova	smorzatore	posizione sistema	immersione pala	distanza cerniera pala galleggiante	inclinazione asta galleggiante	distanza effettiva pala- gallegginate	Profondità d'acqua al galleggiante	Affondamento galleggiante	Braccio pala		distanza del galleggiante dalla riva (calcolata)	distanza della pala dalla riva (calcolata)	Tipo di pala
#	#	[Kg]			[m]	d [m]	l1-l3 [m]	θ [°]	Dpg [m]	[m]	a [m]	b1 [m]	b2 [m]	x_s [m]	[m]	
120828P_022	RIF	1.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.06	0.28	29.38	0.099	0.265	0.072	0.3	0.24	2.189	2.090	Pala 1
120828P_023	2000	1.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.06	0.28	29.38	0.099	0.265	0.072	0.3	0.24	2.189	2.090	Pala 1
120828P_024	3000	1.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.06	0.28	29.38	0.099	0.265	0.072	0.3	0.24	2.189	2.090	Pala 1
120828P_025	1004	1.00	G+P	grande 4 fori	5.70	0.06	0.28	29.38	0.099	0.265	0.072	0.3	0.24	2.189	2.090	Pala 1
120903P_001	RIF	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.12	0.20	36.32	0.016	0.199	0.136	0.270	0.24	1.645	1.629	Pala 1
120903P_002	2000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.12	0.20	36.32	0.016	0.199	0.136	0.270	0.24	1.645	1.629	Pala 1
120903P_003	3000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.12	0.20	36.32	0.016	0.199	0.136	0.270	0.24	1.645	1.629	Pala 1
120903P_004	1004	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.12	0.20	36.32	0.016	0.199	0.136	0.270	0.24	1.645	1.629	Pala 1
120903P_005	2000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.20	36.32	0.016	0.199	0.136	0.240	0.24	1.645	1.629	Pala 1
120903P_006	3000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.20	36.32	0.016	0.199	0.136	0.240	0.24	1.645	1.629	Pala 1
120903P_007	1004	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.20	36.32	0.016	0.199	0.136	0.240	0.24	1.645	1.629	Pala 1
120903P_008	2000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.06	0.20	36.32	0.016	0.199	0.136	0.210	0.24	1.645	1.629	Pala 1
120903P_009	3000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.06	0.20	36.32	0.016	0.199	0.136	0.210	0.24	1.645	1.629	Pala 1
120903P_010	1004	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.06	0.20	36.32	0.016	0.199	0.136	0.210	0.24	1.645	1.629	Pala 1
120903P_011	2000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.03	0.20	36.32	0.016	0.199	0.136	0.180	0.24	1.645	1.629	Pala 1
120903P_012	3000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.03	0.20	36.32	0.016	0.199	0.136	0.180	0.24	1.645	1.629	Pala 1
120903P_013	1004	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.03	0.20	36.32	0.016	0.199	0.136	0.180	0.24	1.645	1.629	Pala 1
120903P_014	RIF	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.12	0.28	36.32	0.081	0.199	0.134	0.340	0.24	1.645	1.565	Pala 1

Allegato A

nome prova	onda	peso aggiuntivo	tipo di prova	smorzatore	posizione sistema	immersione pala	distanza cerniera pala galleggiante	inclinazione asta galleggiante	distanza effettiva pala- gallegginate	Profondità d'acqua al galleggiante	Affondamento galleggiante	Braccio pala		distanza del galleggiante dalla riva (calcolata)	distanza della pala dalla riva (calcolata)	Tipo di pala
#	#	[Kg]			[m]	d [m]	l1-l3 [m]	θ [°]	Dpg [m]	[m]	a [m]	b1 [m]	b2 [m]	x_s [m]	[m]	
120903P_015	2000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.12	0.28	36.32	0.081	0.199	0.134	0.340	0.24	1.645	1.565	Pala 1
120903P_016	3000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.12	0.28	36.32	0.081	0.199	0.134	0.340	0.24	1.645	1.565	Pala 1
120903P_017	1004	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.12	0.28	36.32	0.081	0.199	0.134	0.340	0.24	1.645	1.565	Pala 1
120903P_018	2000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.28	36.32	0.081	0.199	0.134	0.310	0.24	1.645	1.565	Pala 1
120903P_019	3000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.28	36.32	0.081	0.199	0.134	0.310	0.24	1.645	1.565	Pala 1
120903P_020	1004	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.28	36.32	0.081	0.199	0.134	0.310	0.24	1.645	1.565	Pala 1
120903P_021	2000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.06	0.28	36.32	0.081	0.199	0.134	0.310	0.24	1.645	1.565	Pala 1
120903P_022	3000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.06	0.28	36.32	0.081	0.199	0.134	0.310	0.24	1.645	1.565	Pala 1
120903P_023	1004	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.06	0.28	36.32	0.081	0.199	0.134	0.310	0.24	1.645	1.565	Pala 1
120904P_001	RIF	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.03	0.28	36.32	0.081	0.199	0.134	0.280	0.24	1.645	1.565	Pala 1
120904P_002	2000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.03	0.28	36.32	0.081	0.199	0.134	0.280	0.24	1.645	1.565	Pala 1
120904P_003	3000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.03	0.28	36.32	0.081	0.199	0.134	0.280	0.24	1.645	1.565	Pala 1
120904P_004	1004	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.03	0.28	36.32	0.081	0.199	0.134	0.280	0.24	1.645	1.565	Pala 1
120904P_005	RIF	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.38	36.32	0.161	0.199	0.134	0.355	0.24	1.645	1.484	Pala 1
120904P_006	2000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.38	36.32	0.161	0.199	0.134	0.355	0.24	1.645	1.484	Pala 1
120904P_007	3000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.38	36.32	0.161	0.199	0.134	0.355	0.24	1.645	1.484	Pala 1
120904P_008	1004	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.38	36.32	0.161	0.199	0.134	0.355	0.24	1.645	1.484	Pala 1
120904P_009	2000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.06	0.38	36.32	0.161	0.199	0.134	0.355	0.24	1.645	1.484	Pala 1

Allegato A

nome prova	onda	peso aggiuntivo	tipo di prova	smorzatore	posizione sistema	immersione pala	distanza cerniera pala galleggiante	inclinazione asta galleggiante	distanza effettiva pala- gallegginate	Profondità d'acqua al galleggiante	Affondamento galleggiante	Braccio pala		distanza del galleggiante dalla riva (calcolata)	distanza della pala dalla riva (calcolata)	Tipo di pala
#	#	[Kg]			[m]	d [m]	l1-l3 [m]	θ [°]	Dpg [m]	[m]	a [m]	b1 [m]	b2 [m]	x_s [m]	[m]	
120904P_010	3000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.06	0.38	36.32	0.161	0.199	0.134	0.355	0.24	1.645	1.484	Pala 1
120904P_011	1004	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.06	0.38	36.32	0.161	0.199	0.134	0.355	0.24	1.645	1.484	Pala 1
120904P_012	2000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.03	0.38	36.32	0.161	0.199	0.134	0.355	0.24	1.645	1.484	Pala 1
120904P_013	3000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.03	0.38	36.32	0.161	0.199	0.134	0.355	0.24	1.645	1.484	Pala 1
120904P_014	1004	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.03	0.38	36.32	0.161	0.199	0.134	0.355	0.24	1.645	1.484	Pala 1
120914_p02	2000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.305	26.0	0.129	0.207	0.090	0.280	0.24	1.708	1.579	Pala 1
120914_p03	3000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.305	26.0	0.129	0.207	0.090	0.280	0.24	1.708	1.579	Pala 1
120914_p04	1004	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.305	26.0	0.129	0.207	0.090	0.280	0.24	1.708	1.579	Pala 1
120914_p05	2000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.305	26.0	0.129	0.207	0.090	0.280	0.24	1.708	1.579	Pala 1
120914_p06	RIF	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.08	0.310	31.0	0.121	0.203	0.090	0.280	0.24	1.680	1.559	Pala 1
120914_p07	2000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.08	0.310	31.0	0.121	0.203	0.090	0.280	0.24	1.680	1.559	Pala 1
120914_p08	3000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.08	0.310	31.0	0.121	0.203	0.090	0.345	0.24	1.680	1.559	Pala 1
120914_p09	RIF	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.342	35.8	0.132	0.200	0.100	0.345	0.24	1.649	1.516	Pala 1
120914_p10	2000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.342	35.8	0.132	0.200	0.100	0.345	0.24	1.649	1.516	Pala 1
120914_p11	3000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.342	35.8	0.132	0.200	0.100	0.345	0.24	1.649	1.516	Pala 1
120914_p12	1004	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.342	35.8	0.132	0.200	0.100	0.345	0.24	1.649	1.516	Pala 1
120914_p13	4000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.342	35.8	0.132	0.200	0.100	0.345	0.24	1.649	1.516	Pala 1
120918P_001	RIF	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.37	42.0	0.130	0.194	0.150	0.38	0.24	1.603	1.473	Pala 1

Allegato A

nome prova	onda	peso aggiuntivo	tipo di prova	smorzatore	posizione sistema	immersione pala	distanza cerniera pala galleggiante	inclinazione asta galleggiante	distanza effettiva pala- gallegginate	Profondità d'acqua al galleggiante	Affondamento galleggiante	Braccio pala		distanza del galleggiante dalla riva (calcolata)	distanza della pala dalla riva (calcolata)	Tipo di pala
#	#	[Kg]			[m]	d [m]	l1-l3 [m]	θ [°]	Dpg [m]	[m]	a [m]	b1 [m]	b2 [m]	x_s [m]	[m]	
120918P_002	2000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.37	42.0	0.130	0.194	0.150	0.38	0.24	1.603	1.473	Pala 1
120918P_003	3000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.37	42.0	0.130	0.194	0.150	0.38	0.24	1.603	1.473	Pala 1
120918P_004	1004	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.37	42.0	0.130	0.194	0.150	0.38	0.24	1.603	1.473	Pala 1
120919P_001	RIF	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.37	42.0	0.130	0.194	0.148	0.38	0.24	1.603	1.473	Pala 1
120919P_002	2000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.37	42.0	0.130	0.194	0.148	0.38	0.24	1.603	1.473	Pala 1
120919P_003	3000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.37	42.0	0.130	0.194	0.148	0.38	0.24	1.603	1.473	Pala 1
120919P_004	1004	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.37	42.0	0.130	0.194	0.148	0.38	0.24	1.603	1.473	Pala 1
120919P_005	RIF	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.41	42.00	0.160	0.194	0.148	0.395	0.24	1.603	1.443	Pala 1
120919P_006	2000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.41	42.00	0.160	0.194	0.148	0.395	0.24	1.603	1.443	Pala 1
120919P_007	3000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.41	42.00	0.160	0.194	0.148	0.395	0.24	1.603	1.443	Pala 1
120919P_008	1004	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.41	42.00	0.160	0.194	0.148	0.395	0.24	1.603	1.443	Pala 1
120919P_009	RIF	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.41	42.00	0.160	0.194	0.148	0.395	0.31	1.603	1.443	Pala 1
120919P_010	2000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.41	42.00	0.160	0.194	0.148	0.395	0.31	1.603	1.443	Pala 1
120919P_011	3000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.41	42.00	0.160	0.194	0.148	0.395	0.31	1.603	1.443	Pala 1
120919P_012	1004	3.00	G+P	grande 4 fori	5.20	0.09	0.41	42.00	0.160	0.194	0.148	0.395	0.31	1.603	1.443	Pala 1
120920P_001	RIF	3.00	G+P	grande 4 fori	5.23	0.09	0.41	42.00	0.160	0.198	0.148	0.395	0.24	1.633	1.474	Pala 1
120920P_002	2000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.23	0.09	0.41	42.00	0.160	0.198	0.148	0.395	0.24	1.633	1.474	Pala 1
120920P_003	3000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.23	0.09	0.41	42.00	0.160	0.198	0.148	0.395	0.24	1.633	1.474	Pala 1

Allegato A

nome prova	onda	peso aggiuntivo	tipo di prova	smorzatore	posizione sistema	immersione pala	distanza cerniera pala galleggiante	inclinazione asta galleggiante	distanza effettiva pala- gallegginate	Profondità d'acqua al galleggiante	Affondamento galleggiante	Braccio pala		distanza del galleggiante dalla riva (calcolata)	distanza della pala dalla riva (calcolata)	Tipo di pala
#	#	[Kg]			[m]	d [m]	l1-l3 [m]	θ [°]	Dpg [m]	[m]	a [m]	b1 [m]	b2 [m]	x_s [m]	[m]	
120920P_004	1004	3.00	G+P	grande 4 fori	5.23	0.09	0.41	42.00	0.160	0.198	0.148	0.395	0.24	1.633	1.474	Pala 1
120921P_001	RIF	3.00	G+P	grande 4 fori	5.23	0.09	0.41	42.00	0.160	0.198	0.146	0.410	0.24	1.633	1.473	Pala 2
120921P_002	2000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.23	0.09	0.41	42.00	0.160	0.198	0.146	0.410	0.24	1.633	1.473	
120921P_003	3000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.23	0.09	0.41	42.00	0.160	0.198	0.146	0.410	0.24	1.633	1.473	
120921P_004	1004	3.00	G+P	grande 4 fori	5.23	0.09	0.41	42.00	0.160	0.198	0.146	0.410	0.24	1.633	1.473	
120921P_005	RIF	3.00	G+P	grande 4 fori	5.23	0.09	0.41	42.00	0.160	0.198	0.146	0.410	0.24	1.633	1.473	Pala 3
120921P_006	2000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.23	0.09	0.41	42.00	0.160	0.198	0.146	0.410	0.24	1.633	1.473	
120921P_007	3000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.23	0.09	0.41	42.00	0.160	0.198	0.146	0.410	0.24	1.633	1.473	
120921P_008	1004	3.00	G+P	grande 4 fori	5.23	0.09	0.41	42.00	0.160	0.198	0.146	0.410	0.24	1.633	1.473	Pala 1
120921P_009	NN	3.00	G+P	grande 4 fori	5.23	0.09	0.41	42.00	0.160	0.198	0.146	0.410	0.24	1.633	1.473	
120921P_010	NN	3.00	G+P	grande 4 fori	5.23	0.09	0.41	42.00	0.160	0.198	0.146	0.410	0.24	1.633	1.473	Pala 1
120921P_011	RIF	3.00	G+P	grande 4 fori	5.23	0.09	0.41	42.00	0.160	0.198	0.146	0.410	0.24	1.633	1.473	Pala 1
120921P_012	2000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.23	0.09	0.41	42.00	0.160	0.198	0.146	0.410	0.24	1.633	1.473	Pala 1
120921P_013	3000	3.00	G+P	grande 4 fori	5.23	0.09	0.41	42.00	0.160	0.198	0.146	0.410	0.24	1.633	1.473	
120921P_014	1004	3.00	G+P	grande 4 fori	5.23	0.09	0.41	42.00	0.160	0.198	0.146	0.410	0.24	1.633	1.473	Pala 2
120924P_001	RIF	3.00	g+p	grande 4 fori	5.23	0.09	0.41	42.00	0.160	0.198	0.146	0.410	0.24	1.633	1.473	
120924P_002	2000	3.00	g+p	grande 4 fori	5.23	0.09	0.41	42.00	0.160	0.198	0.146	0.410	0.24	1.633	1.473	
120924P_003	3000	3.00	g+p	grande 4 fori	5.23	0.09	0.41	42.00	0.160	0.198	0.146	0.410	0.24	1.633	1.473	Pala 2

Allegato A

nome prova	onda	peso aggiuntivo	tipo di prova	smorzatore	posizione sistema	immersione pala	distanza cerniera pala galleggiante	inclinazione asta galleggiante	distanza effettiva pala-galleggiate	Profondità d'acqua al galleggiante	Affondamento galleggiante	Braccio pala		distanza del galleggiante dalla riva (calcolata)	distanza della pala dalla riva (calcolata)	Tipo di pala
#	#	[Kg]			[m]	d [m]	l1-l3 [m]	θ [°]	Dpg [m]	[m]	a [m]	b1 [m]	b2 [m]	x_s [m]	[m]	
120924P_004	1004	3.00	g+p	grande 4 fori	5.23	0.09	0.41	42.00	0.160	0.198	0.146	0.410	0.24	1.633	1.473	Pala2
120924P_005	RIF	3.00	g+p	grande 4 fori	5.23	0.09	0.41	42.00	0.160	0.198	0.146	0.410	0.24	1.633	1.473	Pala 3
120924P_006	2000	3.00	g+p	grande 4 fori	5.23	0.09	0.41	42.00	0.160	0.198	0.146	0.410	0.24	1.633	1.473	
120924P_007	3000	3.00	g+p	grande 4 fori	5.23	0.09	0.41	42.00	0.160	0.198	0.146	0.410	0.24	1.633	1.473	
120924P_008	1004	3.00	g+p	grande 4 fori	5.23	0.09	0.41	42.00	0.160	0.198	0.146	0.410	0.24	1.633	1.473	
121105P_001	RIF	3.00	g	grande 4 fori	5.23	ND	ND	42.00	ND	0.198	0.144	ND	ND	1.633		Solo galleggiante
121105P_002	2000	3.00	g	grande 4 fori	5.23	ND	Nd	42.00	ND	0.198	0.144	ND	ND	1.633		
121105P_003	3000	3.00	g	grande 4 fori	5.23	ND	ND	42.00	ND	0.198	0.144	ND	ND	1.633		
121105P_004	1004	3.00	g	grande 4 fori	5.23	ND	ND	42.00	ND	0.198	0.144	ND	ND	1.633		
121105P_005	RIF	ND	ND	ND	5.23	0.09	ND	42.00	ND		ND	0.41	0.24	0.000	1.473	Solo pala
121105P_006	2000	ND	ND	ND	5.23	0.09	ND	42.00	ND		ND	0.41	0.24	0.000	1.473	
121105P_007	3000	ND	ND	ND	5.23	0.09	ND	42.00	ND		ND	0.41	0.24	0.000	1.473	
121105P_008	1004	ND	ND	ND	5.23	0.09	ND	42.00	ND		ND	0.41	0.24	0.000	1.473	

ALLEGATO B: RISULTATI NUMERICI DEI TEST SUL SECONDO MODELLO

nome prova	E_up	E_down	EPaddle	T	b1eq	b2 eq	F_up	F_down	FPaddlemax	zmax	zmin	Ptot	Pav	Pav,D	$\eta_{sfruttabile}$	$\eta_{g,up}$	$\eta_{g,down}$	η_p	η_{tot}	
#	[J]	[J]	[J]	[s]	[N/(m/s)]	[N/(m/s)]	[N]	[N]	[N]	[m]	[m]	[W]	[W]	[W]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	
120823P_001																				
120823P_002	0.013	0.008	0.008	1.020	89.881	19.166	3.421	4.266	1.753	0.001	-0.006	0.028	2.510	0.502	4.060	2.530	1.579	1.530	5.639	
120823P_003	0.033	0.016	0.018	1.147	71.948	22.789	4.323	3.932	2.673	-0.002	-0.011									
120823P_004	0.058	0.068	0.033	1.020	83.164	19.511	4.851	7.558	3.608	-0.001	-0.017	0.156	9.090	1.818	4.934	3.144	3.669	1.789	8.603	
120823P_005																				
120823P_006	0.014	0.010	0.012	1.020	104.916	18.755	4.111	5.712	2.179	0.001	-0.005	0.035	2.510	0.502	5.016	2.651	1.889	2.364	6.905	
120823P_007	0.022	0.022	0.038	1.178	101.789	24.192	3.969	5.461	3.854	-0.001	-0.009	0.069	5.730	1.146	4.420	1.614	1.618	2.805	6.038	
120823P_008	0.052	0.068	0.046	1.020	102.567	19.122	4.859	7.634	4.264	0.000	-0.016	0.163	9.090	1.818	5.305	2.806	3.669	2.500	8.975	
120823P_009																				
120823P_010	0.036	0.026	0.016	1.020	87.408	27.622	4.231	4.139	2.510	0.007	-0.006	0.077	2.510	0.502	10.161	7.024	5.136	3.137	15.297	
120823P_011	0.071	0.070	0.049	1.197	62.401	32.759	4.288	4.819	4.370	0.009	-0.011	0.159	5.730	1.146	8.743	5.193	5.118	3.550	13.861	
120823P_012	0.109	0.171	0.102	1.020	83.737	23.969	5.494	8.960	6.310	0.015	-0.015	0.373	9.090	1.818	11.328	5.855	9.212	5.473	20.540	
120823P_013																				
120823P_014	0.025	0.025	0.020	1.020	100.806	25.336	3.798	5.876	2.830	0.006	-0.005	0.069	2.510	0.502	8.965	4.978	4.838	3.987	13.803	
120823P_015	0.063	0.077	0.060	1.197	73.974	28.745	4.365	5.911	4.870	0.008	-0.011	0.167	5.730	1.146	8.986	4.578	5.578	4.408	14.564	
120823P_016	0.104	0.183	0.104	1.020	87.768	23.936	5.458	9.237	6.399	0.016	-0.015	0.384	9.090	1.818	11.242	5.613	9.864	5.629	21.106	
120823P_017																				
120823P_018	0.029	0.031	0.014	1.020	90.436	28.400	3.993	6.481	2.370	0.008	-0.003	0.073	2.510	0.502	8.424	5.626	6.075	2.797	14.499	

Allegato B

nome prova	E_up	E_down	EPaddle	T	b1eq	b2 eq	F_up	F_down	FPaddlemax	zmax	zmin	Ptot	Pav	Pav,D	$\eta_{sfruttabile}$	$\eta_{g,up}$	$\eta_{g,down}$	η_p	η_{tot}
#	[J]	[J]	[J]	[s]	[N/(m/s)]	[N/(m/s)]	[N]	[N]	[N]	[m]	[m]	[W]	[W]	[W]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
120823P_019	0.048	0.052	0.031	1.197	72.800	30.500	4.288	5.839	3.475	0.009	-0.005	0.109	5.730	1.146	5.736	3.491	3.818	2.245	9.554
120823P_020	0.089	0.130	0.102	1.020	87.941	22.380	5.542	8.683	6.332	0.018	-0.007	0.315	9.090	1.818	10.326	4.815	7.025	5.511	17.351
120823P_021																			
120823P_022	0.028	0.033	0.034	1.020	97.919	21.439	3.885	6.018	3.665	0.009	-0.003	0.094	2.510	0.502	12.229	5.540	6.463	6.689	18.692
120823P_023	0.055	0.062	0.093	1.197	75.042	28.800	4.479	5.751	6.031	0.011	-0.005	0.175	5.730	1.146	10.777	4.016	4.508	6.762	15.285
120823P_024	0.096	0.158	0.142	1.020	85.131	22.479	5.570	9.353	7.459	0.019	-0.008	0.387	9.090	1.818	12.803	5.155	8.493	7.648	21.296
120824P_001																			
120824P_002	0.015	0.015	0.020	1.020	90.273	18.610	3.728	4.811	2.815	0.007	-0.001	0.049	2.510	0.502	6.957	3.011	2.892	3.946	9.850
120824P_003	0.053	0.067	0.076	1.197	67.103	22.083	4.013	5.316	5.469	0.010	-0.008	0.164	5.730	1.146	9.427	3.868	4.884	5.559	14.311
120824P_004	0.061	0.076	0.069	1.020	65.463	20.698	3.944	4.976	5.184	0.016	-0.008	0.202	9.090	1.818	6.968	3.274	4.120	3.694	11.088
120824P_005																			
120824P_006	0.031	0.019	0.017	1.020	64.726	18.702	3.443	3.366	2.600	0.000	-0.013	0.066	2.510	0.502	9.496	6.132	3.712	3.365	13.208
120824P_007	0.071	0.083	0.076	1.197	53.748	21.389	3.381	4.901	5.452	0.008	-0.018	0.192	5.730	1.146	10.682	5.157	6.072	5.525	16.754
120824P_008	0.083	0.087	0.064	1.020	62.294	21.375	4.354	4.995	4.996	0.010	-0.018	0.229	9.090	1.818	7.904	4.473	4.695	3.432	12.599
120824P_009																			
120824P_010	0.017	0.015	0.023	1.020	91.532	22.078	3.279	4.252	2.990	0.007	-0.002	0.054	2.510	0.502	7.835	3.384	2.846	4.451	10.681
120824P_011	0.082	0.106	0.113	1.197	61.069	21.046	5.297	6.641	6.661	0.009	-0.012	0.251	5.730	1.146	14.219	5.971	7.715	8.248	21.934
120824P_012	0.050	0.069	0.085	1.020	83.053	20.795	4.829	6.859	5.775	0.010	-0.006	0.200	9.090	1.818	7.287	2.701	3.716	4.586	11.003

Allegato B

nome prova	E_up	E_down	EPaddle	T	b1eq	b2 eq	F_up	F_down	FPaddlemax	zmax	zmin	Ptot	Pav	Pav,D	$\eta_{sfruttabile}$	$\eta_{g,up}$	$\eta_{g,down}$	η_p	η_{tot}	
#	[J]	[J]	[J]	[s]	[N/(m/s)]	[N/(m/s)]	[N]	[N]	[N]	[m]	[m]	[W]	[W]	[W]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	
120827P_001																				
120827P_002	0.038	0.041	0.031	1.020	58.232	22.119	2.765	3.375	3.489	0.012	-0.008	0.108	2.510	0.502	13.493	7.432	8.040	6.061	21.533	
120827P_003																				
120827P_004	0.030	0.026	0.036	1.020	65.838	20.927	3.645	3.527	3.777	0.003	-0.011	0.090	2.510	0.502	12.914	5.811	5.097	7.103	18.011	
120827P_005	0.103	0.114	0.167	1.197	51.481	18.889	6.095	6.318	8.103	0.010	-0.016	0.321	5.730	1.146	19.724	7.521	8.325	12.203	28.049	
120827P_006	0.070	0.066	0.159	1.020	65.857	17.561	5.783	5.750	7.891	0.013	-0.008	0.289	9.090	1.818	12.338	3.778	3.549	8.560	15.887	
120827P_007																				
120827P_008																				
120827P_009	0.050	0.058	0.034	1.020	75.891	236.684	3.798	6.074	3.633	0.011	-0.008	0.138	2.510	0.502	16.244	9.674	11.275	6.571	27.520	
120827P_010	0.096	0.104	0.074	1.197	71.664	33.906	4.808	6.171	5.396	0.014	-0.011	0.229	5.730	1.146	12.386	6.973	7.600	5.413	19.986	
120827P_011	0.116	0.120	0.185	1.016	83.568	108.689	5.929	7.368	8.527	0.021	-0.006	0.415	9.090	1.818	16.299	6.263	6.519	10.036	22.818	
120827P_012																				
120827P_013	0.053	0.031	0.037	1.020	66.358	48.881	4.324	3.669	3.807	0.012	-0.006	0.118	2.510	0.502	17.609	10.395	5.960	7.214	23.569	
120827P_014	0.090	0.081	0.086	1.197	54.167	27.241	4.478	4.358	5.820	0.018	-0.009	0.215	5.730	1.146	12.864	6.570	5.916	6.295	18.780	
120827P_015	0.115	0.090	0.205	1.020	69.336	36.379	6.093	5.737	8.964	0.024	-0.004	0.402	9.090	1.818	17.259	6.213	4.874	11.047	22.133	
120828P_001																				
120828P_002	0.032	0.030	0.019	1.020	72.547	18.909	3.645	4.217	2.751	0.006	-0.007	0.079	2.510	0.502	9.936	6.168	5.893	3.768	15.829	
120828P_003	0.098	0.076	0.078	1.197	39.799	23.076	4.691	3.930	5.514	0.018	-0.013	0.210	5.730	1.146	12.811	7.160	5.532	5.651	18.343	

Allegato B

nome prova	E_up	E_down	EPaddle	T	b1eq	b2 eq	F_up	F_down	FPaddlemax	zmax	zmin	Ptot	Pav	Pav,D	$\eta_{sfruttabile}$	$\eta_{g,up}$	$\eta_{g,down}$	η_p	η_{tot}
#	[J]	[J]	[J]	[s]	[N/(m/s)]	[N/(m/s)]	[N]	[N]	[N]	[m]	[m]	[W]	[W]	[W]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
120828P_004	0.135	0.083	0.154	1.020	53.874	20.287	7.196	4.489	7.780	0.024	-0.008	0.365	9.090	1.818	15.614	7.294	4.452	8.321	20.066
120828P_005																			
120828P_006	0.046	0.034	0.012	1.020	51.525	22.234	3.216	2.932	2.200	0.009	-0.011	0.090	2.510	0.502	11.318	8.908	6.606	2.409	17.924
120828P_007	0.106	0.102	0.043	1.197	41.273	23.139	4.188	4.402	4.114	0.014	-0.017	0.210	5.730	1.146	10.887	7.741	7.424	3.145	18.311
120828P_008	0.101	0.104	0.049	1.020	63.969	19.770	5.476	5.308	4.376	0.015	-0.014	0.248	9.090	1.818	8.065	5.433	5.597	2.633	13.662
120828P_009																			
120828P_010																			
120828P_011	0.069	0.044	0.028	1.020	70.553	1143.706	4.650	4.542	3.294	0.013	-0.008	0.138	2.510	0.502	18.897	13.495	8.584	5.402	27.481
120828P_012	0.105	0.034	0.049	1.197	48.164	NaN	4.759	2.451	4.379	0.015	-0.011								
120828P_013	0.077	0.035	0.129	1.020	58.435	22.819	4.865	2.919	7.105	0.024	0.001	0.235	9.090	1.818	11.063	4.125	1.872	6.938	12.935
120828P_014																			
120828P_015	0.070	0.025	0.026	1.020	58.975	105.364	4.702	2.955	3.200	0.015	-0.007	0.119	2.510	0.502	18.755	13.657	4.973	5.097	23.728
120828P_016	0.100	0.051	0.043	1.197	54.871	34.157	5.056	3.657	4.126	0.016	-0.009	0.163	5.730	1.146	10.456	7.291	3.750	3.164	14.206
120828P_017	0.099	0.071	0.149	1.020	62.791	39.017	5.572	4.744	7.646	0.024	-0.003	0.313	9.090	1.818	13.377	5.341	3.817	8.036	17.194
120828P_018																			
120828P_019	0.046	0.031	0.020	1.020	46.702	26.768	3.352	3.020	2.769	0.011	-0.010	0.094	2.510	0.502	12.790	8.972	6.022	3.818	18.813
120828P_020	0.086	0.051	0.037	1.197	50.390	27.559	4.693	3.781	3.834	0.014	-0.011	0.146	5.730	1.146	9.028	6.296	3.685	2.732	12.713
120828P_021	0.146	0.118	0.129	1.020	62.974	22.350	6.966	6.528	7.112	0.023	-0.011	0.385	9.090	1.818	14.813	7.859	6.339	6.953	21.152

Allegato B

nome prova	E_up	E_down	EPaddle	T	b1eq	b2 eq	F_up	F_down	FPaddlemax	zmax	zmin	Ptot	Pav	Pav,D	$\eta_{sfruttabile}$	$\eta_{g,up}$	$\eta_{g,down}$	η_p	η_{tot}	
#	[J]	[J]	[J]	[s]	[N/(m/s)]	[N/(m/s)]	[N]	[N]	[N]	[m]	[m]	[W]	[W]	[W]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	
120828P_022																				
120828P_023	0.047	0.033	0.014	1.020	61.706	24.502	3.673	3.372	2.371	0.010	-0.009	0.093	2.510	0.502	12.016	9.218	6.450	2.798	18.466	
120828P_024	0.092	0.075	0.034	1.197	47.028	29.201	4.300	4.142	3.660	0.012	-0.014	0.169	5.730	1.146	9.214	6.725	5.493	2.490	14.708	
120828P_025	0.130	0.167	0.074	1.020	66.638	22.362	5.614	7.899	5.392	0.019	-0.016	0.364	9.090	1.818	11.011	7.015	9.011	3.996	20.021	
120903P_001																				
120903P_002	0.029	0.026	0.040	1.020	93.395	NaN	3.555	2.890	3.975	0.008	-0.005	0.093	2.510	0.502	13.531	5.667	4.987	7.864	18.518	
120903P_003	0.071	0.069	0.120	1.197	66.446	NaN	4.095	3.905	6.850	0.016	-0.006	0.217	5.730	1.146	13.924	5.201	5.040	8.723	18.963	
120903P_004	0.104	0.066	0.152	1.020	56.527	NaN	5.459	3.635	7.713	0.026	-0.003	0.315	9.090	1.818	13.814	5.635	3.535	8.179	17.349	
120903P_005	0.030	0.023	0.061	1.020	72.647	NaN	3.178	2.451	4.879	0.012	-0.002	0.112	2.510	0.502	17.807	5.955	4.501	11.852	22.308	
120903P_006	0.092	0.065	0.138	1.197	60.387	NaN	4.554	3.524	7.353	0.022	-0.003	0.247	5.730	1.146	16.788	6.738	4.742	10.050	21.529	
120903P_007	0.064	0.086	0.145	1.020	118.268	NaN	4.901	7.482	7.529	0.018	0.000	0.289	9.090	1.818	11.232	3.438	4.659	7.793	15.890	
120903P_008	0.027	0.036	0.025	1.020	135.888	NaN	3.253	5.594	3.123	0.007	-0.004	0.085	2.510	0.502	10.032	5.176	6.940	4.856	16.972	
120903P_009	0.091	0.111	0.084	1.197	78.778	NaN	4.685	6.012	5.746	0.018	-0.006	0.239	5.730	1.146	12.793	6.655	8.057	6.137	20.850	
120903P_010	0.097	0.140	0.153	1.020	97.766	NaN	5.381	7.942	7.749	0.023	-0.003	0.383	9.090	1.818	13.495	5.241	7.562	8.254	21.057	
120903P_011	0.068	0.056	0.014	1.020	52.857	NaN	3.977	3.446	2.336	0.018	-0.008	0.135	2.510	0.502	15.951	13.234	10.896	2.717	26.847	
120903P_012	0.136	0.188	0.072	1.197	60.757	NaN	4.987	6.862	5.318	0.025	-0.009	0.331	5.730	1.146	15.193	9.936	13.710	5.257	28.903	
120903P_013	0.180	0.130	0.120	1.020	56.539	NaN	7.883	5.017	6.846	0.015	-0.025	0.421	9.090	1.818	16.160	9.717	6.999	6.444	23.159	
120903P_014																				

Allegato B

nome prova	E_up	E_down	EPaddle	T	b1eq	b2 eq	F_up	F_down	FPaddlemax	zmax	zmin	Ptot	Pav	Pav,D	$\eta_{sfruttabile}$	$\eta_{g,up}$	$\eta_{g,down}$	η_p	η_{tot}
#	[J]	[J]	[J]	[s]	[N/(m/s)]	[N/(m/s)]	[N]	[N]	[N]	[m]	[m]	[W]	[W]	[W]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
120903P_015	0.061	0.054	0.032	1.020	63.388	31.626	4.105	3.913	3.548	0.012	-0.010	0.145	2.510	0.502	18.177	11.910	10.634	6.267	28.810
120903P_016	0.154	0.162	0.126	1.197	60.389	35.584	5.948	6.443	7.024	0.021	-0.012	0.369	5.730	1.146	20.422	11.252	11.783	9.170	32.205
120903P_017	0.161	0.149	0.142	1.020	67.611	26.676	7.663	7.157	7.450	0.025	-0.010	0.442	9.090	1.818	16.292	8.660	8.044	7.632	24.336
120903P_018	0.057	0.051	0.058	1.020	64.510	21.460	4.202	3.779	4.753	0.011	-0.010	0.162	2.510	0.502	22.423	11.175	9.884	11.248	32.308
120903P_019	0.095	0.114	0.143	1.197	58.940	22.962	4.501	5.450	7.495	0.017	-0.010	0.294	5.730	1.146	17.346	6.904	8.318	10.442	25.663
120903P_020	0.141	0.152	0.163	1.020	77.109	23.245	6.859	8.144	7.984	0.031	0.000	0.447	9.090	1.818	16.360	7.596	8.206	8.765	24.567
120903P_021	0.035	0.041	0.031	1.020	128.623	21.656	3.807	5.609	3.492	0.015	0.003	0.105	2.510	0.502	12.832	6.762	7.989	6.070	20.821
120903P_022	0.103	0.106	0.114	1.197	68.503	22.908	5.042	5.375	6.685	0.025	0.000	0.269	5.730	1.146	15.786	7.478	7.712	8.308	23.498
120903P_023	0.147	0.165	0.165	1.020	85.602	21.501	7.233	7.788	8.040	0.031	0.000	0.468	9.090	1.818	16.813	7.925	8.919	8.888	25.732
120904P_001																			
120904P_002	0.070	0.050	0.010	1.020	58.215	31.425	4.425	3.381	1.950	-0.005	-0.029	0.128	2.510	0.502	15.582	13.688	9.859	1.894	25.442
120904P_003	0.144	0.122	0.070	1.197	52.031	21.806	5.752	5.009	5.241	0.005	-0.029	0.281	5.730	1.146	15.615	10.510	8.901	5.105	24.516
120904P_004	0.202	0.159	0.110	1.020	68.580	23.524	8.331	6.519	6.581	0.009	-0.028	0.461	9.090	1.818	16.826	10.871	8.553	5.955	25.379
120904P_005																			
120904P_006	0.060	0.061	0.053	1.020	60.478	22.627	4.095	4.278	4.569	0.011	-0.011	0.171	2.510	0.502	22.128	11.732	11.960	10.396	34.088
120904P_007	0.140	0.159	0.166	1.197	54.375	21.678	5.716	6.189	8.072	0.020	-0.014	0.389	5.730	1.146	22.294	10.182	11.624	12.111	33.917
120904P_008	0.161	0.156	0.192	1.020	67.167	20.802	7.200	7.076	8.685	0.027	-0.006	0.499	9.090	1.818	19.035	8.665	8.424	10.371	27.459
120904P_009	0.063	0.053	0.042	1.020	59.361	20.339	4.170	3.905	4.071	0.012	-0.011	0.155	2.510	0.502	20.608	12.357	10.261	8.251	30.869

Allegato B

nome prova	E_up	E_down	EPaddle	T	b1eq	b2 eq	F_up	F_down	FPaddlemax	zmax	zmin	Ptot	Pav	Pav,D	$\eta_{sfruttabile}$	$\eta_{g,up}$	$\eta_{g,down}$	η_p	η_{tot}
#	[J]	[J]	[J]	[s]	[N/(m/s)]	[N/(m/s)]	[N]	[N]	[N]	[m]	[m]	[W]	[W]	[W]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
120904P_010	0.142	0.126	0.131	1.197	52.504	19.124	5.941	5.422	7.176	0.019	-0.014	0.334	5.730	1.146	19.930	10.357	9.219	9.573	29.149
120904P_011	0.170	0.152	0.200	1.020	64.671	19.139	7.496	6.790	8.861	0.028	-0.007	0.511	9.090	1.818	19.936	9.142	8.186	10.793	28.122
120904P_012	0.072	0.053	0.018	1.020	56.246	19.775	4.461	3.600	2.642	0.015	-0.010	0.140	2.510	0.502	17.495	14.019	10.379	3.476	27.874
120904P_013	0.155	0.149	0.079	1.197	50.533	19.668	6.000	5.876	5.581	0.023	-0.014	0.321	5.730	1.146	17.106	11.315	10.866	5.791	27.972
120904P_014	0.202	0.161	0.126	1.020	67.021	19.205	8.180	6.398	7.032	0.031	-0.007	0.479	9.090	1.818	17.667	10.868	8.663	6.798	26.330
120914_p02	0.034	0.032	0.073	1.020	62.172	19.899	3.411	3.569	5.356	0.009	-0.008	0.136	2.510	0.502	20.895	6.620	6.190	14.275	27.085
120914_p03	0.073	0.087	0.138	1.197	51.810	22.113	3.930	5.239	7.356	0.015	-0.011	0.249	5.730	1.146	15.383	5.329	6.343	10.054	21.726
120914_p04	0.082	0.080	0.157	1.020	62.826	20.905	4.908	5.369	7.857	0.019	-0.007	0.313	9.090	1.818	12.889	4.400	4.325	8.488	17.213
120914_p05	0.030	0.036	0.057	1.020	87.603	18.854	3.384	5.186	4.709	0.008	-0.005	0.120	2.510	0.502	16.813	5.780	7.089	11.033	23.902
120914_p06																			
120914_p07	0.037	0.026	0.065	1.020	53.661	24.376	3.224	2.816	5.031	0.012	-0.006	0.125	2.510	0.502	19.803	7.206	5.039	12.597	24.842
120914_p08	0.094	0.083	0.165	1.197	47.719	25.568	4.453	4.039	8.047	0.019	-0.010	0.286	5.730	1.146	18.920	6.883	6.044	12.038	24.965
120914_p09																			
120914_p10	0.041	0.035	0.090	1.020	49.276	23.206	3.288	3.489	5.927	0.012	-0.008	0.162	2.510	0.502	25.467	7.968	6.835	17.499	32.302
120914_p11	0.096	0.092	0.212	1.197	46.086	23.512	4.565	4.948	9.126	0.019	-0.010	0.334	5.730	1.146	22.462	6.984	6.671	15.478	29.133
120914_p12	0.111	0.089	0.232	1.020	54.886	24.680	5.535	5.483	9.541	0.026	-0.005	0.424	9.090	1.818	18.524	6.007	4.794	12.516	23.318
120914_p13	0.103	0.079	0.322	1.406	36.288	30.247	4.234	4.111	11.238	0.023	-0.006	0.358	11.220	2.244	13.463	3.253	2.498	10.209	15.961
120918P_001																			

Allegato B

nome prova	E_up	E_down	EPaddle	T	b1eq	b2 eq	F_up	F_down	FPaddlemax	zmax	zmin	Ptot	Pav	Pav,D	$\eta_{sfruttabile}$	$\eta_{g,up}$	$\eta_{g,down}$	η_p	η_{tot}
#	[J]	[J]	[J]	[s]	[N/(m/s)]	[N/(m/s)]	[N]	[N]	[N]	[m]	[m]	[W]	[W]	[W]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
120918P_002	0.050	0.020	0.105	1.020	40.125	29.832	3.809	1.891	6.431	0.014	-0.008	0.172	2.510	0.502	30.366	9.783	3.906	20.582	34.271
120918P_003	0.095	0.055	0.236	1.197	37.489	26.011	4.637	3.014	9.625	0.020	-0.010	0.322	5.730	1.146	24.134	6.912	3.974	17.222	28.107
120918P_004	0.089	0.043	0.246	1.020	46.162	32.397	5.210	3.006	9.818	0.023	-0.005	0.370	9.090	1.818	18.058	4.810	2.302	13.249	20.361
120919P_001																			
120919P_002	0.060	0.026	0.085	1.020	38.016	26.555	3.967	2.034	5.763	0.018	-0.008	0.167	2.510	0.502	28.257	11.717	5.058	16.540	33.314
120919P_003	0.100	0.059	0.202	1.197	36.399	24.627	4.494	2.794	8.902	0.020	-0.011	0.301	5.730	1.146	21.981	7.254	4.301	14.727	26.282
120919P_004	0.093	0.038	0.187	1.020	42.585	23.497	5.548	2.940	8.575	0.022	-0.007	0.312	9.090	1.818	15.141	5.036	2.033	10.105	17.174
120919P_005																			
120919P_006	0.064	0.032	0.125	1.020	40.064	25.121	4.318	2.571	7.014	0.017	-0.008	0.216	2.510	0.502	36.888	12.400	6.151	24.488	43.039
120919P_007	0.128	0.079	0.244	1.197	39.265	22.468	5.837	3.952	9.779	0.023	-0.011	0.376	5.730	1.146	27.099	9.325	5.745	17.774	32.844
120919P_008	0.090	0.044	0.251	1.020	43.649	22.971	5.525	3.315	9.918	0.023	-0.005	0.378	9.090	1.818	18.396	4.874	2.378	13.522	20.774
120919P_009																			
120919P_010	0.038	0.011	0.157	1.020	35.095	21.199	3.576	1.343	7.838	0.014	-0.006	0.202	2.510	0.502	38.044	7.460	2.168	30.584	40.212
120919P_011	0.062	0.025	0.225	1.197	34.219	26.789	3.707	1.601	9.398	0.020	-0.004	0.261	5.730	1.146	20.938	4.514	1.838	16.424	22.776
120919P_012	0.060	0.019	0.302	1.020	40.562	24.473	4.315	1.514	10.882	0.026	0.003	0.373	9.090	1.818	19.500	3.219	1.014	16.281	20.514
120920P_001																			
120920P_002	0.062	0.015	0.111	1.020	45.464	32.140	4.288	1.657	6.588	0.013	-0.008	0.183	2.510	0.502	33.689	12.069	2.851	21.619	36.540
120920P_003	0.153	0.041	0.273	1.197	36.963	26.815	5.893	2.273	10.339	0.024	-0.011	0.390	5.730	1.146	31.028	11.162	2.996	19.867	34.025

Allegato B

nome prova	E_up	E_down	EPaddle	T	b1eq	b2 eq	F_up	F_down	FPaddlemax	zmax	zmin	Ptot	Pav	Pav,D	$\eta_{sfruttabile}$	$\eta_{g,up}$	$\eta_{g,down}$	η_p	η_{tot}
#	[J]	[J]	[J]	[s]	[N/(m/s)]	[N/(m/s)]	[N]	[N]	[N]	[m]	[m]	[W]	[W]	[W]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
120920P_004	0.125	0.023	0.297	1.020	41.881	32.576	6.277	2.033	10.796	0.027	-0.004	0.437	9.090	1.818	22.755	6.735	1.262	16.020	24.017
120921P_001																			
120921P_002	-0.126	0.210	0.099	1.020	40.840	32.335	2.990	18.201	6.244	0.012	-0.011	0.179	2.510	0.502	-5.195	-24.607	40.934	19.413	35.739
120921P_003	-14.364	14.505	0.254	1.197	26.593	25.224	-422.690	435.598	9.989	0.021	-0.013	0.330	5.730	1.146	-1028.725	-1047.274	1057.554	18.549	28.829
120921P_004	0.100	0.047	0.264	1.020	41.768	39.995	5.512	2.975	10.167	0.026	-0.006	0.403	9.090	1.818	19.597	5.387	2.556	14.210	22.153
120921P_005																			
120921P_006	0.046	0.028	0.094	1.020	33.672	30.830	3.099	2.315	6.075	0.014	-0.010	0.165	2.510	0.502	27.420	9.042	5.429	18.377	32.849
120921P_007	0.130	0.101	0.242	1.197	37.660	24.077	5.579	4.343	9.747	0.022	-0.013	0.395	5.730	1.146	27.145	9.486	7.357	17.659	34.502
120921P_008	0.081	0.047	0.280	1.020	39.896	27.593	5.037	3.129	10.482	0.025	-0.003	0.401	9.090	1.818	19.480	4.378	2.556	15.102	22.036
120921P_009																			
120921P_010																			
120921P_011																			
120921P_012	0.045	0.018	0.102	1.020	32.496	27.999	3.186	1.734	6.339	0.014	-0.010	0.162	2.510	0.502	28.787	8.788	3.554	19.998	32.341
120921P_013	0.109	0.063	0.258	1.197	35.436	25.260	4.925	2.993	10.063	0.022	-0.100	0.360	5.730	1.146	26.802	7.976	4.579	18.826	31.381
120921P_014	0.078	0.036	0.255	1.020	40.047	28.799	4.554	2.551	10.007	0.025	-0.003	0.362	9.090	1.818	17.945	4.179	1.941	13.766	19.886
120924P_001																			
120924P_002	0.060	0.034	0.110	1.020	37.110	29.238	3.672	2.550	6.565	0.016	-0.010	0.199	2.510	0.502	33.122	11.659	6.542	21.463	39.665
120924P_003	0.132	0.089	0.242	1.197	38.174	24.270	5.442	3.960	9.751	0.024	-0.011	0.387	5.730	1.146	27.269	9.595	6.504	17.674	33.772

Allegato B

nome prova	E_up	E_down	EPaddle	T	b1eq	b2 eq	F_up	F_down	FPaddlemax	zmax	zmin	Ptot	Pav	Pav,D	$\eta_{sfruttabile}$	$\eta_{g,up}$	$\eta_{g,down}$	η_p	η_{tot}
#	[J]	[J]	[J]	[s]	[N/(m/s)]	[N/(m/s)]	[N]	[N]	[N]	[m]	[m]	[W]	[W]	[W]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
120924P_004	0.099	0.046	0.250	1.020	41.374	31.800	5.454	2.926	9.897	0.027	-0.004	0.386	9.090	1.818	18.776	5.311	2.470	13.464	21.245
120924P_005																			
120924P_006	0.051	0.033	0.107	1.020	34.738	31.737	3.304	2.639	6.471	0.016	-0.010	0.187	2.510	0.502	30.896	10.038	6.425	20.858	37.321
120924P_007	0.130	0.098	0.243	1.197	37.556	24.410	5.442	4.322	9.759	0.023	-0.012	0.393	5.730	1.146	27.159	9.457	7.131	17.703	34.290
120924P_008	0.089	0.048	0.269	1.020	40.957	28.327	5.226	2.974	10.280	0.026	-0.003	0.398	9.090	1.818	19.302	4.777	2.572	14.525	21.874
121105P_001																			
121105P_002	0.077	0.027	0.000	1.020	36.637	0.018	4.122	2.205	0.000	0.017	0.012	0.102	2.510	0.502	15.115	15.115	5.233	0.000	20.348
121105P_003	0.240	0.136	0.000	1.197	42.321	148.685	7.885	5.188	-0.043	0.024	-0.021	0.314	5.730	1.146	17.526	17.526	9.893	0.000	27.420
121105P_004	0.228	0.099	0.000	1.020	48.638	167.176	9.170	4.352	-0.045	0.026	-0.017	0.321	9.090	1.818	12.316	12.316	5.322	0.000	17.638
121105P_005																			
121105P_006	0.000	0.000	0.081	1.020								0.079	2.510	0.502	0.000	0.000	0.000	15.818	15.818
121105P_007	0.000	0.000	0.225	1.197								0.188	5.730	1.146	0.000	0.000	0.000	16.404	16.404
121105P_008	0.000	0.000	0.272	1.020								0.267	9.090	1.818	0.000	0.000	0.000	14.677	14.677