



Ricerca di Sistema elettrico

Prototipazione ed esecuzione della campagna sperimentale

B. Fenu, M. Serra, F. Niosi, S.A. Sirigu, B. Paduano, G. Bracco, G.
Mattiazzo

PROTOTIPAZIONE ED ESECUZIONE DELLA CAMPAGNA SPERIMENTALE

B. Fenu, M. Serra, F. Niosi, B. Paduano S.A. Sirigu, G. Bracco, G. Mattiazzo
Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: *Tecnologie*

Progetto: 1.8 Energia elettrica dal mare

Work package: WP1 – Energia elettrica dal mare

Linea di attività: LA1.15: Prototipazione ed esecuzione della campagna sperimentale

Responsabile del Progetto: Gianmaria Sannino ENEA

Responsabile del Work package: Gianmaria Sannino ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Piano triennale di realizzazione 2019-2021 della ricerca di sistema elettrico nazionale*"

Responsabile scientifico ENEA: Gianmaria Sannino

Responsabile scientifico Politecnico di Torino: Giuliana Mattiazzo

Sommario

SOMMARIO	3
1 INTRODUZIONE.....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
2 DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ SPERIMENTALE	7
2.1 SETUP DELLA VASCA NAVALE	7
2.2 IL FONDALE ARTIFICIALE.....	8
2.3 SETUP DELLA SENSORISTICA OFF-BOARD	9
2.3.1 <i>Wave probes</i>	9
2.3.2 <i>Sistema motion capture Qualisys</i>	11
2.4 SETUP DEL DISPOSITIVO.....	13
2.4.1 <i>Misure sperimentali delle proprietà inerziali e geometriche</i>	14
2.5 SISTEMA DI ORMEGGIO	16
2.6 SISTEMA DI ACQUISIZIONE E SENSORISTICA	21
3 TEST ONDE A VUOTO.....	25
3.1 ONDE REGOLARI	25
3.1.1 <i>Onde regolari operative a steepness 1:30</i>	25
3.1.2 <i>Onde regolari operative a steepness 1:50</i>	30
3.1.3 <i>Onda regolare estrema</i>	31
3.1.4 <i>Onde regolari: analisi dei limiti sul periodo</i>	31
3.2 ONDE IRREGOLARI.....	35
4 RISULTATI.....	36
4.1 FREE DECAY.....	36
4.1.1 <i>Caso senza ormeggio</i>	36
4.1.2 <i>Caso con ormeggio</i>	37
4.2 PULL-OUT DELLE CELLE DI CARICO SUL SISTEMA DI ORMEGGIO	38
4.3 ONDE REGOLARI	39
4.4 ONDE IRREGOLARI.....	42
4.5 ONDE SEVERE ED ESTREME	43
4.5.1 <i>Regolari severe</i>	43
4.5.2 <i>Irregolari estreme</i>	44
4.6 DENSITÀ SPETTRALI	46
4.7 RESPONSE AMPLITUDE OPERATORS (RAOs).....	47
4.7.1 <i>Regolari con ormeggio</i>	47
5 CONCLUSIONI	49

6 APPENDICE..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

7 BIBLIOGRAFIA50

Indice delle tabelle

Tabella 2.1. Caratteristiche geometriche della vasca navale7

Tabella 2.2. Onde (nominali) generate dall’ondogeno della vasca navale7

Tabella 2.3. Caratteristiche geometriche del fondale artificiale.....8

Tabella 2.4. Quote delle wave probes, configurazione a vuoto 11

Tabella 2.5. Quote del sistema qualisys11

Tabella 2.6. Misure del dispositivo in scala reale e in scala modello.....13

Tabella 2.7. Misure sperimentali delle grandezze geometriche e inerziali del dispositivo15

Tabella 2.8. Caratteristiche delle molle nel sistema di ormeggio scalate.....18

Tabella 2.9. caratteristiche ormeggio19

Tabella 2.10. descrizione e scalatura della catena dell’ormeggio19

Tabella 2.11. scalatura sollecitazioni sullo scafo e sull’ormeggio21

Tabella 2.12. Componenti sistema d’acquisizione21

Tabella 2.13. Rapporti di trasformazione dei sensori on-board22

Tabella 2.14. Schema riassuntivo di posizionamento e identificativi dei sensori di pressione24

Tabella 3.1. Prove a vuoto, onde regolari operative a steepness 1:30.....25

Tabella 3.2. ELENCO DEI TEST26

Tabella 3.3. Prove a vuoto, onde regolari operative a steepness 1:50.....30

Tabella 3.4. prove a vuoto, onda regolare severa31

Tabella 3.5. Prove a vuoto, onde irregolari operative e severe35

Indice delle figure

Figura 2.1. Disposizione dei pannelli e dei tiranti che compongono il fondale artificiale8

Figura 2.2. Fondale artificiale della vasca prova. CAD di progettazione9

Figura 2.3. Wave probes viste dal carroponete10

Figura 2.4. Posizionamento delle wave probes, configurazione a vuoto10

Figura 2.5. Posizionamento delle wave probes, configurazione operativa11

Figura 2.6. Quote del sistema Qualisys12

Figura 2.7. Posizione delle tre camere del sistema qualisys. CAD di progettazione12

Figura 2.8. Foto del posizionamento del sistema Qualisys sul carro dinamometrico.12

Figura 2.9. CAD del dispositivo, struttura interna (castello di sostegno, zavorre, sensoristica).13

Figura 2.10. Bilancia inerziale con prototipo e posizionamento accelerometro.14

Figura 2.11. CAD della struttura interna del prototipo.15

Figura 2.12. Foto della struttura interna del prototipo16

Figura 2.13. configurazione ormeggio ambiente orcaflex17

Figura 2.14. Configurazione ormeggio a 0° in vasca navale.....18

Figura 2.15. Disposizione del sistema di ormeggio a 0° rispetto alla posizione dei cavi del fondale artificiale19

Figura 2.16. Configurazione ormeggio a 0°, 45°, 90.....20

Figura 2.17. Schema del sistema d’acquisizione21

Figura 2.18. Elementi principali della circuiteria on-board visti dall’alto.22

Figura 2.19. Riferimento per la disposizione dei sensori22

Figura 2.20. Quote dei sensori di pressione sulla superficie laterale di sinistra dello scafo23

Figura 2.21. Quote dei sensori di pressione sulla superficie laterale di destra dello scafo23

Figura 2.22. Quote dei sensori di pressione sulla culla (prua)23

Figura 2.23. Quote dei sensori di pressione sulla culla (poppa)24

Figura 2.24. Posizionamento e identificativi delle celle di carico. Scafo visto dall’alto24

Figura 3.1. Prove a vuoto, onde regolari operative a steepness 1:30. Confronto tra dati teorici e sperimentali25

Figura 3.2. Onde regolari operative a vuoto ($s = 1:30$). Errore tra altezze teoriche e sperimentali rispetto T	30
Figura 3.3. Prove a vuoto, onde regolari operative a steepness 1:50. Confronto tra dati teorici e sperimentali.....	30
Figura 3.4. Onde regolari operative a vuoto ($s = 1:50$). Errore tra altezze teoriche e sperimentali rispetto T	31
Figura 3.5. Onda regolare a $T=0.8$ s e $H=3.3$ cm: caso limite inferiore. Storia temporale delle sonde 1, 2, 3, 4, 6	32
Figura 3.6. Onda regolare a $T=0.8$ s e $H=3.3$ cm: caso limite inferiore. FFT della sonda 5	32
Figura 3.7. Onda regolare a $T=0.8$ s e $H=3.3$ cm: caso limite inferiore. Confronto tra periodi e altezze rilevati dalle diverse sonde.	33
Figura 3.8. Onda regolare a $T=1.6$ s e $H=8$ cm: caso limite superiore. Storia temporale delle sonde 1, 2, 3, 4, 6	33
Figura 3.9. Onda regolare a $T=1.6$ s e $H=8$ cm: caso limite superiore. FFT della sonda 5	34
Figura 3.10. Onda regolare a $T=1.6$ s e $H=8$ cm: caso limite superiore. Confronto tra periodi e altezze rilevati dalle diverse sonde.	34
Figura 3.11. Prove a vuoto, onde irregolari operative e estreme. Confronto tra dati teorici e sperimentali.	35
Figura 3.12. Onde irregolari operative ed estreme a vuoto. Errore di H_s e T_e	35
Figura 4.1. Moto a Roll senza ormeggio.....	36
Figura 4.2. Moto a Pitch senza ormeggio.....	36
Figura 4.3. Moto a Roll con ormeggio	37
Figura 4.4. Moto a Pitch con ormeggio	37
Figura 4.5. Moto a Yaw con ormeggio	37
Figura 4.6. Moto a Surge con ormeggio.....	38
Figura 4.7. Moto a Sway con ormeggio.....	38
Figura 4.8. Pull-out celle di carico a poppa, moto a Surge.....	39
Figura 4.9. Pull-out celle di carico a destra, moto a Sway	39
Figura 4.10. Confronto sistemi di acquisizione cRIO e Qualisys per storia temporale a Roll e a Pitch nella configurazione a 45°	40
Figura 4.11. Storia temporale dello spostamento nei 6 DOF. Onda regolare di risonanza	40
Figura 4.12. Storia temporale dei carichi agenti sulle linee dell'ormeggio. Onda regolare di risonanza	41
Figura 4.13. Storia temporale delle pressioni sulla superficie dello scafo. Onda regolare di risonanza	41
Figura 4.14. Storia temporale dello spostamento nei 6 DOF. Onda irregolare di risonanza	42
Figura 4.15. Storia temporale dei carichi agenti sulle linee dell'ormeggio. Onda irregolare di risonanza.....	42
Figura 4.16. Storia temporale delle pressioni sulla superficie dello scafo. Onda irregolare di risonanza	43
Figura 4.17. Storia temporale dello spostamento nei 6 DOF. Onda regolare severa	43
Figura 4.18. Storia temporale dei carichi agenti sulle linee dell'ormeggio. Onda regolare severa	44
Figura 4.19. Storia temporale delle pressioni sulla superficie dello scafo. Onda regolare severa	44
Figura 4.20. Storia temporale dello spostamento nei 6 DOF. Onda irregolare severa.....	45
Figura 4.21. Storia temporale dei carichi agenti sulle linee dell'ormeggio. Onda irregolare severa.....	45
Figura 4.22. Storia temporale delle pressioni sulla superficie dello scafo. Onda irregolare severa.....	46
Figura 4.23. P-Welch PSD dei 6 DOF	47
Figura 4.24. Confronto PSD a Heave con spettro teorico e sperimentale dell'onda di risonanza indisturbata	47
Figura 4.25. RAO a Pitch. Configurazione a 0° steepness 1:30.	48
Figura 4.26. RAO a Pitch. Configurazione a 0° steepness 1:50.	48

1 Sommario

Nel presente report viene descritta la campagna sperimentale effettuata sul dispositivo in scala di PEWEC. La descrizione della prototipazione e architettura di acquisizione e sensoristica è riportata nel precedente deliverable riguardante la progettazione e prototipazione del modello in scala [1]. La scala scelta per la realizzazione del prototipo è stata quella di 1:25 compatibilmente con le dimensioni della vasca e la realizzazione del sistema di ormeggio che costituisce il focus dell'attività sperimentale. Obiettivo della campagna è stato quello appunto di testare la nuova configurazione di geometrie e masse che costituiscono l'output dell'ottimizzatore genetico [2] e il sistema di ormeggio progettato ad hoc seguendo il procedimento descritto dalle normative in materia [3] [4]. Le prove sperimentali sono state eseguite nella vasca navale dell'Università degli studi di Napoli Federico II della durata di tre settimane totali. In questo documento vengono descritte in maniera dettagliata il setup sperimentale per la realizzazione delle sperimentazioni, le prove eseguite durante la campagna stessa, e il postprocessing dei dati sperimentali. La validazione dei modelli numerici, altro importante obiettivo dell'intero progetto, verrà invece discusso ampiamente nell'attività di progetto 1.20.

2 Descrizione dell'attività sperimentale

Nel presente capitolo viene descritto il setup della campagna sperimentale. In particolare, sono presentati:

- Setup ambientale della vasca navale, comprensiva del fondale artificiale e della sensoristica off-board (wave probes e motion capture)
- Setup del dispositivo (dal punto di vista strutturale e del sistema di acquisizione)
- Setup del sistema di mooring nelle 3 configurazioni sperimentate (0°, 45°, e 90°).

2.1 Setup della vasca navale

Le prove sperimentali sono state eseguite nella vasca navale dell'Università Federico II di Napoli, avente le seguenti caratteristiche geometriche:

TABELLA 2.1. CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA VASCA NAVALE

Lunghezza	[m]	147
Larghezza	[m]	9
Profondità	[m]	4.2

Ad un'estremità della vasca è installato il sistema di generazione del moto ondoso (ondogeno) composto da otto paratie piane oscillanti con singola cerniera, caratterizzate da un'altezza di 1.5 m, con corsa massima di $\pm 20^\circ$, azionate da motori elettrici. In condizioni nominali, il generatore ondoso è in grado di creare onde con periodo (T) nel range di 0.8-4 s, e ampiezza (A) nel range di 0.08-0.15 m. All'altra estremità della vasca è presente la spiaggia necessaria per assorbire le onde [5]. Il sistema è in grado di generare onde regolari e irregolari, con le combinazioni di ampiezza, lunghezza d'onda e periodo elencate in Tabella 2.2, dove λ è la lunghezza d'onda, Alim è l'ampiezza massima. Questi valori nominali sono nella pratica fortemente influenzati dalla presenza del fondale artificiale; perciò, è stato necessario lanciare l'intero set di onde a vuoto, con i risultati descritti nel paragrafo 3.

TABELLA 2.2. ONDE (NOMINALI) GENERATE DALL'ONDOGENO DELLA VASCA NAVALE

Frequenza	λ	Alim	Periodo
[Hz]	[m]	[m]	[s]
0,25	24,97	0,150	4,00
0,36	12,04	0,270	2,78
0,42	8,85	0,270	2,38
0,50	6,24	0,270	2,00
0,56	4,98	0,250	1,79
0,62	4,06	0,235	1,61
0,75	2,77	0,170	1,33
0,88	2,02	0,125	1,14
1,00	1,56	0,100	1,00
1,15	1,18	0,080	0,87
1,25	1,00	0,080	0,80

2.2 Il fondale artificiale

Per riprodurre in scala il funzionamento del dispositivo non è sufficiente scalare le grandezze dimensionali, ma è necessario garantire anche la scala dell’ambiente che si vuole riprodurre, ovvero il sito marino, gli stati di mare e l’area di installazione del sistema di ormeggio. Al fine di ricreare la batimetria in scala caratteristica del sito scelto e permettere il posizionamento delle catene dell’ormeggio è stato installato un pavimento artificiale che crea un fondo marino virtuale sul quale si possono poggiare le catene dell’ormeggio riproducendo la corretta configurazione al vero.

Il fondale artificiale è una struttura composta da 20 pannelli di vetroresina uniti da congiunzioni in acciaio che garantisce la batimetria del sito scalata pari a 1.28 m (32 m di batimetria al vero). Ogni pannello, di forma rettangolare, ha una struttura interna ad X necessaria per garantirne la rigidità. I pannelli sono collegati fra loro da flange di acciaio e posizionati in 2 file da 10 pannelli, unite al centro della vasca. Tutta la struttura è poggiata su delle staffe guidate che sostengono l’intero pavimento e che permettono la variazione dell’altezza. Sotto i pannelli sono presenti dei galleggianti connessi all’esterno a dei tubi di immissione ed emissione dell’aria interna: variando il volume di aria interna, si varia di conseguenza l’altezza del pavimento.

La struttura è posizionata al centro della vasca ed è mantenuta in posizione da 28 tiranti in acciaio, di cui:

- 4 (2 per lato, rappresentati con la lettera T in Figura 2.1) collegati alle estremità della struttura e disposti longitudinalmente alla vasca, che lavorando in trazione evitano la traslazione del pavimento artificiale durante la fase operativa del generatore ondos.
- 4 (2 per lato, lettera C in Figura 2.1) collegati alle estremità della struttura e disposti verso il centro, che lavorano in compressione per mantenere i pannelli uniti.
- 20 (10 per lato, lettera V in Figura 2.1) collegati in ogni pannello a distanze differenti e fissati sulla vasca navale per evitare spostamenti in verticale, limitare il movimento trasversale ed evitare la flessione al centro del pavimento causata dal moto ondos. Questi sono posizionati in modo da non creare interferenze con i sistemi di ormeggio.

Le dimensioni del fondale artificiale e le caratteristiche dei cavi sono riportate nella seguente Tabella 2.3:

TABELLA 2.3. CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DEL FONDALE ARTIFICIALE

Nome	Valore
Larghezza [m]	8.5
Lunghezza [m]	19
Altezza d’acqua [m]	1.28
Numero pannelli	20
Cavo T [m]	28.85
Cavo C [m]	7.10-8.60
Cavo V [m]	1.15-4.25

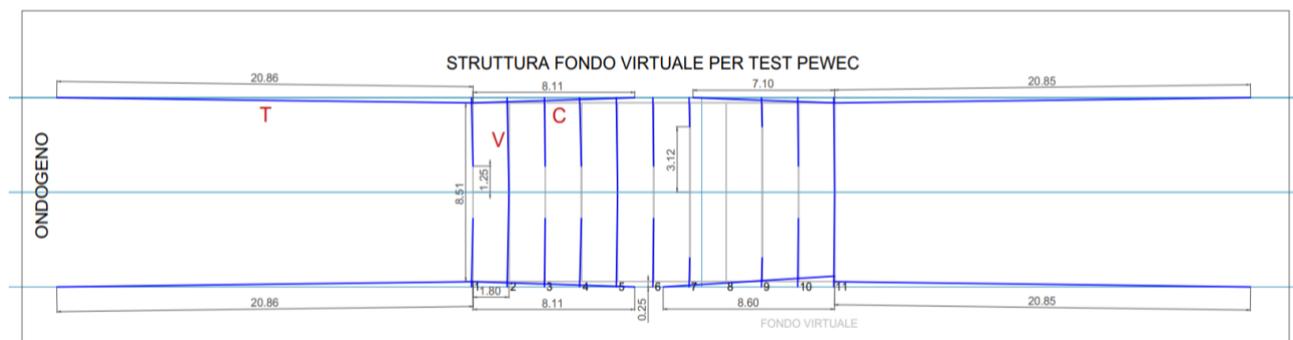


FIGURA 2.1. DISPOSIZIONE DEI PANNELLI E DEI TIRANTI CHE COMPONGONO IL FONDALE ARTIFICIALE

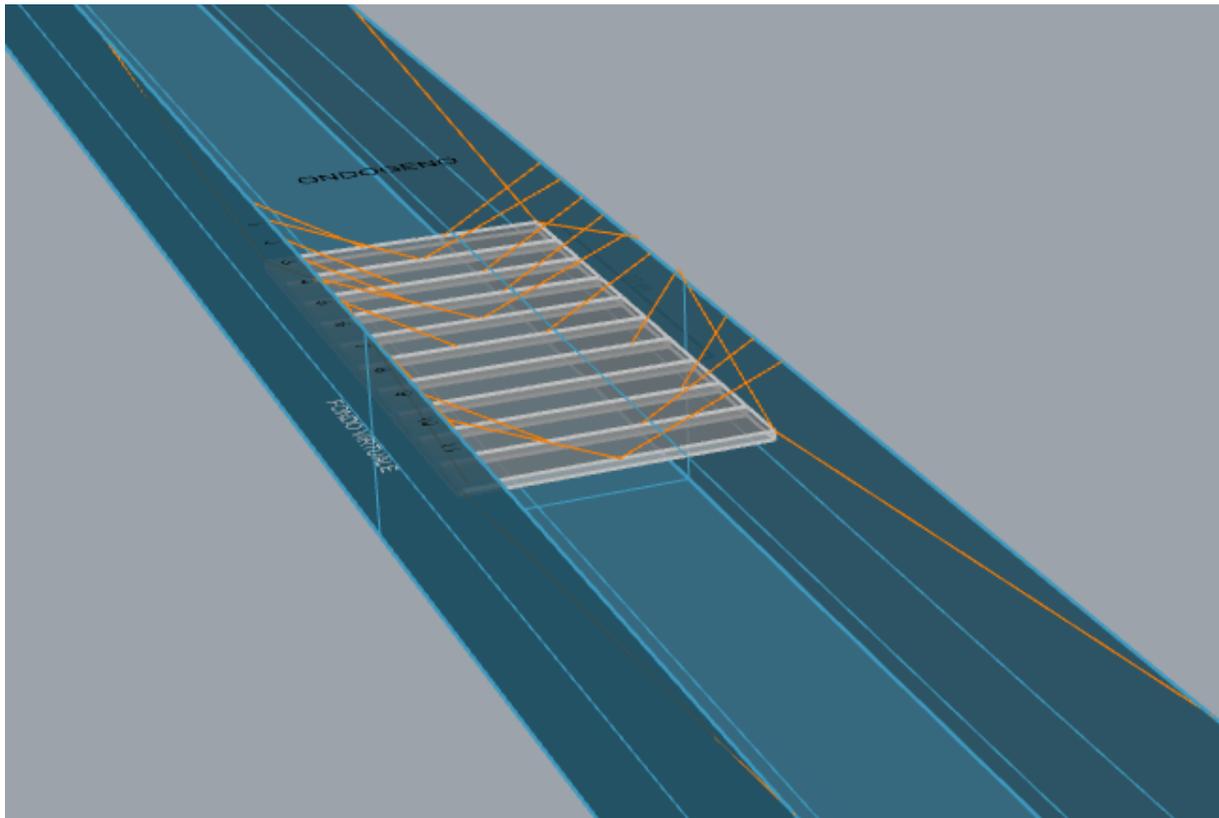


FIGURA 2.2. FONDALE ARTIFICIALE DELLA VASCA PROVA. CAD DI PROGETTAZIONE

2.3 Setup della sensoristica off-board

In questo paragrafo vengono descritti i sensori ed il sistema di acquisizione lato vasca navale che consiste principalmente nell'installazione di 7 sonde capacitive (wave probes) per la misura dell'elevazione dell'onda montate sul carro dinamometrico e un sistema di motion capture che consiste in 3 telecamere montate sulla struttura del carro dinamometrico.

2.3.1 Wave probes

Per misurare il profilo delle onde generate e l'andamento del moto ondoso, sono state utilizzate 7 wave probes (o wave gauges). Queste sonde sono del tipo capacitivo a filo (Figura 2.3), in grado di rilevare il livello dell'acqua grazie alla conseguente variazione di capacità elettrica. Le 7 sonde sono state posizionate sul carro dinamometrico come in Figura 2.4 e Figura 2.5. La calibrazione è avvenuta in acqua calma prima dell'esecuzione delle prove sperimentali.

A seconda del tipo di test da effettuare, la posizione del carro dinamometrico, e quindi delle wave probes, viene cambiata rispetto al fondale artificiale. A questo proposito, vengono descritte le due configurazioni adottate durante la campagna sperimentale:

1. Configurazione a vuoto (Figura 2.4): il dispositivo in questo caso è assente, ed il carro dinamometrico è posizionato in modo tale che le sonde 5 e 6 (sonde ridondate) siano coincidenti con la posizione del dispositivo in configurazione operativa. In questo caso vengono eseguiti test a vuoto con onde regolari e irregolari. La misura dell'onda a vuoto nella posizione di equilibrio del dispositivo sarà poi fondamentale per la validazione dei modelli numerici.
2. Configurazione operativa (Figura 2.5): la posizione del carro dinamometrico è tra l'ondogeno e il dispositivo, ad una distanza di 3 m da quest'ultimo per garantire una corretta visuale del prototipo alle telecamere per il motion tracking. I test effettuati prevedono il dispositivo in posizione, ancorato al sistema di ormeggio. Le onde generate sono regolari e irregolari.

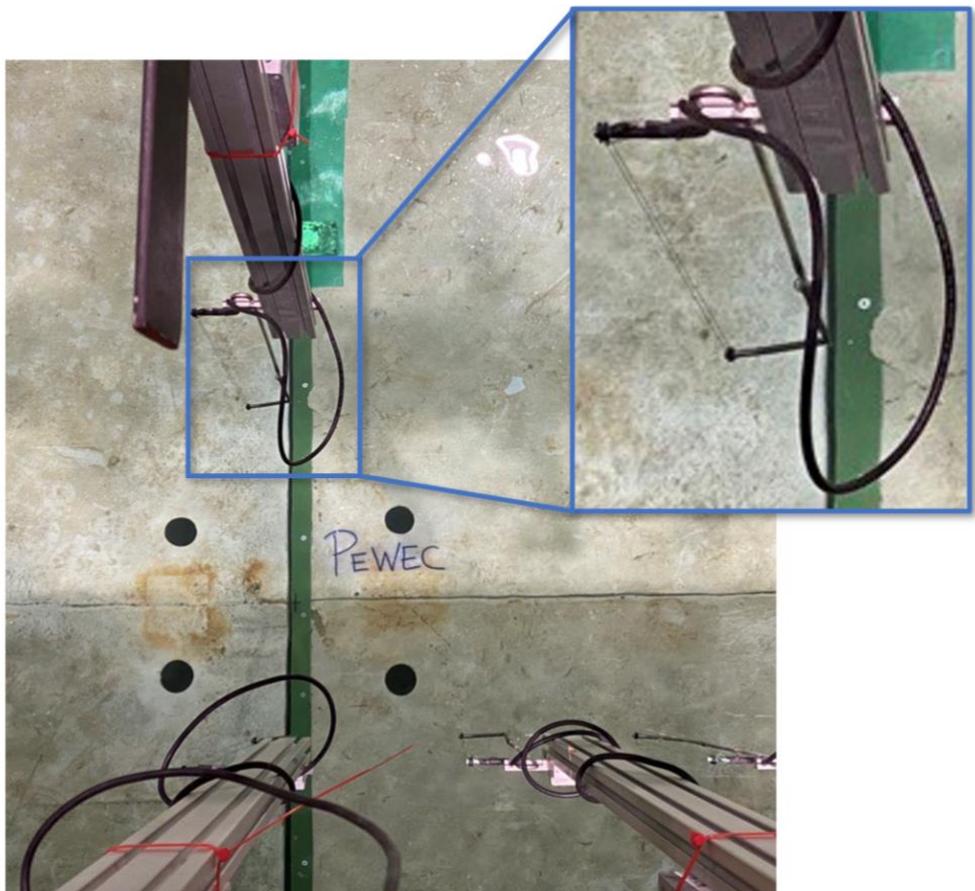


FIGURA 2.3. WAVE PROBES VISTE DAL CARROPONTE

Configurazione a vuoto

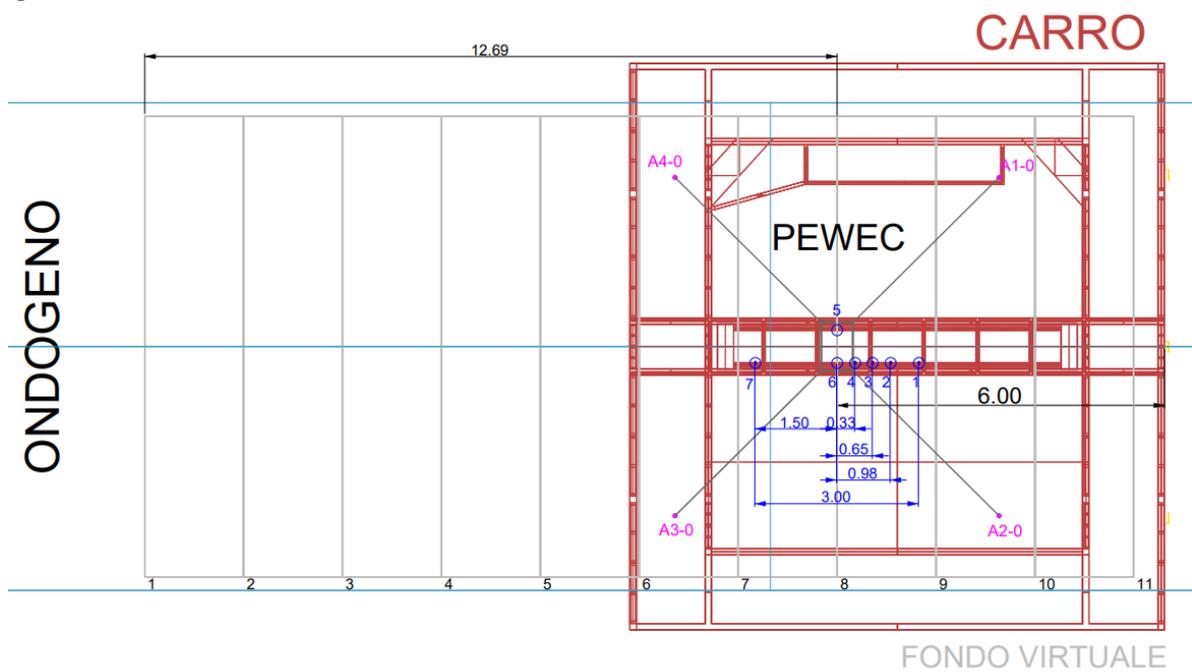


FIGURA 2.4. POSIZIONAMENTO DELLE WAVE PROBES, CONFIGURAZIONE A VUOTO

Nella tabella sono riportate le quote per l'asse x e per l'asse y di ognuna delle sonde rispetto al sistema di riferimento relativo al centro del dispositivo.

TABELLA 2.4. QUOTE DELLE WAVE PROBES, CONFIGURAZIONE A VUOTO

Sonda	X [m]	Y [m]
1	-1.50	0.15
2	-0.98	0.15
3	-0.65	0.15
4	-0.33	0.15
5	0.00	-0.15
6	0.00	0.15
7	1.50	0.15

Configurazione operativa

Le wave probes mantengono le stesse distanze rispettive, ma sono traslate di 9 m lungo l'asse x positivo rispetto alla configurazione precedente (in sostanza, il carro dinamometrico viene fatto avanzare di 9 m, fino a raggiungere una distanza effettiva di 3 m dal centro del dispositivo).

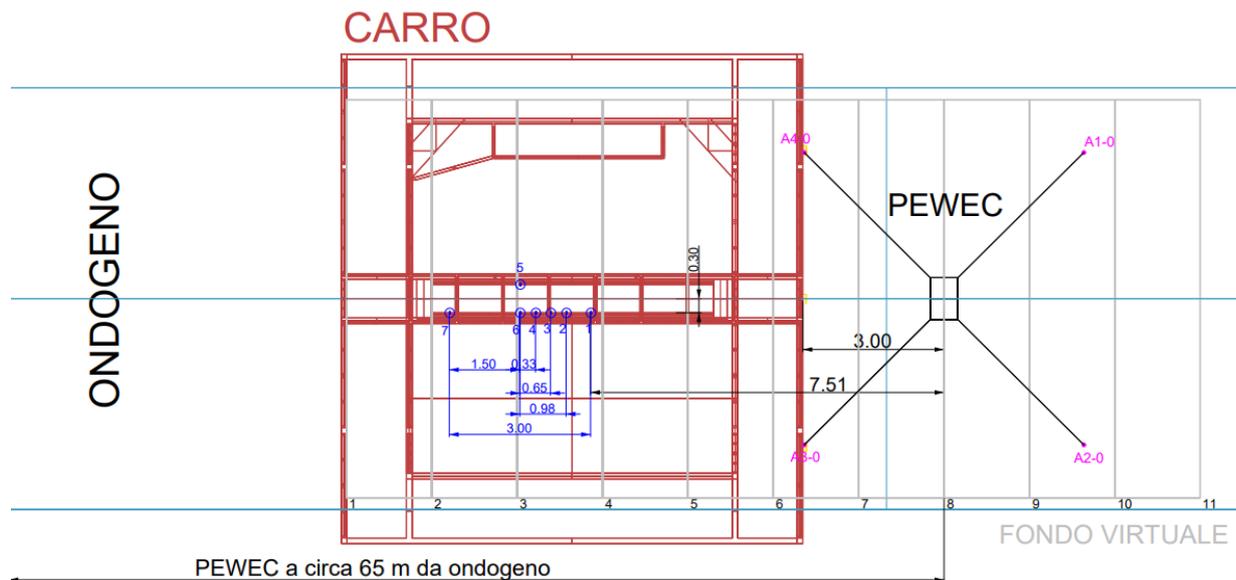


FIGURA 2.5. POSIZIONAMENTO DELLE WAVE PROBES, CONFIGURAZIONE OPERATIVA

2.3.2 Sistema motion capture Qualisys

Il sistema di motion capture Qualisys [6], per l'acquisizione dei moti dello scafo, è stato installato tramite dei supporti sul carro dinamometrico in modo simmetrico rispetto al sistema di riferimento. Una camera è posizionata all'origine, mentre le altre due camere sono disposte lateralmente con un'inclinazione di 45° rispetto l'asse y e 45° rispetto all'asse z. La calibrazione del sistema è avvenuta precedentemente rispetto all'inizio dei test tramite un galleggiante di prova integrato con 4 markers visibili da tutte le camere. Nella Tabella 2.5 sono riportate le quote rispetto agli assi di riferimento.

TABELLA 2.5. QUOTE DEL SISTEMA QUALISYS

Camera	Y [m]	Z [m]
1	3.17	3.18
2	0.00	1.61
3	-3.17	3.18

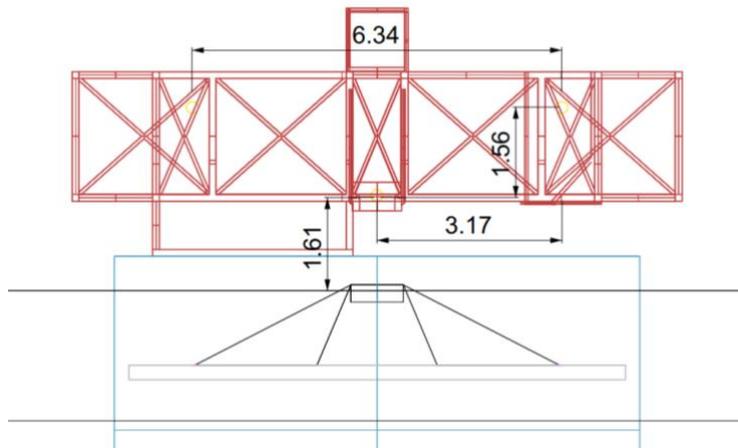


FIGURA 2.6. QUOTE DEL SISTEMA QUALISYS

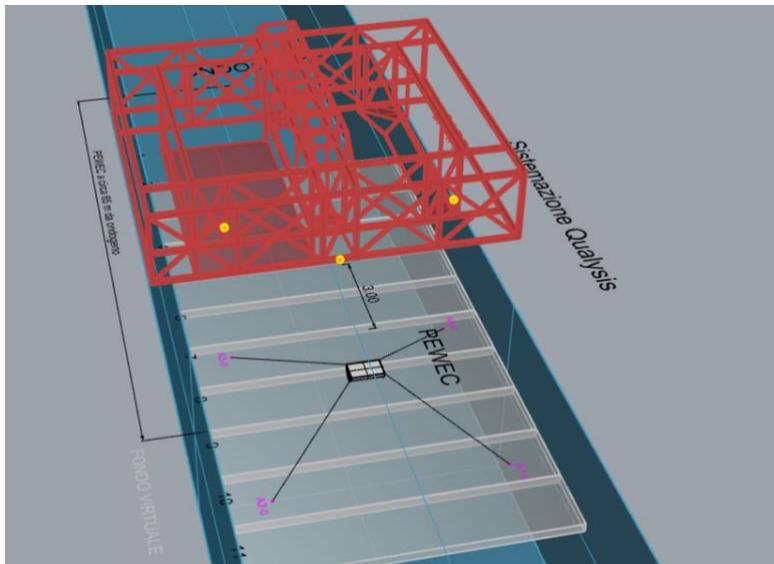


FIGURA 2.7. POSIZIONE DELLE TRE CAMERE DEL SISTEMA QUALISYS. CAD DI PROGETTAZIONE



FIGURA 2.8. FOTO DEL POSIZIONAMENTO DEL SISTEMA QUALISYS SUL CARRO DINAMOMETRICO.

2.4 Setup del dispositivo

Il prototipo è stato realizzato in modo tale da rispettare le caratteristiche inerziali e geometriche del modello in scala 1:1 scelto dopo l'ottimizzazione. Spesso, a causa dell'accumulo di incertezze tra i diversi passaggi in fase di costruzione e assemblaggio, queste caratteristiche devono essere verificate ed eventualmente tarate in modo da ottenere i valori desiderati. Al contrario delle proprietà geometriche (larghezza, lunghezza, spessori, posizionamento dei sensori etc...), le proprietà inerziali del dispositivo richiedono maggiore attenzione per essere in accordo con quelle desiderate. Per questa ragione, l'architettura interna del prototipo è stata progettata in modo da poter variare il layout della componentistica interna ed in particolare la disposizione dei pesi, per risolvere eventuali discordanze (in termini di inerzie e centro di massa) tra modello CAD e dispositivo fisico. È stata utilizzata a tale scopo la tecnologia Rexroth per creare una struttura per il fissaggio e posizionamento delle zavorre per un'agevole e veloce variazione di configurazione delle proprietà inerziali. Le zavorre consistono in blocchetti d'acciaio di diversa misura, muniti di asole che permettono di avvitarle sulle barre Rexroth. In Tabella 2.6 sono riassunte le misure principali del dispositivo in scala reale e in scala del modello (1:25) [1]. In Figura 2.9 è riportato il CAD della struttura interna del dispositivo.

TABELLA 2.6. MISURE DEL DISPOSITIVO IN SCALA REALE E IN SCALA MODELLO

DATI	Froude scaling	Valore full-scale	Valore scalato	Unità
Lunghezza	λ	14.8	0.592	[m]
Larghezza	λ	22.5	0.900	[m]
Altezza	λ	7.4	0.296	[m]
Massa	λ^3	1118000	71.552	[kg]
COG (from deck)	λ	-3.6	-0.145	[m]
Linea di gallegg. (from deck)	λ	-2.6	0.104	[m]
I44	λ^5	55354173	5.668	[kg*m ²]
I55	λ^5	29978075	3.070	[kg*m ²]
I66	λ^5	72150648	7.388	[kg*m ²]
Draft	λ	4.8	0.192	[m]

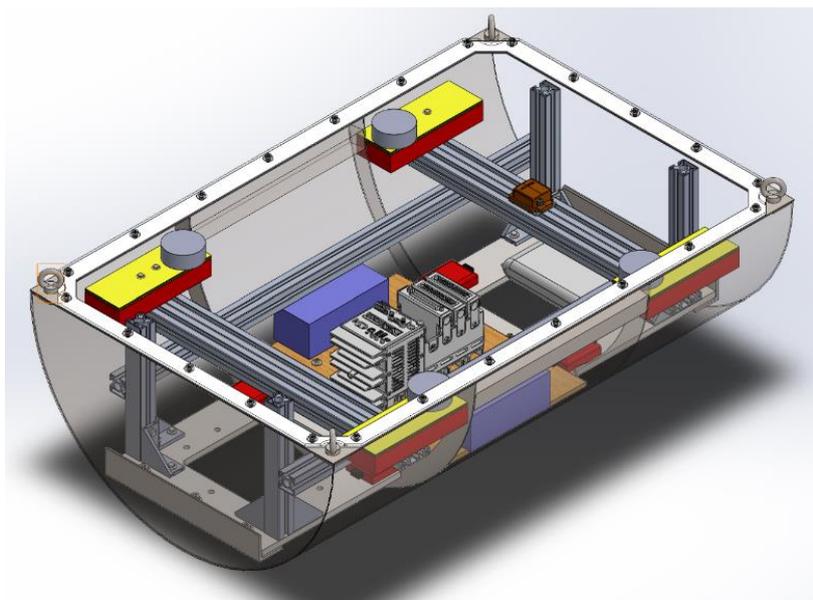


FIGURA 2.9. CAD DEL DISPOSITIVO, STRUTTURA INTERNA (CASTELLO DI SOSTEGNO, ZAVORRE, SENSORISTICA).

2.4.1 Misure sperimentali delle proprietà inerziali e geometriche

Per la messa a punto della disposizione delle zavorre, le proprietà inerziali e geometriche dello scafo sono state misurate sperimentalmente utilizzando una bilancia inerziale di proprietà dell'Università Federico II di Napoli. Il dispositivo viene ancorato con delle fasce ad una struttura in alluminio che a sua volta viene connessa al basamento della bilancia inerziale. In Figura 2.10 è riportata tale configurazione, in cui la struttura gialla è il basamento solidamente fissato al suolo mentre quella grigia è il corpo in alluminio che consente di connettere il prototipo al basamento attraverso dei bulloni con testa a martello. Il corpo in alluminio è composto da un braccio libero di oscillare intorno agli assi di rollio e beccheggio del dispositivo; al centro di tale braccio è posizionato un accelerometro.



FIGURA 2.10. BILANCIA INERZIALE CON PROTOTIPO E POSIZIONAMENTO ACCELEROMETRO.

L'obiettivo dell'esperimento è quello di determinare la posizione del baricentro e delle inerzie, a rollio e beccheggio, del dispositivo. Per individuare la posizione del baricentro si procede posizionando un disco di piombo di peso noto sulla barra superiore. Il disco viene spostato a diverse distanze facendo inclinare il sistema di un angolo diverso per ogni posizione. Tale angolo viene letto dall'accelerometro (quando il sistema è in quiete) ed il valore viene trasferito su un foglio di calcolo. Attraverso un equilibrio di momenti viene definito la posizione verticale del baricentro.

Per il calcolo delle inerzie, invece, si effettua un test dinamico in cui viene fatto oscillare il prototipo liberamente dopo avergli fornito un angolo iniziale di Pitch o Roll. L'acquisizione del moto di oscillazione ha la durata di 80 s per ogni prova; vengono effettuate tre ripetizioni per ciascun grado di libertà. Risolvendo l'equazione del moto del corpo libero di oscillare si può ottenere accuratamente la misura dell'inerzia nel grado di libertà voluto.

Dopo un'operazione di fine-tuning delle posizioni delle zavorre, le grandezze misurate in fase sperimentale sono riportate in Tabella 2.7, e confrontate con i valori di progetto. Come si può notare le grandezze geometriche sono identiche mentre si riscontrano degli scostamenti contenuti per le proprietà inerziali. L'inerzia ad imbarcata viene considerata identica a quella in fase di progetto poiché non può essere misurata con questa bilancia inerziale; in ogni caso, essa non influenza significativamente le tipologie di prove eseguite in vasca. I valori misurati sperimentalmente sono quelli su cui si baseranno tutti i modelli matematici che saranno validati con le prove eseguite in vasca. In Figura 2.11 è riportato il CAD del prototipo (con focus su struttura e zavorra), mentre in Figura 2.12 è riportata una foto del prototipo.

TABELLA 2.7. MISURE SPERIMENTALI DELLE GRANDEZZE GEOMETRICHE E INERZIALI DEL DISPOSITIVO

DATI Modello Full-Scale	Valore	MSU	Fatt. di scala	Scala (1:25)	Misura Sprimentale	err perc(%)
Lunghezza	14,8	[m]	1	0,592	0,592	0,0%
Larghezza	22,5	[m]	1	0,900	0,900	0,0%
Altezza	7,4	[m]	1	0,296	0,296	0,0%
Massa	1118000	[kg]	3	71,552	72,360	1,1%
COG (from deck)	-3,622	[m]	1	-0,145	-0,139	4,1%
Linea di gallegg. (from deck)	-2,59	[m]	1	-0,104	-0,096	7,3%
I ₄₄	55354173	[kg*m ²]	5	5,668	5,827	2,8%
I ₅₅	29978075	[kg*m ²]	5	3,070	3,334	8,6%
I ₆₆	72150648	[kg*m ²]	5	7,388	7,388	0,0%
Draft	4,81	[m]	1	0,192	0,200	4,0%
COG(from waterline)	-1,03		1	-0,041	-0,043	4,2%

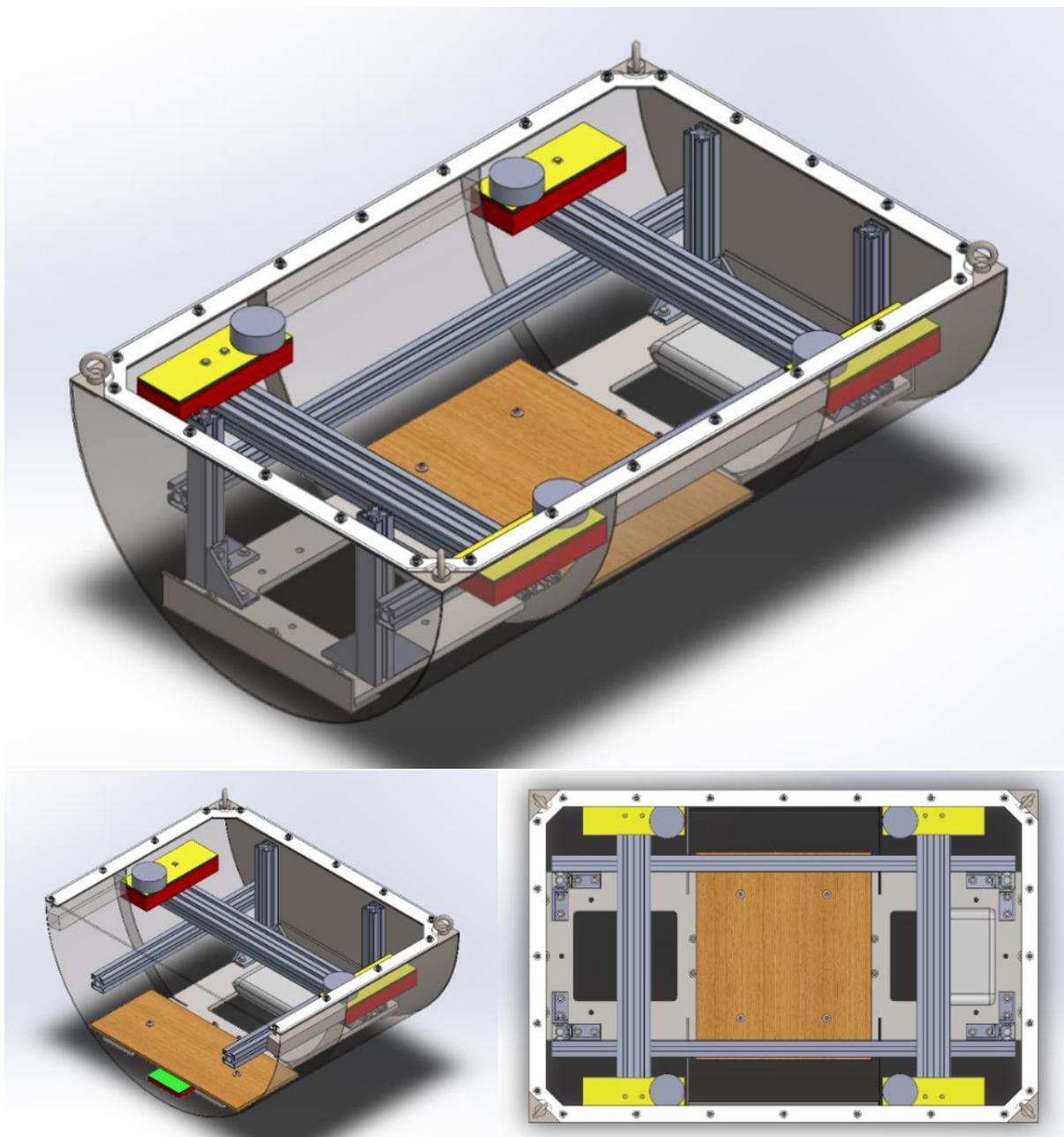


FIGURA 2.11. CAD DELLA STRUTTURA INTERNA DEL PROTOTIPO.

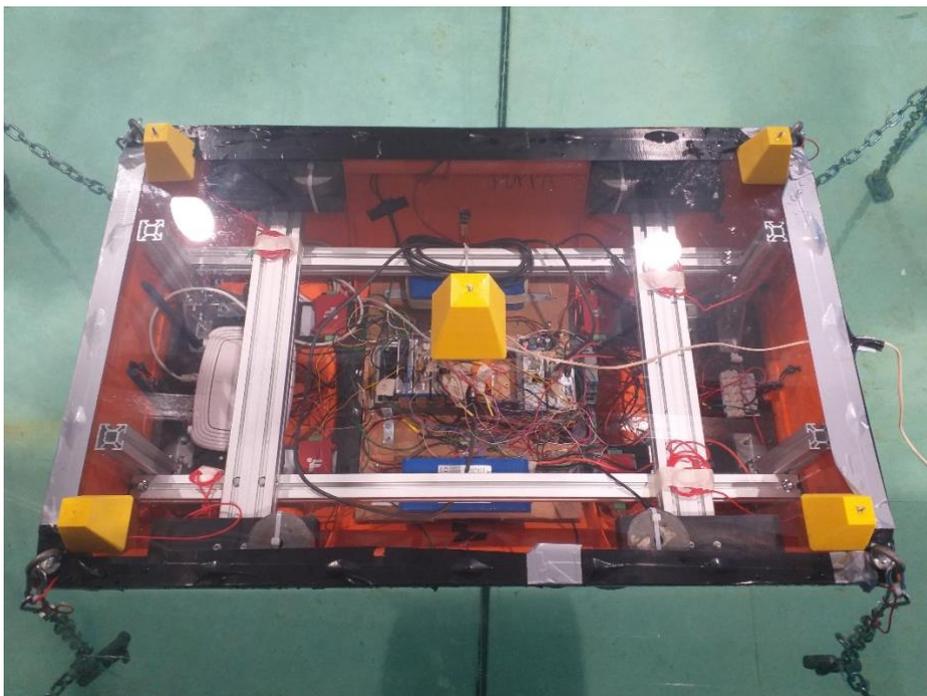


FIGURA 2.12. FOTO DELLA STRUTTURA INTERNA DEL PROTOTIPO

2.5 Sistema di ormeggio

Il sistema di ormeggio adottato è di tipo mono-direzionale, pensato per essere applicato nel sito di riferimento di Pantelleria in cui le onde sono prevalentemente direzionali. Inoltre, questo tipo di sistema evita problematiche legate all'orientamento in caso di coesistenza di mare e corrente e a problematiche legate al cavo elettrico.

La fase di progettazione dell'ormeggio ha seguito i seguenti step:

- 1) Individuazione degli stati di mare da simulare da contorno ambientale: in accordo alla normativa DNV-OS-E301 [7], il sistema di ormeggio deve essere progettato prendendo in considerazione lo stato ondoso del mare con periodo di ritorno di 100 anni [3].
- 2) Da letteratura [8] [9] [10], nel caso di ormeggio di tipo monodirezionale è comune la scelta di ormeggio a catenaria.
- 3) Adattamento della configurazione ai fini di soddisfare i criteri definiti dalla norma DNV-OS-E301 e ridurre l'impatto della dinamica del mooring sulla produttività del dispositivo. È stato eseguito un processo iterativo di verifica del modello.

L'ormeggio in scala è stato realizzato con una catena metallica, dei galleggianti (jumper) e dei pesi (clump-weight). L'utilizzo dei jumper serve per scaricare la parte verticale delle tensioni delle catene e lasciare quindi il dispositivo libero di beccheggiare in condizioni operative. I clump-weight invece sono distribuiti in modo da riprodurre la zavorra del sistema simulato numericamente. Nel corso del processo di progettazione sono state testate varie configurazioni, variando il diametro nominale della catenaria (e quindi la restoring force dovuta dal peso lineare della stessa) e il numero e dimensione dei clump-weight, che impattano fortemente la resistenza dell'ormeggio in onda estrema.

Dall'analisi sul sollevamento dell'ancora, forze di ritorno e resistenza delle linee, la configurazione risultata adatta è composta dagli elementi nel seguente elenco. In Figura 2.13 è rappresentata la configurazione in ambiente Orcaflex, mentre in Figura 2.14 è riportata una foto dell'ormeggio montato in vasca prova.

- Catena caratterizzata da un diametro di $d=150$ mm;
- 9 clump-weight per linea, distanziati tra loro di 9 m e aventi una spinta netta negativa di 9.5 ton. Il primo si trova ad una distanza pari a 10 m dall'ancora;
- 1 jumper per linea, avente una net buoyancy di 18 tonnellate, posto a 90 m dall'ancora.

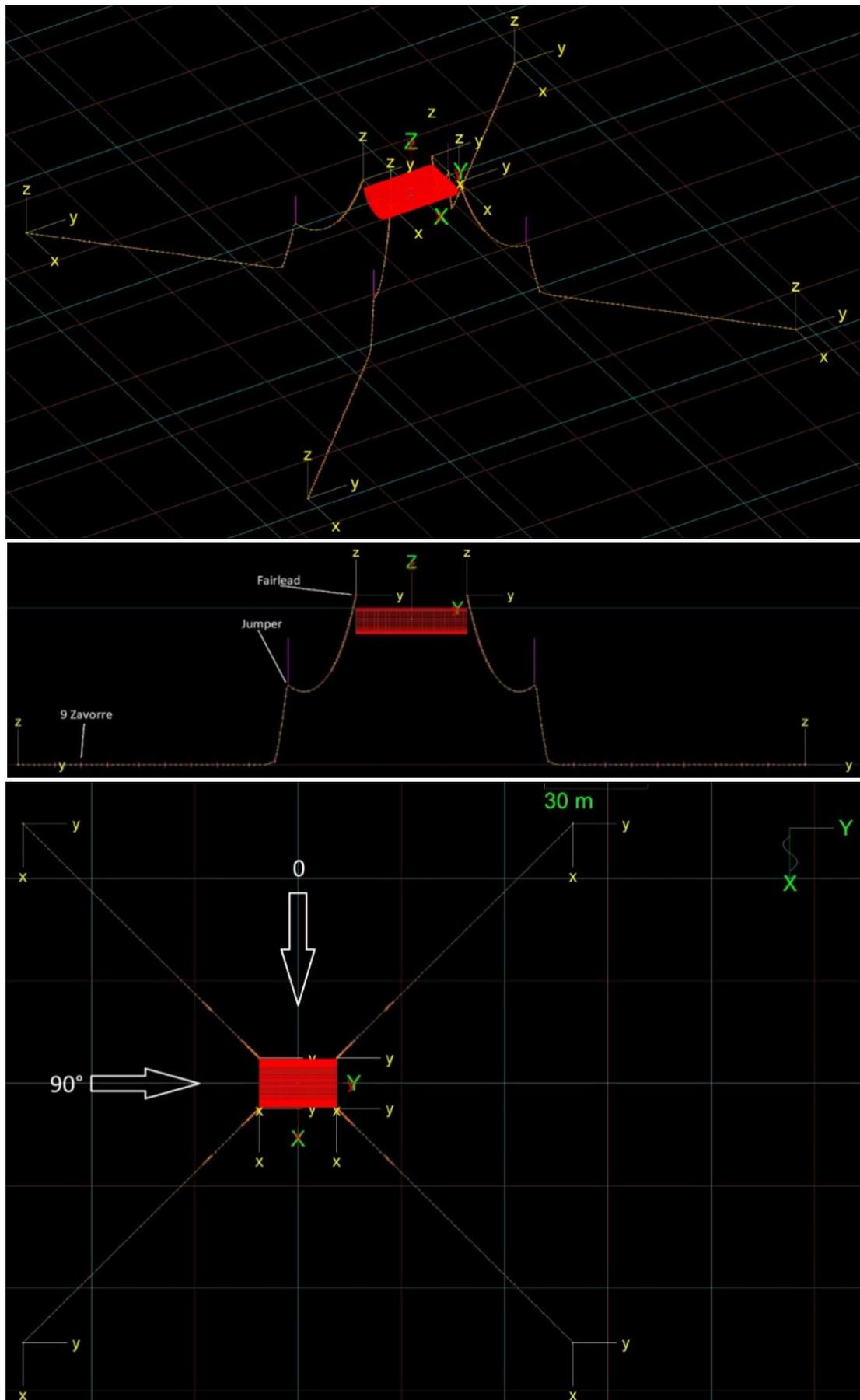


FIGURA 2.13. CONFIGURAZIONE ORMEGGIO AMBIENTE ORCAFLEX



FIGURA 2.14. CONFIGURAZIONE ORMEGGIO A 0° IN VASCA NAVALE

A seguito del dimensionamento ottenuto tramite il software Orcaflex, si è proseguito scalando le caratteristiche del sistema di ormeggio con la seguente procedura:

1. Per quanto riguarda la catena, applicando la legge di Froude per un fattore di scala di 1/25, sono stati scalati le lunghezze dei vari tratti di catena e il suo peso lineare.
2. Ottenuti i valori scalati, sono stati confrontati con le caratteristiche di catene commerciali. Poiché il confronto non ha portato delle corrispondenze esatte, il peso lineare della catena commerciale acquistata è stato adattato a quello del modello aggiungendo dei pesi di 20 g distribuiti per tutta la lunghezza della catena. In questo modo il peso lineare equivalente risulta uguale a quello scalato teorico.
3. Successivamente è stata verificata la rigidità assiale, data dalla formula semi-empirica:

$$EA = 90000D_{nom}^2$$

Dal confronto è risultato essere necessario per equiparare l'elasticità della catena del modello scalato e della catena commerciale inserire una molla, le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 2.8. Tabella 2.8.

TABELLA 2.8. CARATTERISTICHE DELLE MOLLE NEL SISTEMA DI ORMEGGIO SCALATE.

Materiale	Acciaio
Costante elastica	25.34N/mm
Lunghezza libera	61mm
Lunghezza massima in estensione	73.2mm
Diametro esterno	14mm
Diametro filo	2.8mm
Tensione iniziale	400N
Passo	27.9N/m

4. Per quanto riguarda la realizzazione dei jumper, sono stati acquistati dei galleggianti di simili caratteristiche al modello scalato. In un primo momento, la configurazione analizzata su Orcaflex prevedeva il punto di unione del jumper con la catena in corrispondenza nel centro di galleggiamento del jumper. Nella realtà questa connessione è di difficile realizzazione. Pertanto, si è modificata la posizione del jumper, accorciando il punto

di collegamento con la catena, nel tratto tra jumper e ancora, ed eliminando l'ultima zavorra, nel tratto di catena tra jumper e golfare, poiché il peso gravava esclusivamente sullo scafo. In Tabella 2.9 sono riportati i dati aggiornati all'ultima modifica, mentre in Tabella 2.10 è possibile vedere in dettaglio la disposizione dei pesi in scala reale e in sala 1:25.

TABELLA 2.9. CARATTERISTICHE ORMEGGIO

	Full scale	Model scale
Diametro catena [mm]	150	0.27
Peso lineare catena [kg/m]	448	2
Rigidità assiale EA [kN]	1921.5e3	
Anchor radius [m]	110	4.5
Lunghezza linea ancora-jumper	90	3.6
Lunghezza linea jumper-fairlead	31.34	1.25

TABELLA 2.10. DESCRIZIONE E SCALATURA DELLA CATENA DELL'ORMEGGIO

Posizione elementi Jumper-Zavorra				Coeff. Froude	Valore scalato 1:25
1	Clump-Weight	[m]	10	1	0,4
2	Clump-Weight	[m]	18	1	0,72
3	Clump-Weight	[m]	26	1	1,04
4	Clump-Weight	[m]	34	1	1,36
5	Clump-Weight	[m]	42	1	1,68
6	Clump-Weight	[m]	50	1	2
7	Clump-Weight	[m]	58	1	2,32
8	Clump-Weight	[m]	66	1	2,64
9	Clump-Weight	[m]	74	1	2,96
10	Jumper	[m]	90	1	3.6
12	Golfare	[m]	121,35	1	4,854

Uno degli obiettivi del deliverable è quello di testare diverse configurazioni del sistema di ormeggio. Nello specifico le configurazioni rispetto al moto ondoso agli angoli di 0°, 45° e 90°. La Figura 2.15 mostra la posizione dell'ormeggio a 0° rispetto ai tiranti del fondale artificiale, mentre la Figura 2.16 mostra il setup del sistema di ormeggio nei tre casi.

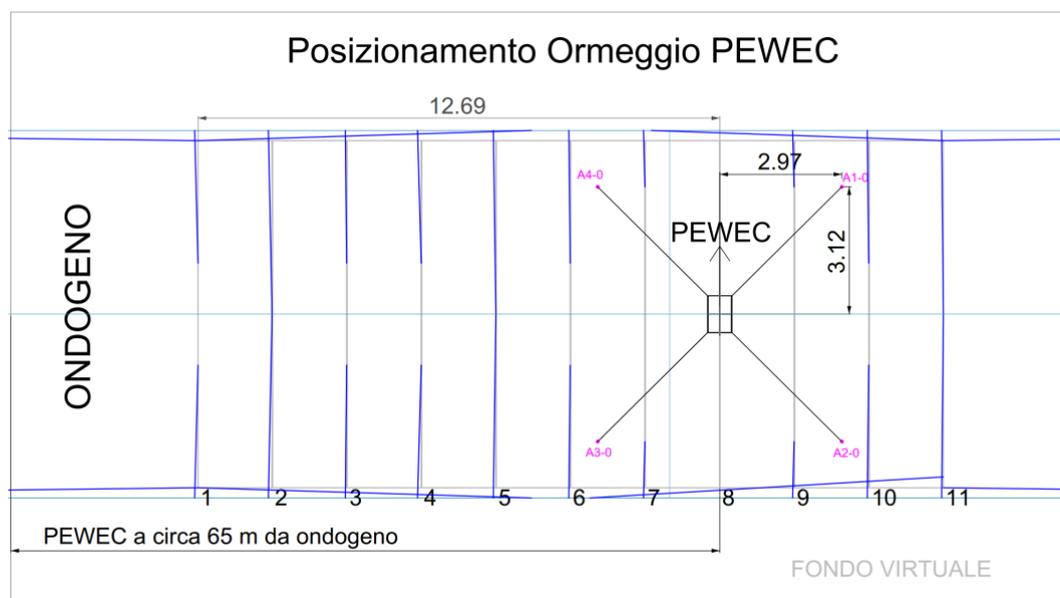


FIGURA 2.15. DISPOSIZIONE DEL SISTEMA DI ORMEGGIO A 0° RISPETTO ALLA POSIZIONE DEI CAVI DEL FONDALE ARTIFICIALE

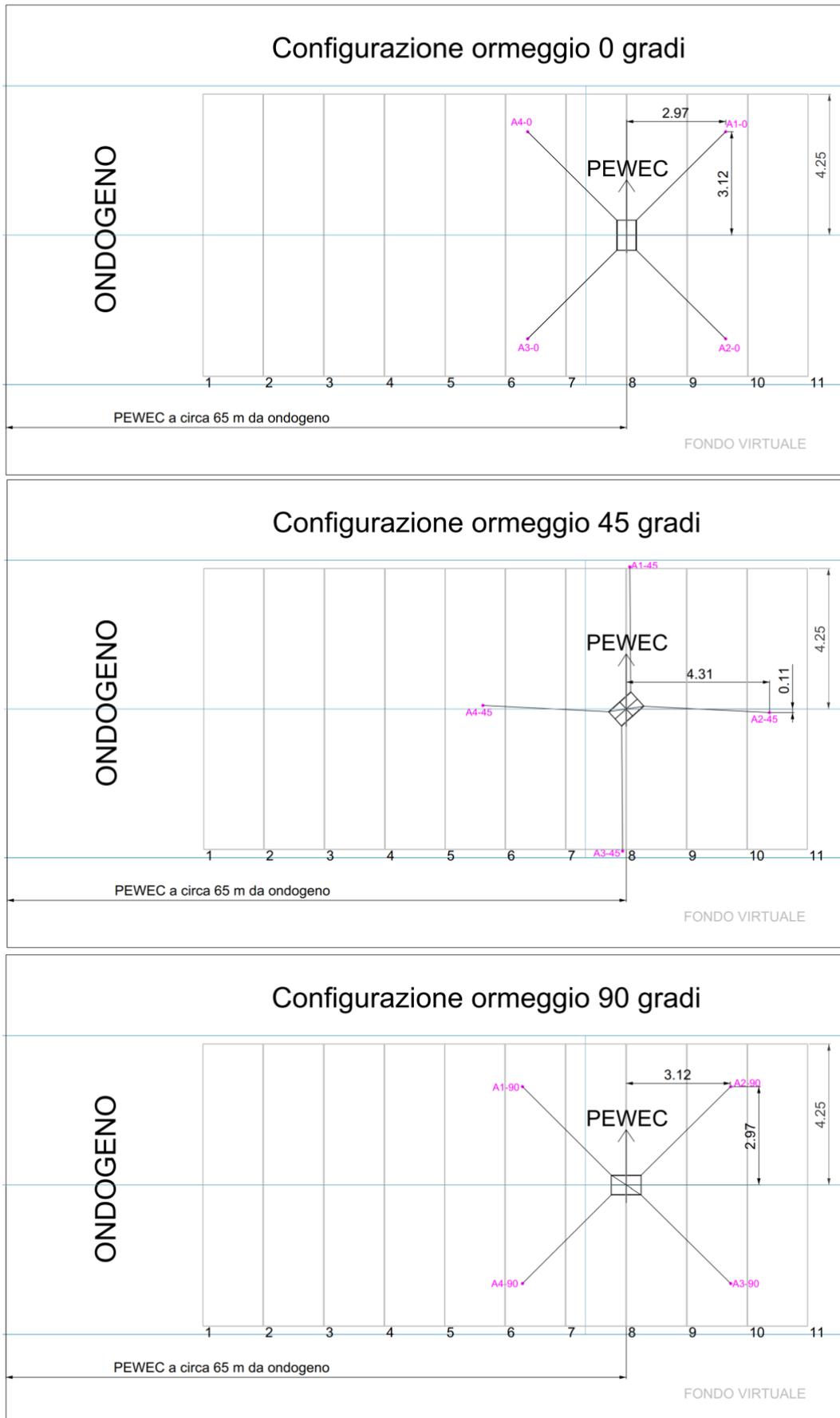


FIGURA 2.16. CONFIGURAZIONE ORMEGGIO A 0°, 45°, 90

2.6 Sistema di acquisizione e sensoristica

La campagna sperimentale ha come scopo quello di acquisire i moti, le tensioni sugli ormeggi e le pressioni sullo scafo, in modo da validare le simulazioni effettuate in ambienti Orcaflex e CFD.

Per la progettazione del sistema d'acquisizione e la scelta dei suoi componenti, si è partiti quindi dal post-processing delle simulazioni in ambiente Orcaflex, per le tensioni sull'ormeggio, e simulazioni in ambiente CFD, per le pressioni sullo scafo. Esse hanno dato come output delle tensioni sull'ormeggio di circa 9000kN e delle pressioni massime sullo scafo di 89 kPa. Effettuando la solita operazione di scalatura, sono stati ottenuti i seguenti risultati riportati in Tabella 2.11:

TABELLA 2.11. SCALATURA SOLLECITAZIONI SULLO SCAFO E SULL'ORMEGGIO

Pressione massima sullo scafo [kPa]	89	Pressione massima sullo scafo scalata [kPa]	3.56
Tensione massima al fairlead [kN]	9000	Tensione massima al fairlead [kN]	0.576

Tali risultati hanno portato alla scelta di sensori che avessero un fondo scala opportuno.

Passando al sistema d'acquisizione, esso consiste in un sistema on-board di National Instruments [11] (controllore compactRIO + moduli I/O analogici e digitali) alimentato a batterie e munito di router Wi-Fi per la trasmissione in tempo reale dei dati acquisiti dei sensori. Il controllore cRIO è stato programmato in ambiente LabVIEW [12] per acquisire i dati dai trasduttori con una frequenza di 20Hz. In Figura 2.17 Figura 2.17 è possibile vedere uno schema semplificato della sua architettura, mentre nella tabella successiva è possibile trovare la lista completa dei componenti.

TABELLA 2.12. COMPONENTI SISTEMA D'ACQUISIZIONE

Componente	Azienda	Modello	Quantità
Controllore	NI	cRIO 9034	1
Modulo digitale	NI	NI9401	1
Modulo analogico per pressioni	NI	NI9205	1
Modulo analogico per carichi	NI	NI9201	1
Batteria (a litio)	LaserElectronic	12V 25AH 25000Ma	2
Router Wi-Fi	TPlink	EAP225	1
Cella di carico 100 lb	Futek	Isb210 – 100 lb	4
Condizionatore cella di carico	Futek	IAA100	4
Trasduttore di pressione	NXP	MPVZ5010GW7U	27
Sensore di orientamento	Xsens	MTI-30	1

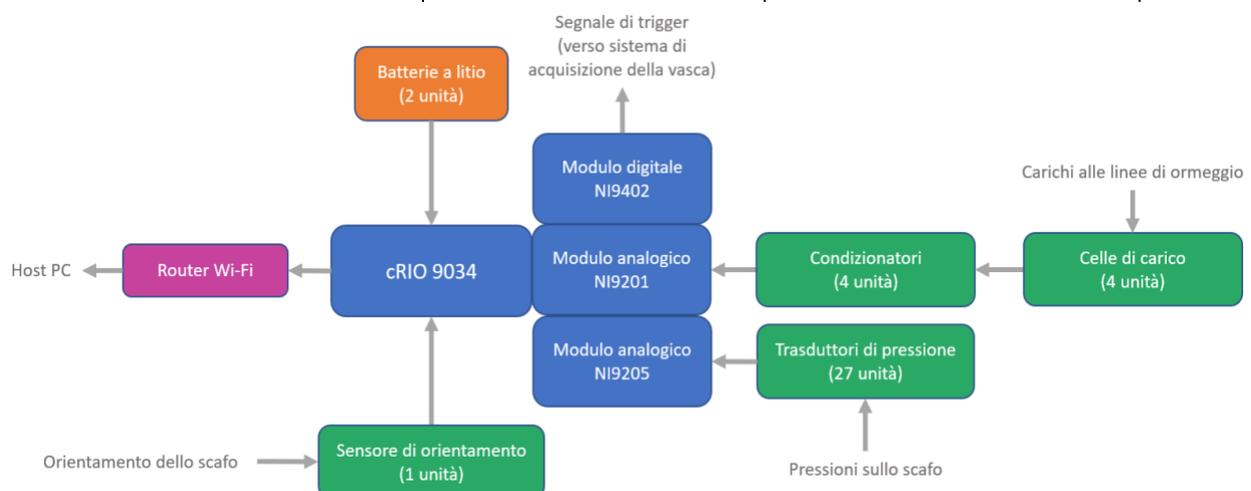


FIGURA 2.17. SCHEMA DEL SISTEMA D'ACQUISIZIONE

La vasca prova dispone di un proprio sistema di acquisizione dati, comprendente come già descritto nel Paragrafo 2.3.2 un sistema di motion capture Qualisys (per l'acquisizione dei 6DOF dello scafo), e sette wave probes capacitive per la misurazione dell'onda generata. I due sistemi di acquisizione on-board e off-board sono stati sincronizzati tra loro, durante i test sullo scafo, tramite un segnale digitale di trigger generato dal controllore cRIO. Infine, all'interno dello scafo è stato aggiunto anche un sensore di orientamento MTI-30, della Xsens [13], per misurare le rotazioni dello scafo rispetto al suo centro di massa, ridondando le misure acquisite dal sistema Qualisys.

Di seguito sono state riportati tutti i valori di gain e offset dei sensori installati su scafo. Per i 27 trasduttori di pressione è stata utilizzata una singola caratteristica, contenente la media dei valori di gain e offset di ciascun trasduttore.

TABELLA 2.13. RAPPORTI DI TRASFORMAZIONE DEI SENSORI ON-BOARD

Componente	Caratteristica	Gain	Offset
Cella di carico 1	$\text{Carico [Kg]} = \text{Gain} * \text{Tensione [V]} + \text{Offset}$	3.9808	0.0323
Cella di carico 2	$\text{Carico [Kg]} = \text{Gain} * \text{Tensione [V]} + \text{Offset}$	3.9307	0.1511
Cella di carico 3	$\text{Carico [Kg]} = \text{Gain} * \text{Tensione [V]} + \text{Offset}$	4.0049	0.1368
Cella di carico 4	$\text{Carico [Kg]} = \text{Gain} * \text{Tensione [V]} + \text{Offset}$	4.0003	-0.0444
Sensori di pressione (valori medi)	$\text{Pressione [KPa]} = \text{Gain} * \text{Tensione [mV]} + \text{Offset}$	0.0023	-0.5444

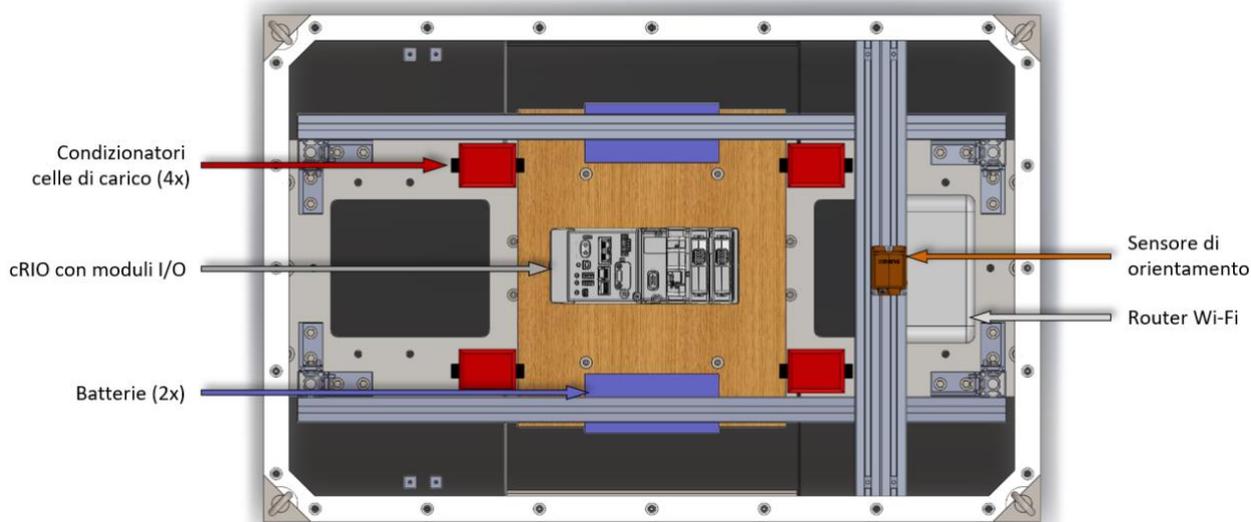


FIGURA 2.18. ELEMENTI PRINCIPALI DELLA CIRCUITERIA ON-BOARD VISTI DALL'ALTO.

I 27 sensori di pressione sono stati applicati forando lo scafo e incollandoli in posizione con colla bicomponente, che ha garantito la tenuta stagna dello scafo. Con riferimento alla Figura 2.19, i sensori sono stati posizionati come descritto nel seguente elenco. Infine, in Tabella 2.14 viene riportata la numerazione univoca dei sensori.

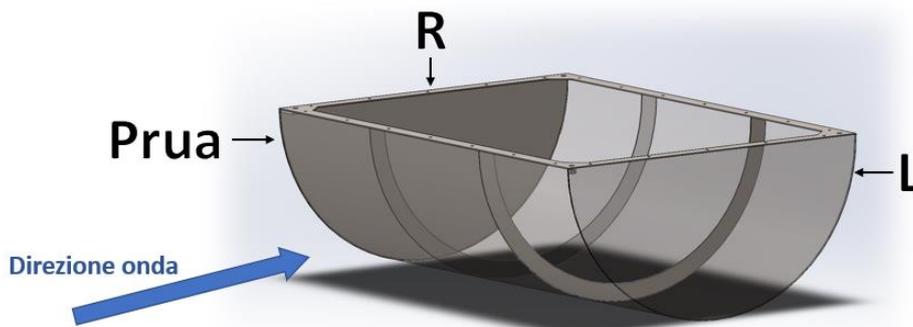


FIGURA 2.19. RIFERIMENTO PER LA DISPOSIZIONE DEI SENSORI

- Alle superfici laterali dello scafo, i sensori sono stati disposti come in Figura 2.20 e Figura 2.21. La disposizione è simmetrica nelle due superfici di destra e sinistra dello scafo.
- Sulla superficie della culla, i sensori sono stati disposti in tre colonne da cinque sensori (rappresentati rispettivamente in Figura 2.22 per la prua e in Figura 2.23 per la poppa), che seguono la curvatura della culla.
- Due sensori aggiuntivi (numeri 27 e 28) sono stati posizionati sulla culla, in maniera simmetrica tra loro. Sono stati posizionati appena più in basso del livello della coperta, per identificare l'eventualità in cui la coperta oscilli al di sotto del pelo libero dell'acqua.

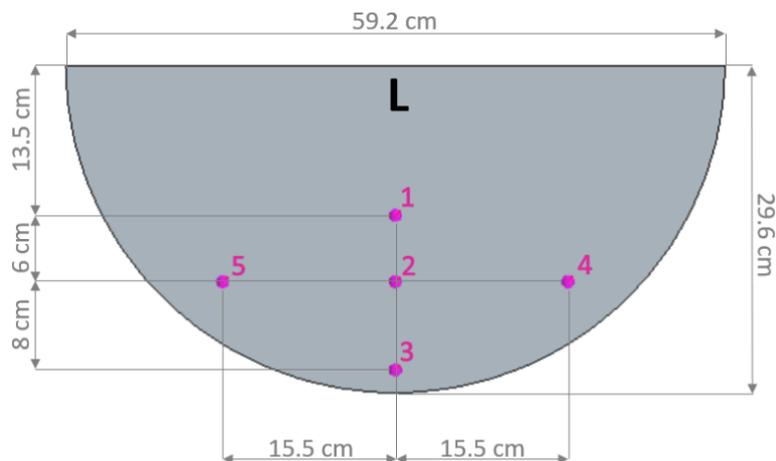


FIGURA 2.20. QUOTE DEI SENSORI DI PRESSIONE SULLA SUPERFICIE LATERALE DI SINISTRA DELLO SCAFO

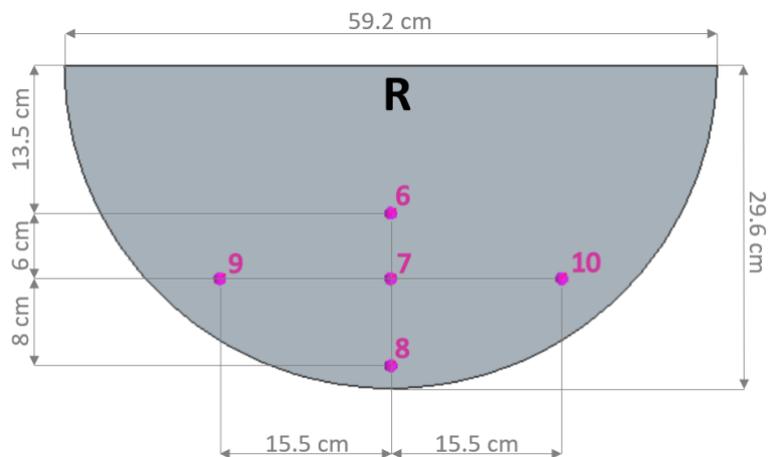


FIGURA 2.21. QUOTE DEI SENSORI DI PRESSIONE SULLA SUPERFICIE LATERALE DI DESTRA DELLO SCAFO

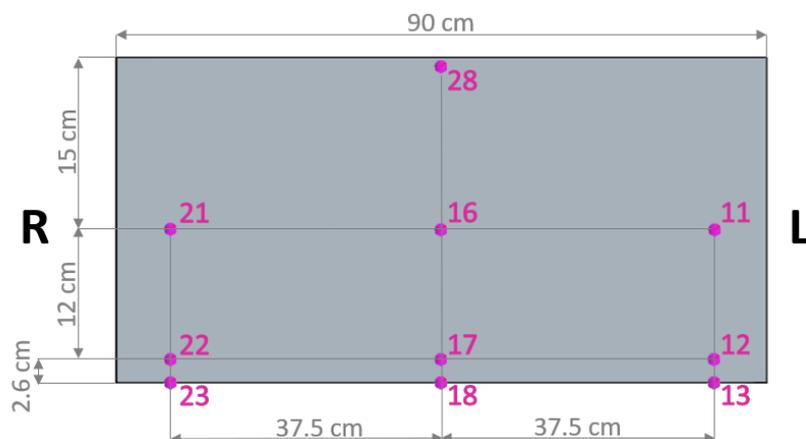


FIGURA 2.22. QUOTE DEI SENSORI DI PRESSIONE SULLA CULLA (PRUA)

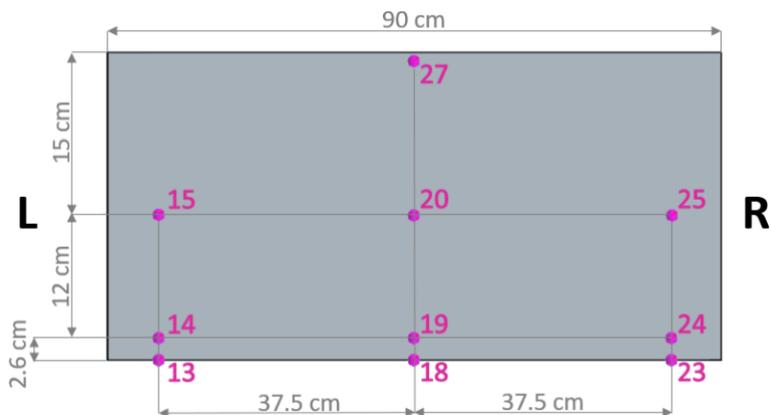


FIGURA 2.23. QUOTE DEI SENSORI DI PRESSIONE SULLA CULLA (POPPA)

TABELLA 2.14. SCHEMA RIASSUNTIVO DI POSIZIONAMENTO E IDENTIFICATIVI DEI SENSORI DI PRESSIONE

Gruppo di sensori	Identificativo dei sensori applicati
Superficie laterale sinistra (L)	1, 2, 3, 4, 5
Superficie laterale destra (R)	6, 7, 8, 9, 10
Culla, colonna di sinistra	11, 12, 13, 14, 15
Culla, colonna centrale	16, 17, 18, 19, 20
Culla, colonna di destra	21, 22, 23, 24, 25
Trigger	27, 28

Per quanto riguarda le celle di carico, invece, esse sono state applicate con dei moschettoni ai golfari ai quattro vertici dello scafo, e collegate direttamente alle linee di ormeggio. Le celle sono state numerate in modo tale da corrispondere alle rispettive linee di ormeggio a cui sono state collegate. Nella Figura 2.24 sono rappresentati le posizioni e i numeri dei sensori, visti dall'alto.

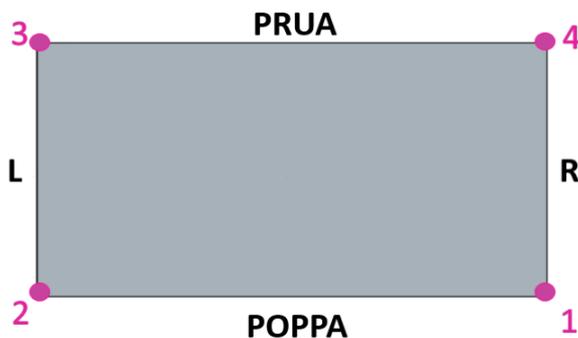


FIGURA 2.24. POSIZIONAMENTO E IDENTIFICATIVI DELLE CELLE DI CARICO. SCAFO VISTO DALL'ALTO

3 Test onde a vuoto

In questo capitolo vengono descritte nel dettaglio tutte le prove a vuoto effettuate in vasca navale. I test sono suddivisi come segue:

- Onde regolari operative con pendenza d'onda 1:30;
- Onde regolari operative con pendenza d'onda 1:50;
- Onde regolari estreme
- Onde irregolari operative
- Onde irregolari estreme

Nella Tabella 3.2 sono riportate tutte le prove effettuate durante la campagna sperimentale.

Dato il setup sperimentale particolare dovuta alla presenza del fondale virtuale tutte le onde di test sono state mandate a vuoto senza la presenza del dispositivo. In questo modo è stato possibile identificare i limiti dovuti al particolare setup. Inoltre, al fine di garantire la ripetibilità e quindi l'affidabilità dei test, sono state eseguite più prove per ogni onda variando l'ampiezza caratteristica dell'ondogeno. Da una prima analisi si confronta la storia temporale delle 7 sonde installate sul carro dinamometrico e si sceglie la prova con minor variazione tra le sonde. Nello stesso modo viene confrontata l'analisi in frequenza, la frequenza media e l'ampiezza media cercando la variazione minima. Dopodiché i dati sperimentali vengono confrontati con i dati teorici.

3.1 Onde regolari

La Tabella 3.1 e i seguenti grafici presentano il confronto fra dati teorici e sperimentali a diversa pendenza per onde regolari.

3.1.1 Onde regolari operative a steepness 1:30

TABELLA 3.1. PROVE A VUOTO, ONDE REGOLARI OPERATIVE A STEEPNESS 1:30

	H_target [cm]	H_ondogeno [cm]	H_exp [cm]	Err_H [%]	T [s]
Reg_01	5.15	5.6	5.11	0.82	1
Reg_02	6.24	6.8	6.03	3.35	1.1
Reg_03	7.42	8.4	7.38	0.5	1.2
Reg_04	8.71	9.6	8.61	1.11	1.3
Reg_05	10.1	11.6	9.91	1.84	1.4
Reg_18	8.17	9	7.85	3.92	1.26
Reg_19	4.17	4.6	4.54	-8.79	0.9
Reg_20	11.58	13	11.29	2.49	1.5
Reg_21	9.24	10	9.43	-1.96	1.34

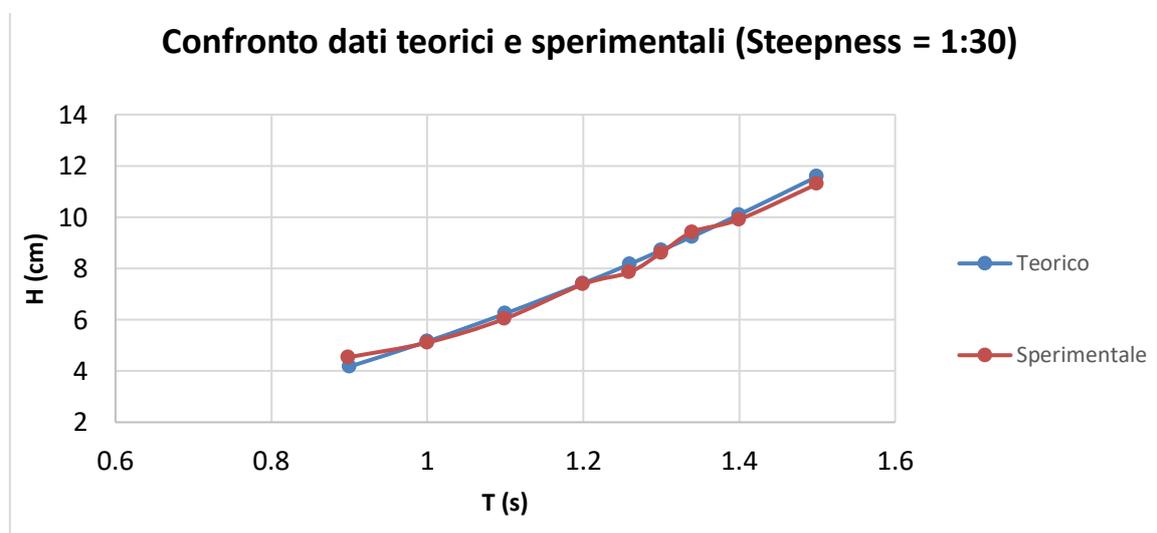


FIGURA 3.1. PROVE A VUOTO, ONDE REGOLARI OPERATIVE A STEEPNESS 1:30. CONFRONTO TRA DATI TEORICI E SPERIMENTALI

TABELLA 3.2. ELENCO DEI TEST

Id	Wave name	Type	Device y/n	Mooring y/n	Test	Steepness	H/Hs [m]	T/Te [s]	H/Hs scale [m]	T/Te scale [s]	Dir [°]	Dur [min]	Number of tests	Delay between 2 tests [min]	Total time [h]	Done?
1	freedec	free_decay_pitch	device	nomoor	Free decay tests pitch (no mooring)	\	\	\	\	\	0	\	\	\	\	si
2	freedec	free_decay_roll	device	nomoor	Free decay tests roll (no mooring)	\	\	\	\	\	0	\	\	\	\	si
3	freedec	free_decay_heave	device	nomoor	Free decay tests heave (no mooring)	\	\	\	\	\	0	\	\	\	\	si
4	freedec	free_decay_pitch	device	moor	Free decay tests pitch (mooring)	\	\	\	\	\	0 - 45 - 90	\	\	\	\	si - si - si
5	freedec	free_decay_roll	device	moor	Free decay tests roll (mooring)	\	\	\	\	\	0 - 45 - 90	\	\	\	\	si - si - si
6	freedec	free_decay_heave	device	moor	Free decay tests heave (mooring)	\	\	\	\	\	0 - 45 - 90	\	\	\	\	si - si - si
7	freedec	free_decay_surge	device	moor	Free decay tests surge (mooring)	\	\	\	\	\	0 - 45 - 90	\	\	\	\	si - si - si
8	freedec	free_decay_yaw	device	moor	Free decay tests yaw (mooring)	\	\	\	\	\	0 - 45 - 90	\	\	\	\	si - si - si
9	freedec	free_decay_sway	device	moor	Free decay tests sway (mooring)	\	\	\	\	\	0 - 45 - 90	\	\	\	\	si - si - si
10	surge_prua	pullout	device	moor	Static mooring	\	\	\	\	\	0	\	\	\	\	si
11	surge_poppa	pullout	device	moor		\	\	\	\	\	0	\	\	\	\	si
12	sway_left	pullout	device	moor		\	\	\	\	\	0	\	\	\	\	si
13	sway_right	pullout	device	moor		\	\	\	\	\	0	\	\	\	\	si
14	reg_01	operativewave	nodev	nomoor	Regular wave	0.03	1.29	5	0.0515	1.00	0	1.5	1	10	0.19	si
15	reg_02	operativewave	nodev	nomoor		0.03	1.56	5.5	0.0623	1.10	0	1.5	1	10	0.19	si
16	reg_03	operativewave	nodev	nomoor		0.03	1.85	6	0.0741	1.20	0	1.5	1	10	0.19	si
17	reg_04	operativewave	nodev	nomoor		0.03	2.18	6.5	0.0870	1.30	0	1.5	1	10	0.19	si
18	reg_05	operativewave	nodev	nomoor		0.03	2.52	7	0.1009	1.40	0	1.5	1	10	0.19	si
19	reg_17	operativewave	nodev	nomoor		0.03	0.82	4	0.0329	0.80	0	1.5	1	10	0.19	no
20	reg_18	operativewave	nodev	nomoor		0.03	2.04	6.3	0.0817	1.26	0	1.5	1	10	0.19	si
21	reg_19	operativewave	nodev	nomoor		0.03	1.04	4.5	0.0417	0.90	0	1.5	1	10	0.19	si
22	reg_20	operativewave	nodev	nomoor		0.03	2.90	7.5	0.1158	1.50	0	1.5	1	10	0.19	si
23	reg_21	operativewave	nodev	nomoor		0.03	2.31	6.7	0.0924	1.34	0	1.5	1	10	0.19	si

24	reg_06	operativewave	nodev	nomoor		0.02	0.50	4	0.0200	0.80	0	1.5	1	10	0.19	si
25	reg_07	operativewave	nodev	nomoor		0.02	0.78	5	0.0312	1.00	0	1.5	1	10	0.19	si
26	reg_08	operativewave	nodev	nomoor		0.02	0.95	5.5	0.0380	1.10	0	1.5	1	10	0.19	si
27	reg_09	operativewave	nodev	nomoor		0.02	1.12	6	0.0448	1.20	0	1.5	1	10	0.19	si
28	reg_10	operativewave	nodev	nomoor		0.02	1.32	6.5	0.0528	1.30	0	1.5	1	10	0.19	si
29	reg_11	operativewave	nodev	nomoor		0.02	1.53	7	0.0612	1.40	0	1.5	1	10	0.19	si
30	reg_12	operativewave	nodev	nomoor		0.02	2.00	8.00	0.0800	1.60	0	1.5	1	10	0.19	si
31	reg_13	operativewave	nodev	nomoor		0.02	2.53	9.00	0.1012	1.80	0	1.5	1	10	0.19	no
32	reg_14	operativewave	nodev	nomoor		0.02	3.12	10.00	0.1248	2.00	0	1.5	1	10	0.19	no
33	reg_22	operativewave	nodev	nomoor		0.02	1.24	6.3	0.0495	1.26	0	1.5	1	10	0.19	si
34	reg_23	operativewave	nodev	nomoor		0.02	0.63	4.5	0.0253	0.90	0	1.5	1	10	0.19	si
35	reg_24	operativewave	nodev	nomoor		0.02	1.76	7.5	0.0702	1.50	0	1.5	1	10	0.19	si
36	reg_25	operativewave	nodev	nomoor		0.02	1.40	6.7	0.0560	1.34	0	1.5	1	10	0.19	si
37	irr_01	operativewave	nodev	nomoor	Irregular wave (system ID - 3)	0.00	1.29	5.00	0.05	1.00	0	6.00	3	10	0.80	si
38	irr_02	operativewave	nodev	nomoor		0.00	1.86	6.00	0.07	1.20	0	6.00	3	10	0.80	si
39	irr_03	operativewave	nodev	nomoor		0.00	2.53	7.00	0.10	1.40	0	6.00	3	10	0.80	si
40	irr_04	operativewave	nodev	nomoor		0.00	3.30	8.00	0.13	1.60	0	6.00	3	10	0.80	si
41	irr_05	operativewave	nodev	nomoor		0.00	0.78	5.00	0.03	1.00	0	6.00	3	10	0.80	si
42	irr_07	operativewave	nodev	nomoor		0.00	1.12	6.00	0.04	1.20	0	6.00	3	10	0.80	si
43	irr_08	operativewave	nodev	nomoor		0.00	1.53	7.00	0.06	1.40	0	6.00	3	10	0.80	no
44	reg_15	extremewave	nodev	nomoor	Extreme regular wave	0.12	7	6	0.28	1.2	0	36	3	20	2.8	si
45	reg_16	extremewave	nodev	nomoor		0.06	13.87	11.9	0.5548	2.38	0	36	3	20	2.8	no
46	irr_09	extremewave	nodev	nomoor	Extreme irregular wave	0.07	4.2	6	0.168	1.2	0	36	3	20	2.8	si
47	irr_12	extremewave	nodev	nomoor		0.03	7.28	11.9	0.2912	2.38	0	36	3	20	2.8	no
48	reg_01	operativewave	device	moor	Regular wave	0.03	1.29	5.00	0.05	1.00	0 - 45 - 90	2.00	1	10	0.20	si - si - si
49	reg_02	operativewave	device	moor		0.03	1.56	5.5	0.06	1.10	0 - 45 - 90	2	1	10	0.20	si - si - si
50	reg_03	operativewave	device	moor		0.03	1.86	6	0.07	1.20	0 - 45 - 90	2	1	10	0.20	si - si - si

ACCORDO DI PROGRAMMA MISE-ENEA

51	reg_04	operativewave	device	moor	Irregular wave	0.03	2.18	6.5	0.09	1.30	0 - 45 - 90	2.00	1	10	0.20	si - si - si
52	reg_05	operativewave	device	moor		0.03	2.53	7	0.10	1.40	0 - 45 - 90	2.00	1	10	0.20	si - si - si
53	reg_17	operativewave	device	moor		0.03	0.82	4	0.03	0.80	0 - 45 - 90	2.00	1	10	0.20	no
54	reg_18	operativewave	device	moor		0.03	2.04	6.3	0.08	1.26	0 - 45 - 90	2.00	1	10	0.20	si - si - si
55	reg_19	operativewave	device	moor		0.03	1.04	4.5	0.04	0.90	0 - 45 - 90	2.00	1	10	0.20	si - si - si
56	reg_20	operativewave	device	moor		0.03	2.90	7.5	0.12	1.50	0 - 45 - 90	2.00	1	10	0.20	si - si - si
57	reg_21	operativewave	device	moor		0.03	2.31	6.7	0.09	1.34	0 - 45 - 90	2.00	1	10	0.20	si - si - si
58	reg_06	operativewave	device	moor		0.02	0.50	4	0.02	0.80	0 - 45 - 90	2.00	1	10	0.20	no
59	reg_07	operativewave	device	moor		0.02	0.78	5	0.03	1.00	0 - 45 - 90	2.00	1	10	0.20	si - si - si
60	reg_08	operativewave	device	moor		0.02	0.95	5.5	0.04	1.10	0 - 45 - 90	2.00	3	10	0.60	si - si - si
61	reg_09	operativewave	device	moor		0.02	1.12	6	0.04	1.20	0 - 45 - 90	2.00	3	10	0.60	si - si - si
62	reg_10	operativewave	device	moor		0.02	1.32	6.5	0.05	1.30	0 - 45 - 90	2.00	3	10	0.60	si - si - si
63	reg_11	operativewave	device	moor		0.02	1.53	7	0.06	1.40	0 - 45 - 90	2.00	1	10	0.20	si - si - no
64	reg_12	operativewave	device	moor		0.02	2.00	8	0.08	1.60	0 - 45 - 90	2.00	1	10	0.20	si - si - no
65	reg_13	operativewave	device	moor		0.02	2.53	9	0.1012	1.8	0 - 45 - 90	1.5	1	10	0.19	no
66	reg_14	operativewave	device	moor		0.02	3.12	10	0.1248	2.00	0 - 45 - 90	1.5	1	10	0.19	no
67	reg_22	operativewave	device	moor		0.02	1.24	6.3	0.05	1.26	0 - 45 - 90	2.00	1	10	0.20	si - si - no
68	reg_23	operativewave	device	moor		0.02	0.63	4.5	0.03	0.90	0 - 45 - 90	2.00	1	10	0.20	si - si - si
69	reg_24	operativewave	device	moor		0.02	1.76	7.5	0.07	1.50	0 - 45 - 90	2.00	1	10	0.20	si - si - no
70	reg_25	operativewave	device	moor		0.02	1.40	6.7	0.06	1.34	0 - 45 - 90	2.00	1	10	0.20	si - si - no
71	irr_01	operativewave	device	moor		0.03	1.29	5.00	0.05	1.00	0 - 45 - 90	6.00	3	10	0.80	si - si - si
72	irr_02	operativewave	device	moor		0.03	1.86	6.00	0.07	1.20	0 - 45 - 90	6.00	3	10	0.80	si - si - si
73	irr_03	operativewave	device	moor		0.03	2.53	7.00	0.10	1.40	0 - 45 - 90	6.00	3	10	0.80	si - no - si
74	irr_04	operativewave	device	moor		0.03	3.30	8.00	0.13	1.60	0 - 45 - 90	6.00	3	10	0.80	si - no - no
75	irr_05	operativewave	device	moor		0.02	0.78	5.00	0.03	1.00	0 - 45 - 90	6.00	3	10	0.80	si - no - no
76	irr_06	operativewave	device	moor	0.02	1.12	6.00	0.04	1.20	0 - 45 - 90	6.00	3	10	0.80	si - no - no	
77	irr_07	operativewave	device	moor	0.02	1.53	7.00	0.06	1.40	0 - 45 - 90	6.00	3	10	0.80	si - no - no	

78	irr_08	operativewave	device	moor		0.02	1.53	7.00	0.06	1.40	0 - 45 - 90	6.00	3	10	0.80	no
79	reg_15	extremewave	device	moor	Extreme regular wave	0.12	7	6	0.28	1.2	0 - 45 - 90	36.00	5	20	4.67	si - si - si
80	reg_16	extremewave	device	moor		0.06	13.87	11.9	0.5548	2.38	0 - 45 - 90	36	5	20	4.67	no
81	irr_09	extremewave	device	moor	Extreme irregular wave	0.07	4.19	6.00	0.1676	1.20	0 - 45 - 90	36.00	5	20	4.67	si - si - si
82	irr_12	extremewave	device	moor		0.03	7.28	11.9	0.2912	2.38	0 - 45 - 90	36	5	20	4.67	no

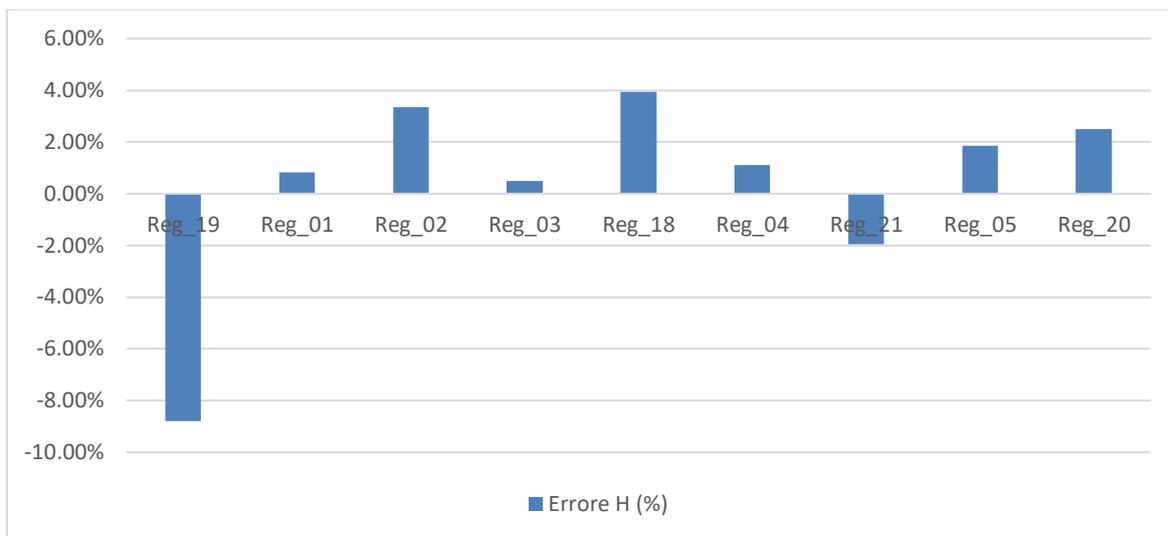


FIGURA 3.2. ONDE REGOLARI OPERATIVE A VUOTO (s = 1:30). ERRORE TRA ALTEZZE TEORICHE E SPERIMENTALI RISPETTO T

È possibile notare per le onde regolari operative a steepness 1:30, un errore massimo di 8.8% sulla altezza d’onda, che riguarda l’onda con periodo più piccolo. La variazione sul periodo invece non supera lo 0.1%, pertanto la rappresentazione grafica non è di interesse.

3.1.2 Onde regolari operative a steepness 1:50

TABELLA 3.3. PROVE A VUOTO, ONDE REGOLARI OPERATIVE A STEEPNESS 1:50

	H_target [cm]	H_ondogeno [cm]	H_exp [cm]	Err_H [%]	T [s]
Reg_06	2	2	2.13	-6.65	0.8
Reg_07	3.12	3.6	3.11	0.43	1
Reg_08	3.8	4.2	3.91	-2.95	1.1
Reg_09	4.48	5	4.73	-5.64	1.2
Reg_10	5.28	5.8	5.51	-4.29	1.3
Reg_11	6.12	6.6	6.01	1.85	1.4
Reg_12	8	9.20	7.40	7.51	1.6
Reg_22	4.95	5.4	4.99	-0.84	1.26
Reg_23	2.53	2.2	2.32	8.36	0.9
Reg_24	7.02	7.6	6.78	3.35	1.5
Reg_25	5.6	6.2	5.97	-6.55	1.34

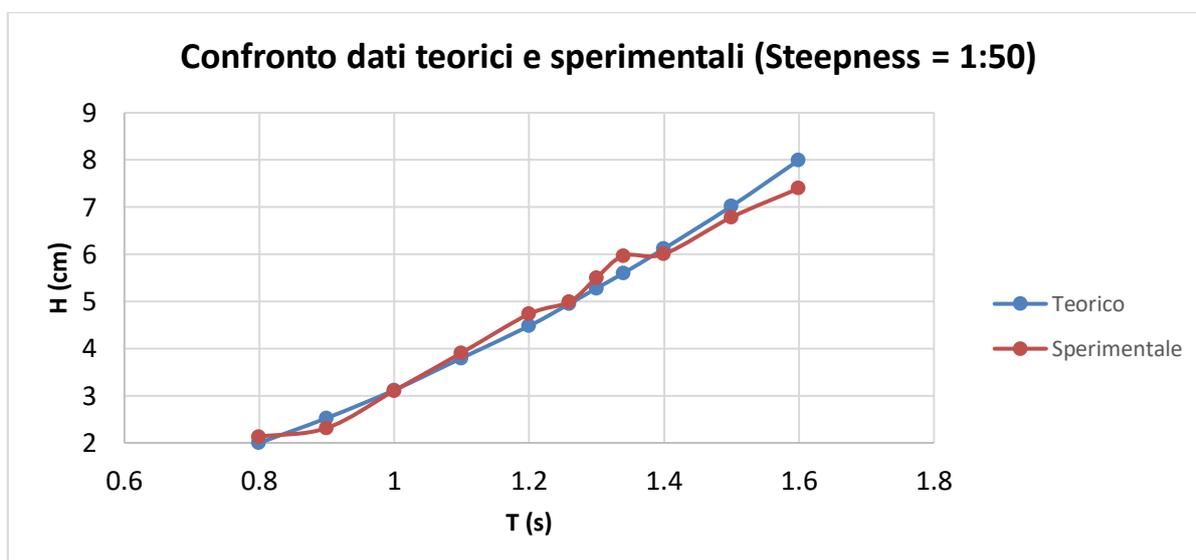


FIGURA 3.3. PROVE A VUOTO, ONDE REGOLARI OPERATIVE A STEEPNESS 1:50. CONFRONTO TRA DATI TEORICI E SPERIMENTALI

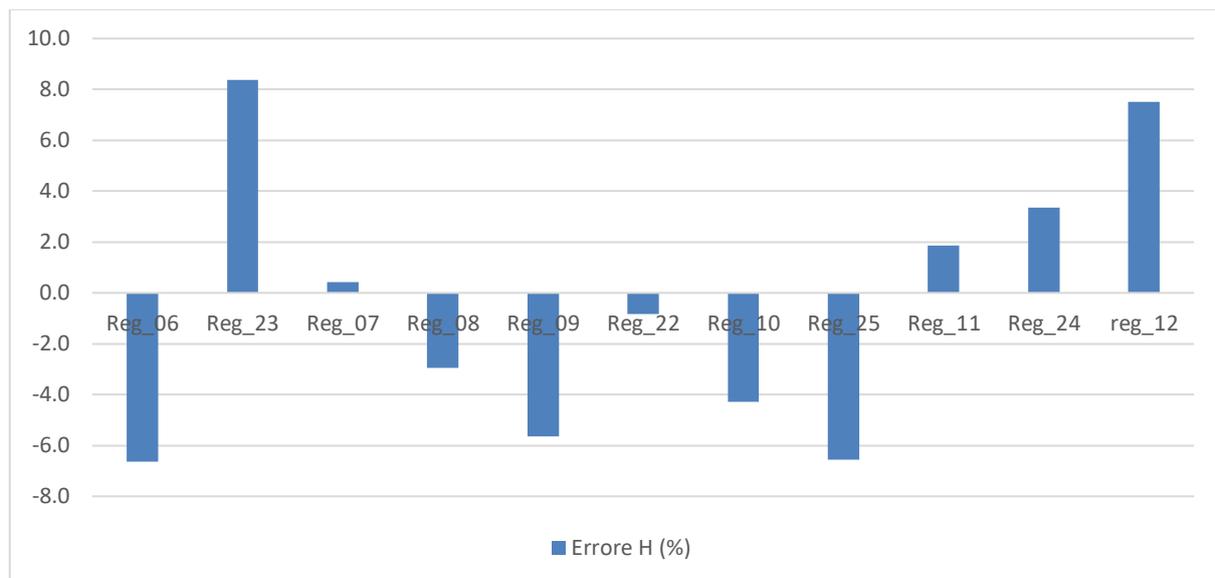


FIGURA 3.4. ONDE REGOLARI OPERATIVE A VUOTO (s = 1:50). ERRORE TRA ALTEZZE TEORICHE E SPERIMENTALI RISPETTO T

Il confronto mostra un errore massimo del 8.4%, anche in questo caso per un'onda a periodo 0.9 s.

Dalle analisi delle onde operative a vuoto si può dunque concludere che il setup presenta un limite per periodi d'onda (T) minori di 1 s o maggiori di 1.6 s (in scala del modello). In questi casi, le onde misurate sul fondale artificiale non garantiscono accuratezza, ma con un errore comunque minore del 10%. È possibile comunque individuare un range operativo ($1\text{ s} < T < 1.6\text{ s}$, che in full scale equivale a $5\text{ s} < T < 8\text{ s}$) all'interno del quale sono garantite regolarità, ripetibilità e fedeltà dell'onda generata, con un errore medio minore del 5% (2% per steepness 1:30, 3.21% per steepness 1:50). Al di fuori di questo range, l'onda presenta irregolarità e non è ripetibile: per il limite inferiore di periodo le irregolarità sono dovute ai limiti del generatore ondoso, mentre per il limite superiore le irregolarità sono dovute all'interazione con il fondale artificiale.

3.1.3 Onda regolare estrema

In questo paragrafo viene analizzata la fattibilità delle onde estreme. Innanzitutto, tra le varie onde estreme che erano state selezionate e scelte come test da effettuare sperimentalmente, sono state scartate tutte quelle non fattibili per limiti fisici dell'ondogeno e quelle che causano interazione con il fondale artificiale. Come descritto nel paragrafo 2.1, l'ondogeno può generare onde con un'ampiezza massima di 15 cm, e questo di fatto ha portato a scartare tutte le prove con ampiezza maggiore. Fra le onde estreme in programma, il test Reg15 è l'unico fra le onde estreme fattibile, caratterizzato altezza d'onda $H = 28\text{ cm}$ e periodo 1.2 s. Il test è stato ripetuto più volte, in quanto si è notato che per grandi altezze la regolarità e l'accuratezza dell'onda generata degradano. Dopo un processo iterativo è stato scelto di impostare una ampiezza generata più bassa ($H_{\text{ondogeno}} = 23\text{ cm}$), accettando un errore più alto in ampiezza e al tempo stesso garantendo la regolarità e la ripetibilità dell'onda. L'onda così generata (la cui prova sperimentale è riportata in Tabella 3.4) non è di fatto una onda regolare estrema, bensì severa.

TABELLA 3.4. PROVE A VUOTO, ONDA REGOLARE SEVERA

	H_target [cm]	H_ondogeno [cm]	H_exp [cm]	Err_H [%]	T [s]
Reg_15	28	23	17.62	37.07	1.2

3.1.4 Onde regolari: analisi dei limiti sul periodo

In questo paragrafo viene approfondito il comportamento delle onde regolari per i limiti individuati nel periodo d'onda che può essere generato per le condizioni ambientali della vasca navale (ondogeno, fondale artificiale). Nel seguito vengono riportati i grafici rappresentanti la storia temporale delle sonde di riferimento, la FFT (Fast Fourier Transformation) e il confronto tra i periodi e le ampiezze misurate da tutte le sonde dei casi limite.

Caso limite inferiore: Reg17, T = 0.8 s, Hs = 3.3 cm, Steepness 1:30

Dai grafici seguenti è possibile notare che nel caso limite inferiore, onda con ampiezza e periodo piccoli, la regolarità dell'onda è fortemente compromessa: a dimostrazione visibile dalla storia temporale in Figura 3.5 e dall'analisi spettrale in Figura 3.6. Dalla Figura 3.7, si può notare che le singole wave probes presentano variazioni in termini di ampiezza rilevata, con un errore percentuale fino al 30% rispetto al valore atteso, mentre la frequenza delle singole sonde è regolare.

Nel caso limite superiore, con riferimento alla Figura 3.8 e alla Figura 3.9, l'andamento dell'onda è sostanzialmente regolare, nonostante una certa variabilità nelle ampiezze rilevate dalle singole wave probes. L'errore relativo calcolato rispetto al valore atteso di ampiezza è 17%.

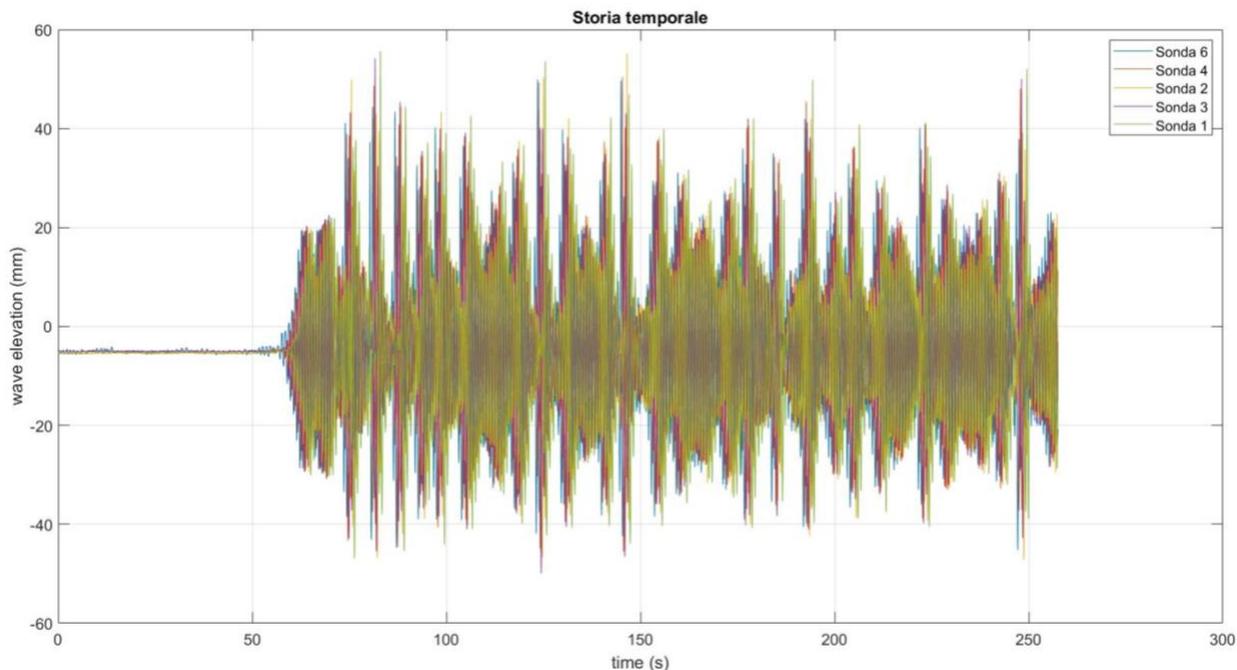


FIGURA 3.5. ONDA REGOLARE A T=0.8 s e H=3.3CM: CASO LIMITE INFERIORE. STORIA TEMPORALE DELLE SONDE 1, 2, 3, 4, 6

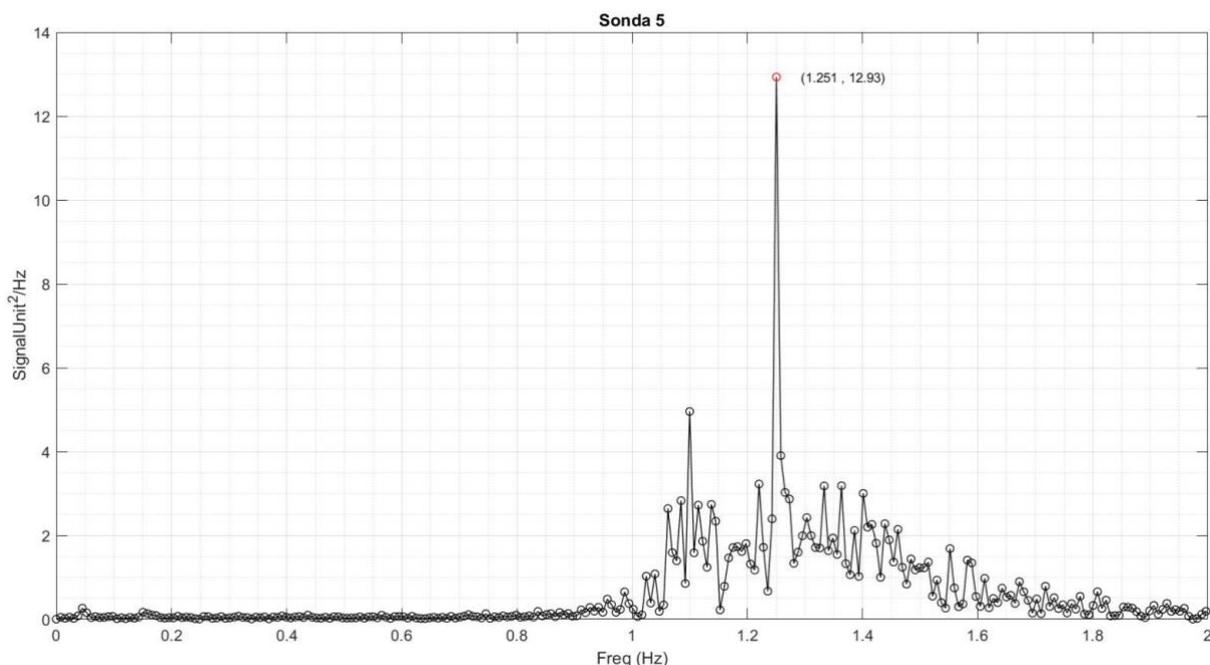


FIGURA 3.6. ONDA REGOLARE A T=0.8 s e H=3.3CM: CASO LIMITE INFERIORE. FFT DELLA SONDA 5

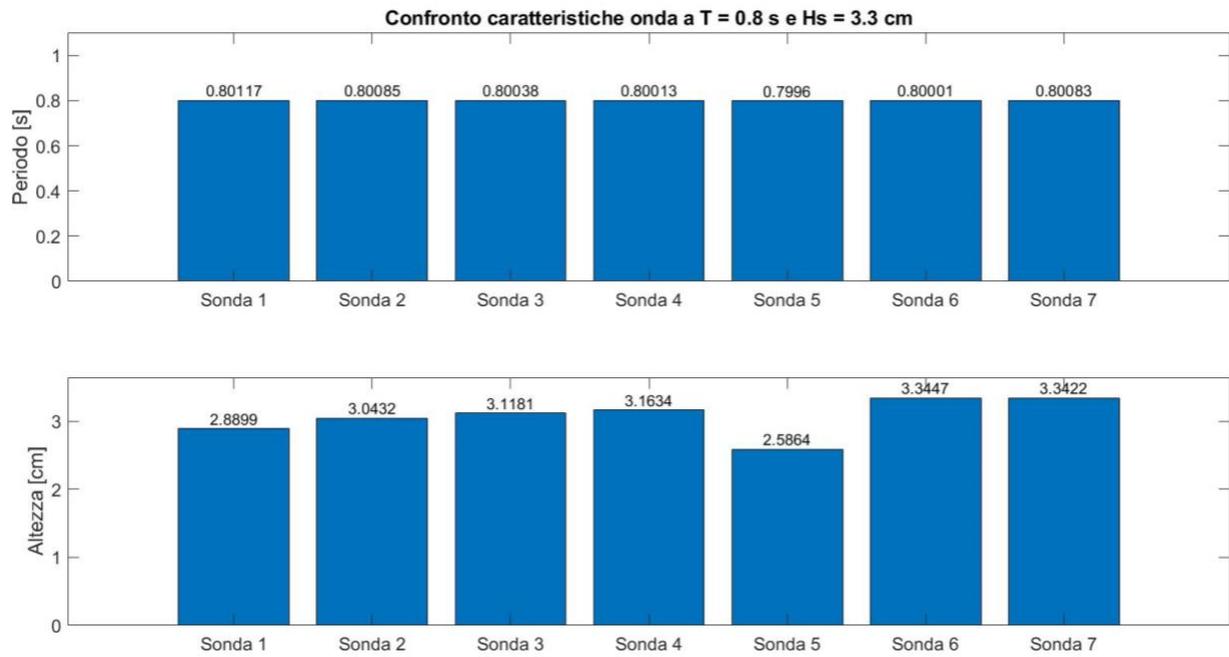


FIGURA 3.7. ONDA REGOLARE A T=0.8 s e H=3.3cm: CASO LIMITE INFERIORE. CONFRONTO TRA PERIODI E ALTEZZE RILEVATI DALLE DIVERSE SONDE.

Caso limite superiore: Reg12, T = 1.6 s, Hs = 8 cm, Steepness 1:50

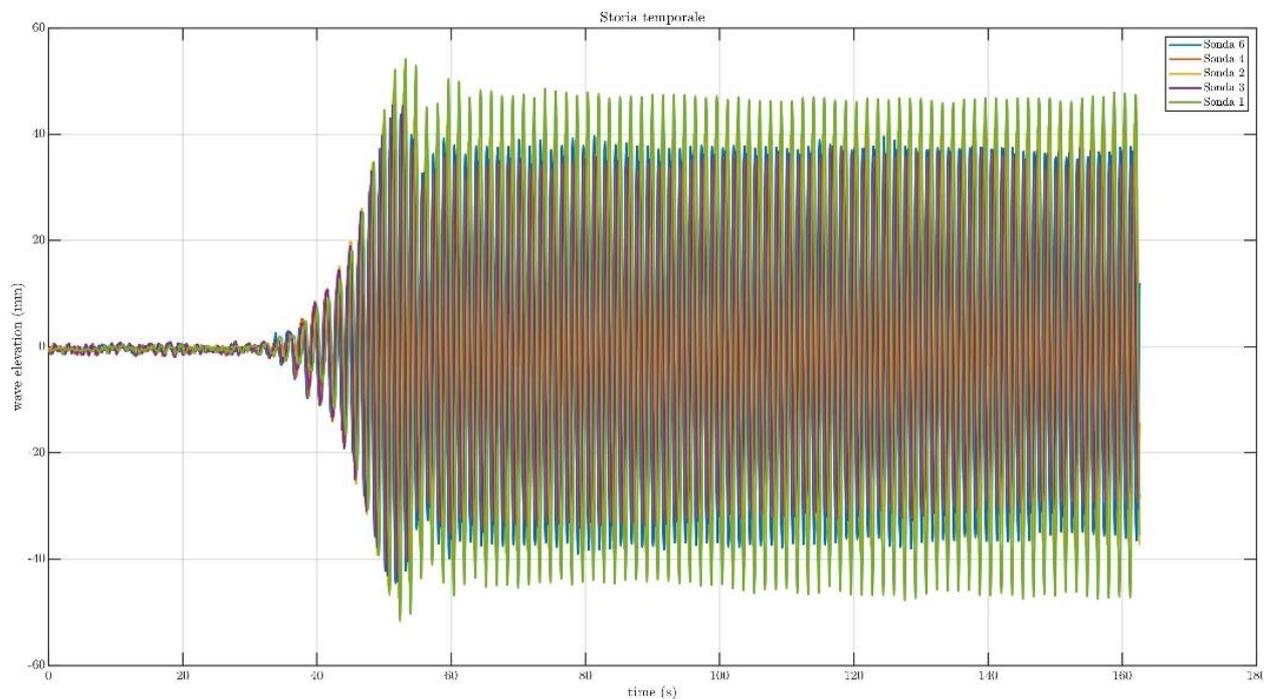


FIGURA 3.8. ONDA REGOLARE A T=1.6 s e H=8cm: CASO LIMITE SUPERIORE. STORIA TEMPORALE DELLE SONDE 1, 2, 3, 4, 6.

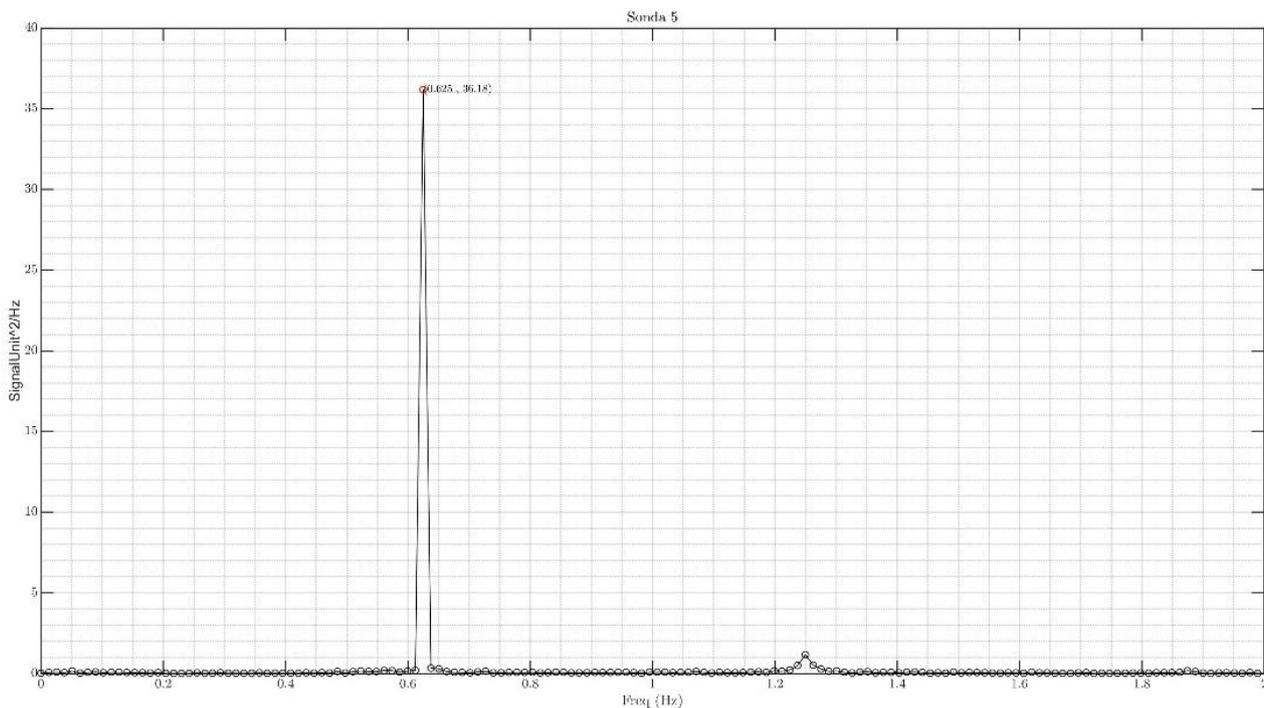


FIGURA 3.9. ONDA REGOLARE A T=1.6 s E H=8cm: CASO LIMITE SUPERIORE. FFT DELLA SONDA 5

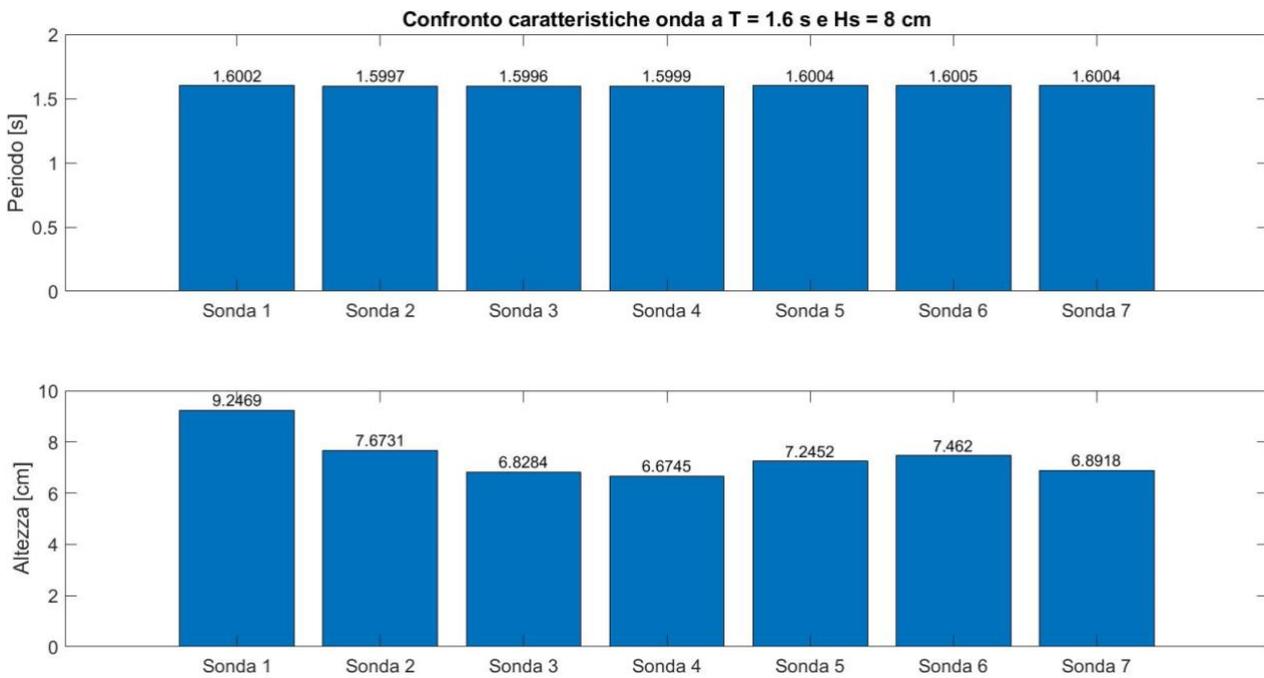


FIGURA 3.10. ONDA REGOLARE A T=1.6 s E H=8cm: CASO LIMITE SUPERIORE. CONFRONTO TRA PERIODI E ALTEZZE RILEVATI DALLE DIVERSE SONDE.

3.2 Onde irregolari

La Tabella 3.5 e i seguenti grafici presentano il confronto fra dati teorici e sperimentali per onde irregolari operative ed estreme. Come si nota dalla Figura 3.12, l'errore relativo tra dati teorici e sperimentali delle onde operative non supera il 4.5% nel caso dell'altezza d'onda e il 4% nel caso di periodo energetico. Per quanto riguarda l'onda estrema analizzata, l'errore sull'altezza d'onda è comparabile con quello delle onde operative, mentre l'errore sul periodo energetico risulta essere al 14%. Questo è stato considerato accettabile, tenendo conto dell'interazione tra moto ondoso e fondale artificiale.

TABELLA 3.5. PROVE A VUOTO, ONDE IRREGOLARI OPERATIVE E SEVERE

Nome	Hs_target [cm]	Te_target [s]	H_ondogeno [cm]	Hs_exp [cm]	Err_Hs [%]	Te_exp [s]	Err_Te [%]
Irr_01	5.15	1	5.5	5.11	0.79	1.021	2.09%
Irr_02	7.42	1.2	8.15	7.24	2.37	1.154	-3.86%
Irr_03	10.1	1.4	12	9.75	3.42	0.996	-0.39%
Irr_04	13.2	1.6	16	12.65	4.2	1.348	-3.74%
Irr_05	3.12	1	3.7	3.19	-2.24	1.175	-2.10%
Irr_06	4.5	1.2	5	4.42	1.67	1.403	0.22%
Irr_07	6.12	1.4	7	5.86	4.2	1.597	-0.17%
Irr_extreme	16.76	1.2	22	16.06	4	1.377	-14.78%

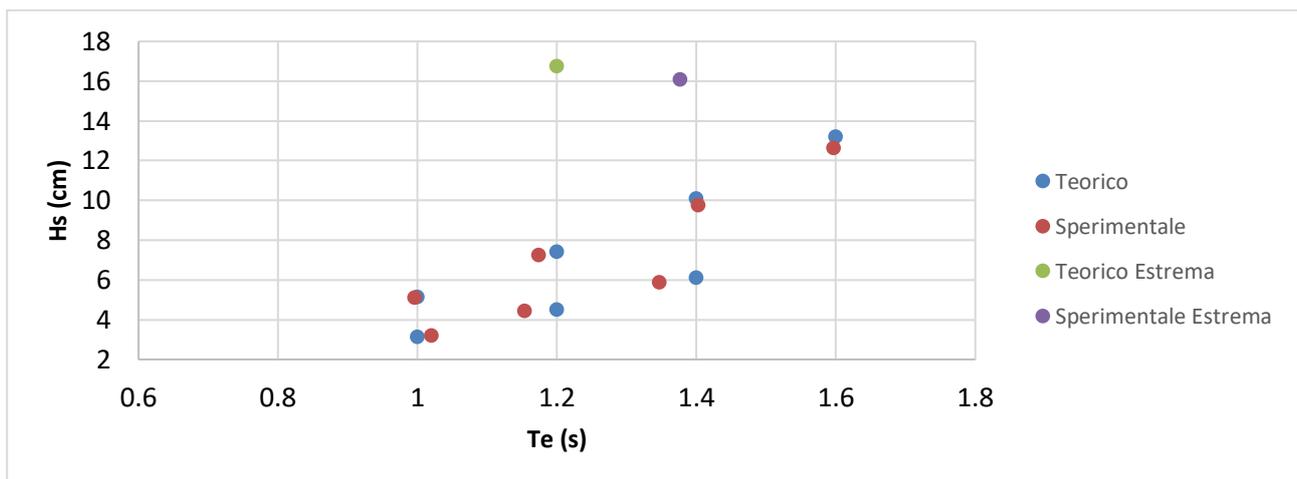


FIGURA 3.11. PROVE A VUOTO, ONDE IRREGOLARI OPERATIVE E ESTREME. CONFRONTO TRA DATI TEORICI E SPERIMENTALI.

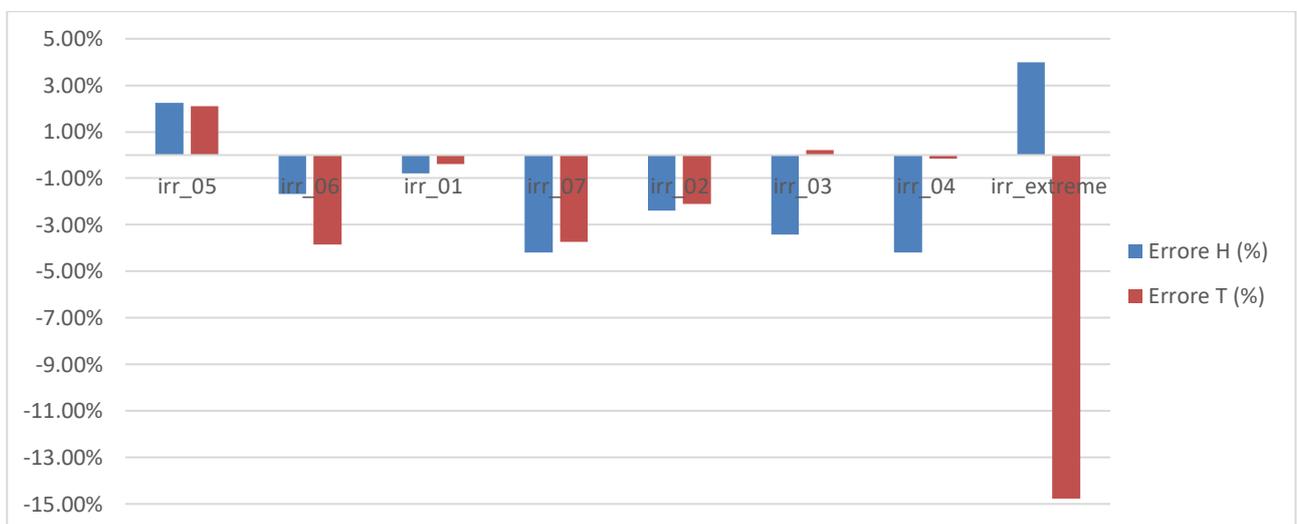


FIGURA 3.12. ONDE IRREGOLARI OPERATIVE ED ESTREME A VUOTO. ERRORE DI HS E TE

4 Risultati

In questo capitolo sono riportati i risultati relativi ai test effettuati con il dispositivo in vasca navale. Nello specifico vengono riportati i risultati delle prove sperimentali riferite alla scala del modello dei test di:

- Free decay
- Pull-out delle celle di carico del sistema di ormeggio
- Onde regolari operative e severe: storia temporale del Qualysis, celle di carico, sensori di pressione.
- Onde irregolari, operative ed estreme: storia temporale del Qualysis, celle di carico, sensori di pressione.
- Risultati dell'analisi P-Welch
- RAOs

4.1 Free Decay

In questo paragrafo vengono riportati i risultati dei test di free decay svolti in acqua calma senza ormeggi (rispetto a Roll e Pitch) e con ormeggi (rispetto a Roll, Pitch, Yaw, Surge, Sway). Questo tipo di test permette di valutare il periodo di risonanza e il coefficiente di smorzamento delle oscillazioni libere.

Nel seguito vengono riportati i grafici relativi al caso senza ormeggio e al caso con ormeggio per i diversi gradi di libertà.

4.1.1 Caso senza ormeggio

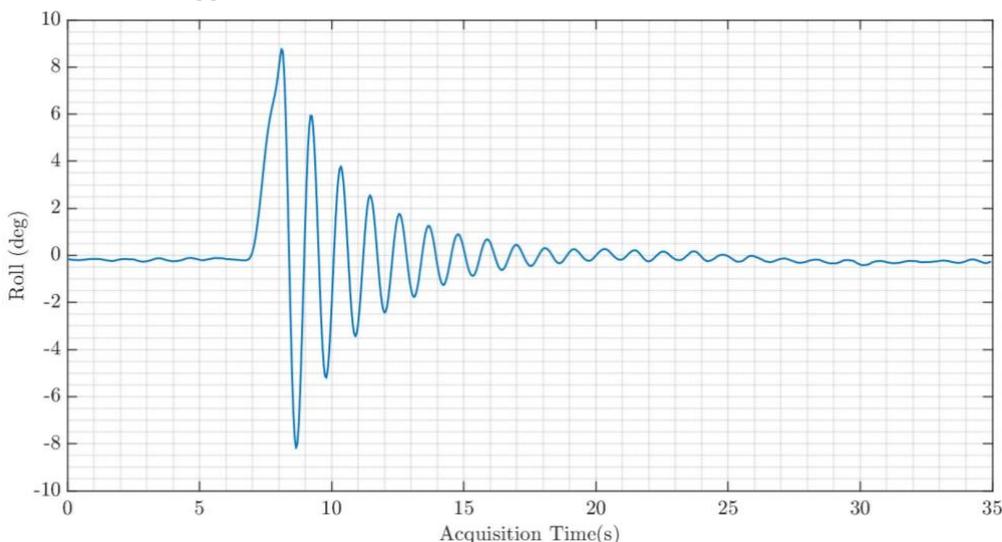


FIGURA 4.1. MOTO A ROLL SENZA ORMEGGIO

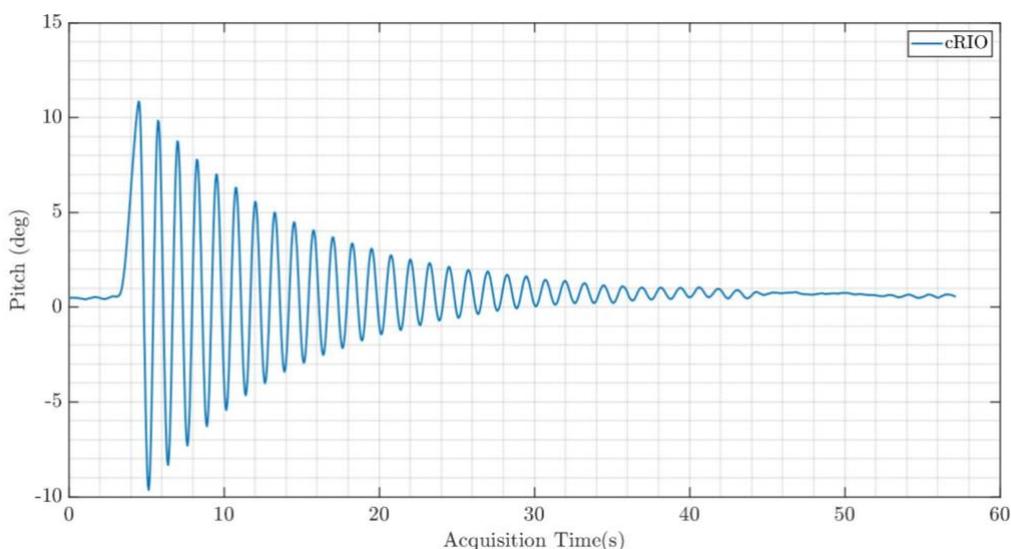


FIGURA 4.2. MOTO A PITCH SENZA ORMEGGIO

La Figura 4.1 e la Figura 4.2 presentano la storia temporale dello spostamento libero a Roll e a Pitch del dispositivo eccitato da un impulso nel caso senza ormeggio, registrata dal sistema di acquisizione cRIO. Si può notare che il decadimento del moto segue un andamento logaritmico decrescente e non presenta irregolarità.

4.1.2 Caso con ormeggio

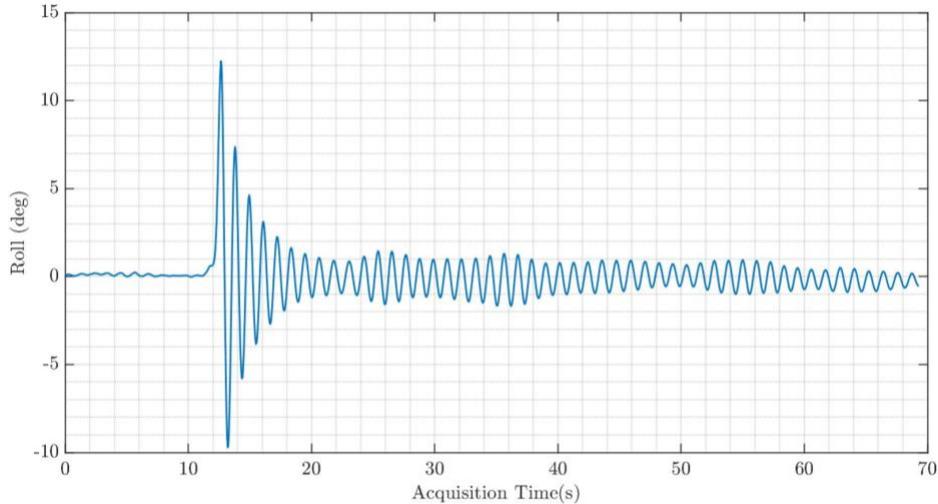


FIGURA 4.3. MOTO A ROLL CON ORMEGGIO

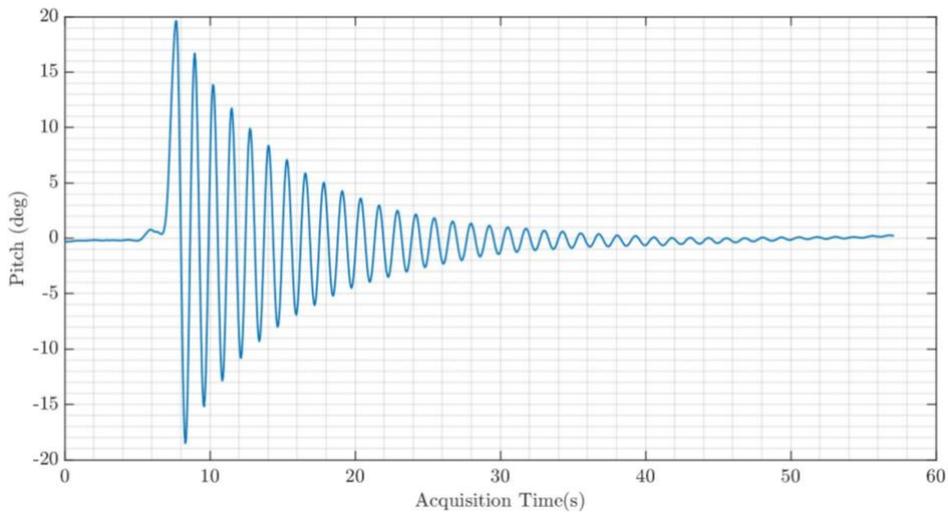


FIGURA 4.4. MOTO A PITCH CON ORMEGGIO

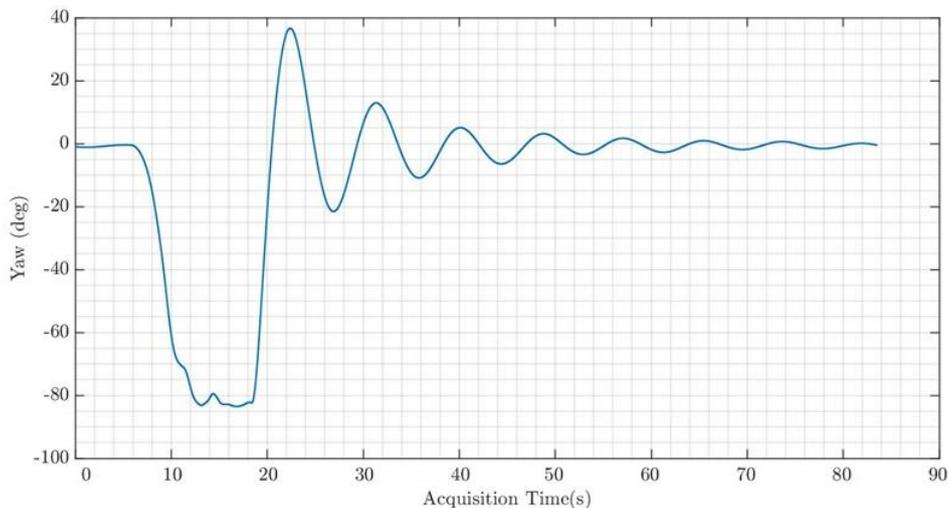


FIGURA 4.5. MOTO A YAW CON ORMEGGIO

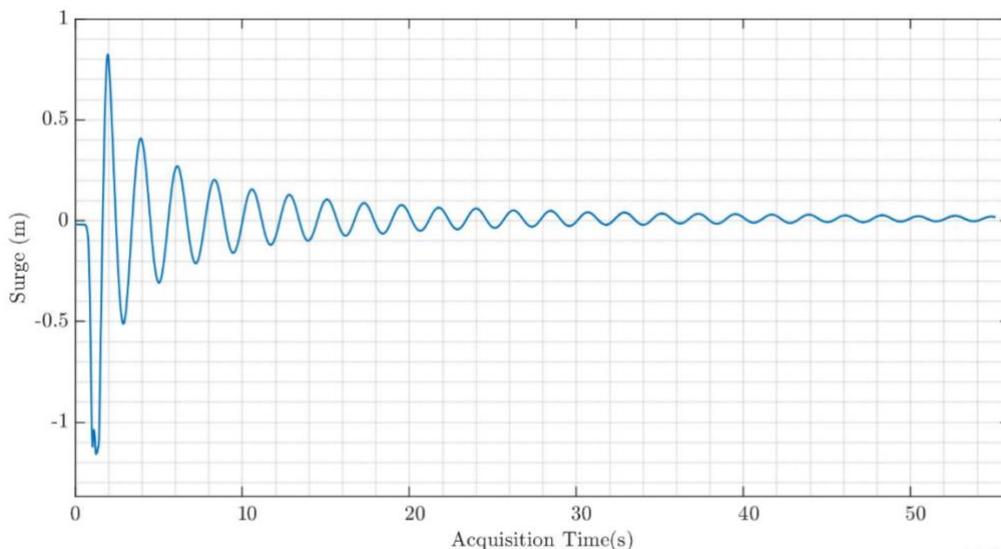


FIGURA 4.6. MOTO A SURGE CON ORMEGGIO

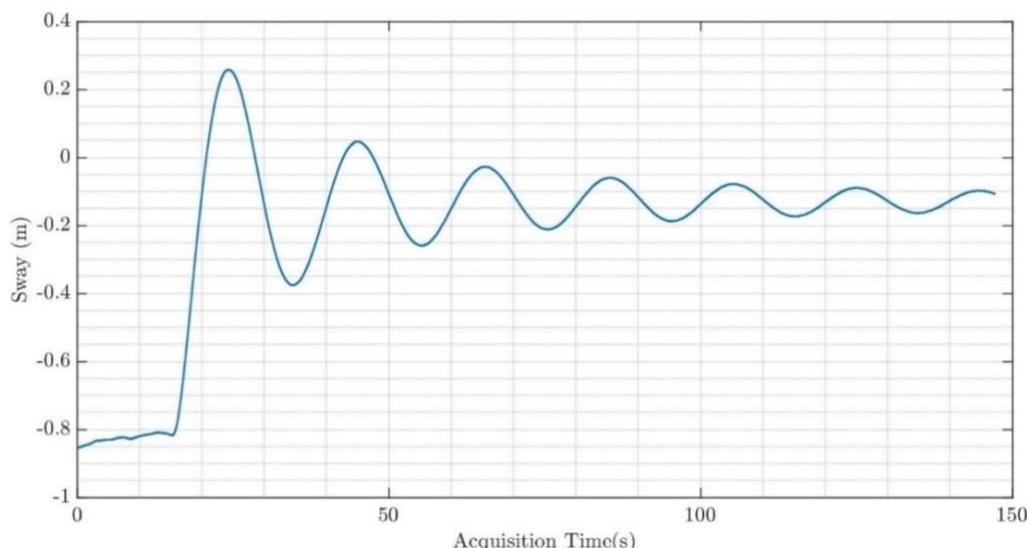


FIGURA 4.7. MOTO A SWAY CON ORMEGGIO

Da Figura 4.3 a Figura 4.7 è presentata la storia temporale dello spostamento libero del dispositivo eccitato da un impulso nel caso con ormeggio. Si può notare che il decadimento del moto segue un andamento logaritmico decrescente e non presenta irregolarità per il moto nei gradi di libertà Pitch, Yaw, Surge e Sway. Nel caso di moto a rollio, l'andamento logaritmico presenta delle oscillazioni dovute alla presenza del sistema di ormeggio, il quale contrasta il movimento del dispositivo e muovendosi causa la riflessione di alcune onde che vanno a disturbare il moto a rollio.

4.2 Pull-out delle celle di carico sul sistema di ormeggio

In questo paragrafo sono riportati i risultati dell'analisi sui carichi dell'ormeggio agenti sul dispositivo, registrati dalle celle di carico per i moti a Surge e Sway. Il test prevede che il prototipo, a partire dal suo punto di equilibrio, venga trascinato lungo la lunghezza della vasca in modo da sollecitare le celle di carico fino al raggiungimento del massimo allungamento delle linee di ormeggio. Nel caso di pull-out per moto a Surge, con riferimento alla Figura 2.24, il prototipo viene trascinato lungo l'asse x in direzione negativa (ovvero verso la spiaggia della vasca prova) e tramite le linee di ormeggio a poppa che vanno a sollecitare le celle di carico LC1 e LC2. Nel caso per moto a Sway, il procedimento è analogo ma il device viene trascinato sull'asse y (sempre in direzione negativa) tramite le linee di ormeggio connesse alle le celle di carico LC1 e LC4. Nei grafici seguenti, i comportamenti in termini di carico delle linee di ormeggio di interesse sono rappresentati in funzione della distanza dall'origine del sistema di riferimento. Le coppie di celle di carico non sollecitate nelle due prove non sono state riportate nei rispettivi grafici.

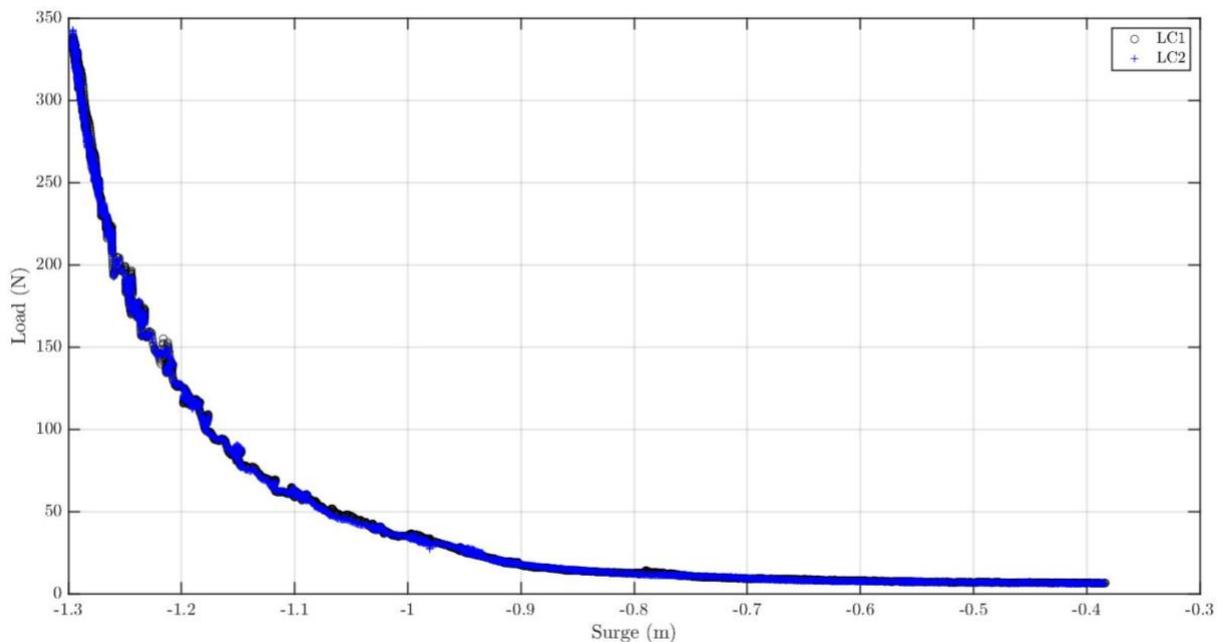


FIGURA 4.8. PULL-OUT CELLE DI CARICO A POPPA, MOTO A SURGE

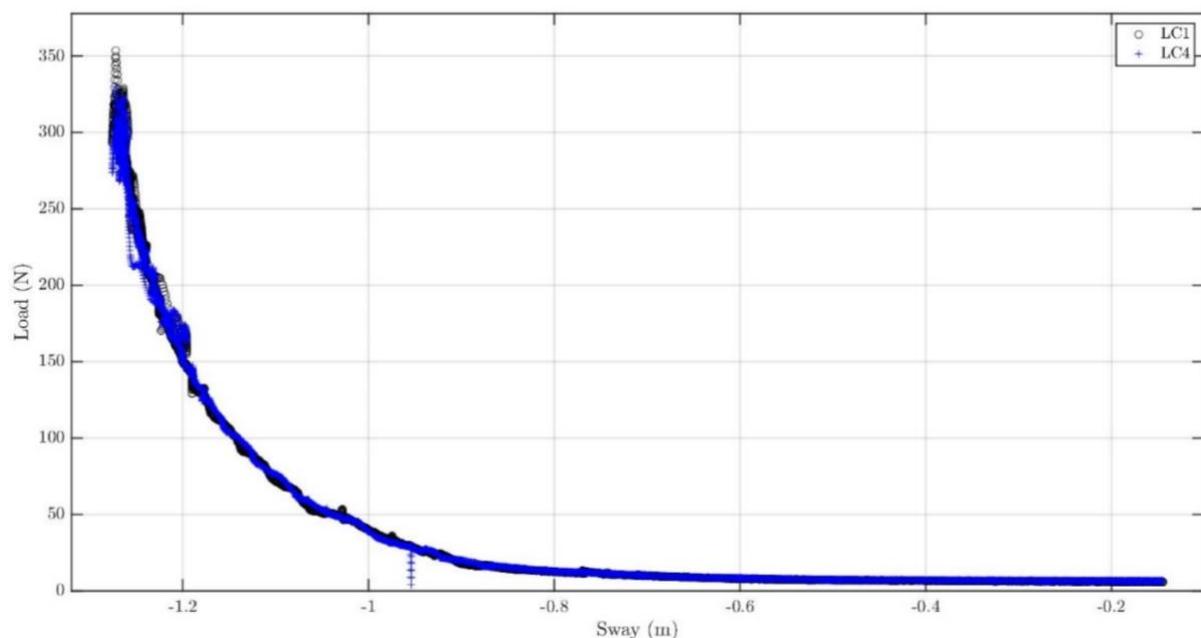


FIGURA 4.9. PULL-OUT CELLE DI CARICO A DESTRA, MOTO A SWAY

Dai grafici, è possibile notare l'andamento crescente della tensione all'aumentare (in modulo) della distanza dalla posizione di equilibrio, fino al raggiungimento dell'estensione massima delle linee di ormeggio, a -1.3 m dal centro del sistema di riferimento. È da notare, inoltre, il fatto che le prove di pull-out nelle due direzioni diano i medesimi risultati, dovuti alla simmetria del sistema di ormeggio progettato per le prove sperimentali.

4.3 Onde regolari

Il prototipo è stato testato in onde regolari con pendenza d'onda di 1/50 e 1/30 (onde già descritte nel paragrafo 2.1) per le configurazioni di ormeggio a 0°, 45° e 90°. In questo paragrafo è riportata la storia temporale di una delle prove con device in onda regolare (in particolare, un'onda di risonanza, con $T = 1.34$ s e $H = 5.6$ cm, con ormeggio a 0°). Nelle figure, sono riportati i grafici dell'andamento dello spostamento nei 6 gradi di libertà, dei carichi agenti sulle celle di

carico e dei sensori di pressione all'interno di un sottoinsieme di 20 secondi della prova, dopo che il sistema ha raggiunto la stazionarietà.

Nella Figura 4.10 è riportato un confronto tra il sistema motion capture off-board Qualysis e quello on-board MTI. I due sistemi, come è possibile notare dal confronto, danno letture pressoché identiche e per questo motivo si è scelto nei grafici di utilizzare solo una delle due letture (in particolare, quella del sistema Qualysis).

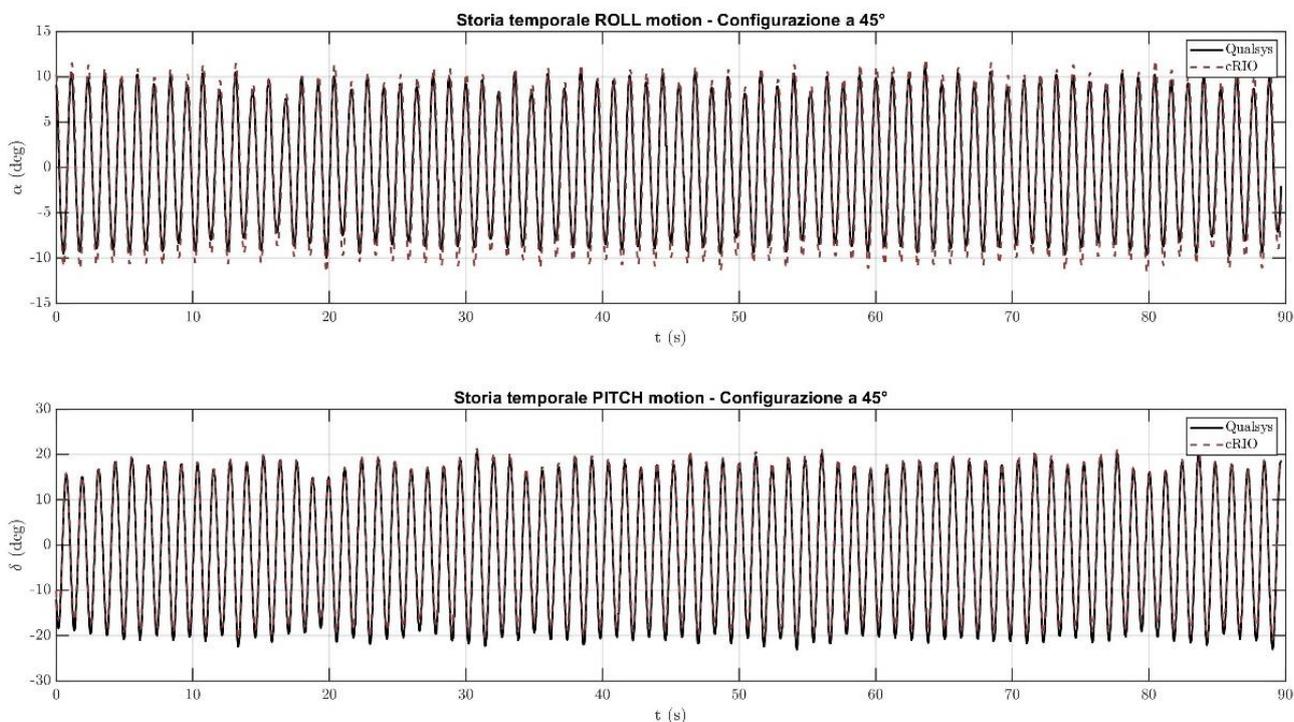


FIGURA 4.10. CONFRONTO SISTEMI DI ACQUISIZIONE CRIO E QUALISYS PER STORIA TEMPORALE A ROLL E A PITCH NELLA CONFIGURAZIONE A 45°

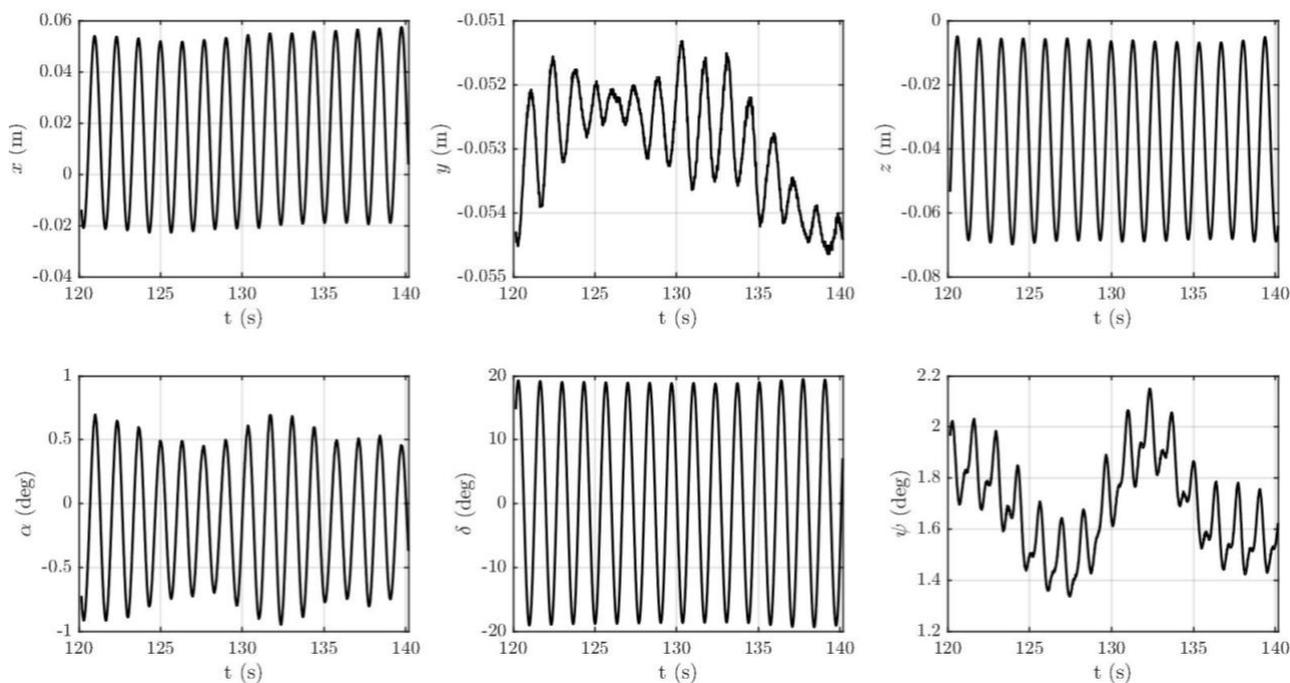


FIGURA 4.11. STORIA TEMPORALE DELLO SPOSTAMENTO NEI 6 DOF. ONDA REGOLARE DI RISONANZA

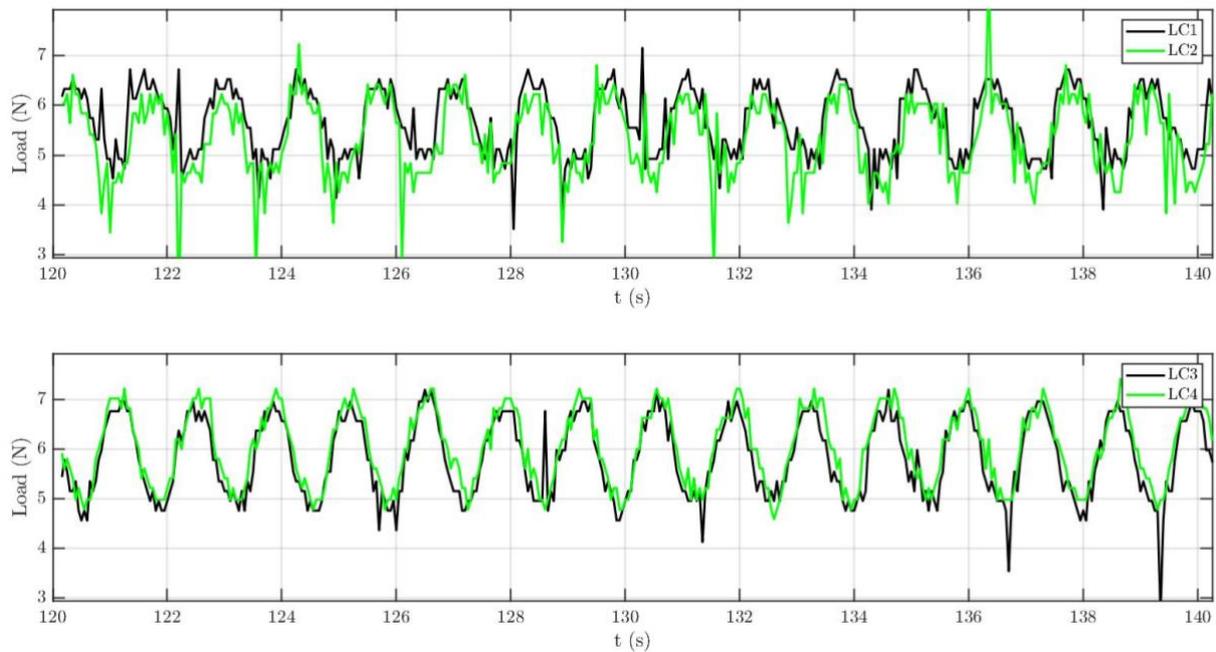


FIGURA 4.12. STORIA TEMPORALE DEI CARICHI AGENTI SULLE LINEE DELL'ORMEGGIO. ONDA REGOLARE DI RISONANZA

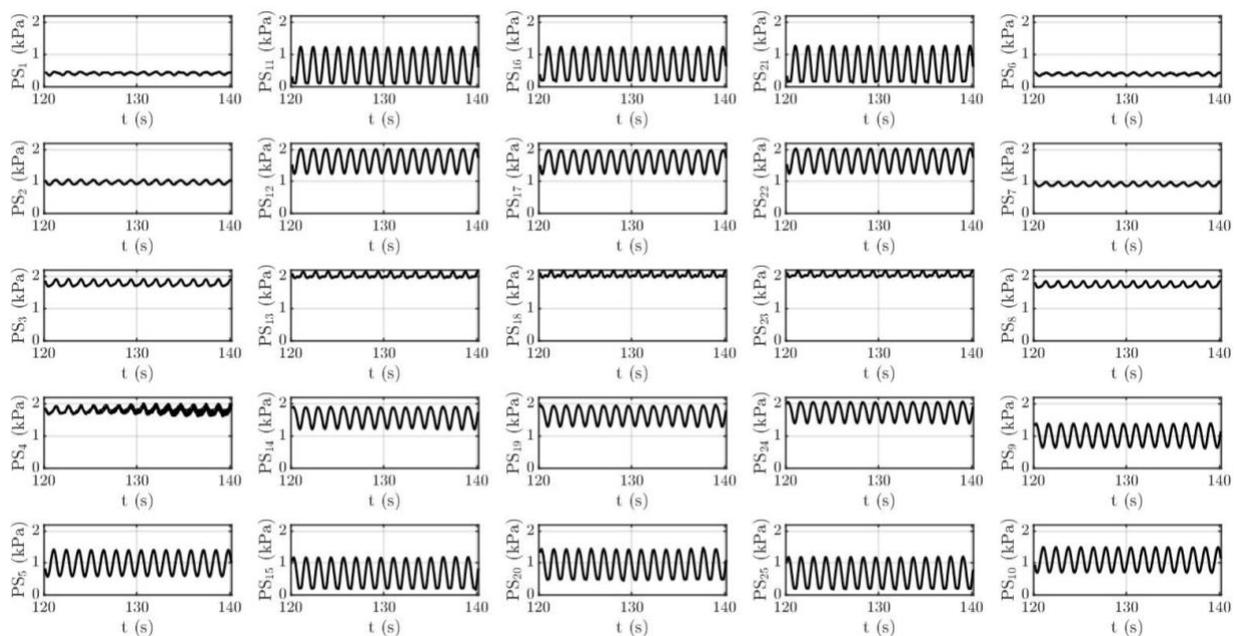


FIGURA 4.13. STORIA TEMPORALE DELLE PRESSIONI SULLA SUPERFICIE DELLO SCAFO. ONDA REGOLARE DI RISONANZA

Il comportamento dei sensori di pressione segue le previsioni: i sensori sulla linea centrale della curva (PS13, PS18, PS23) hanno un valore medio di pressione più alto e minori variazioni nel tempo, perché la loro posizione rimane più stabile durante le oscillazioni a Pitch. Man mano che si sale, seguendo la curvatura della culla verso la coperta, le pressioni registrate presentano oscillazioni più ampie, e valori medi più bassi per via della minore pressione idrostatica. Le pressioni sulle facciate laterali, inoltre, possono essere divise in due sottogruppi: quelle lungo l'asse di simmetria della facciata (PS1, PS2, PS3 sulla facciata sinistra e PS6, PS7, PS8 sulla facciata destra) non sono sensibili agli spostamenti di beccheggio; perciò, hanno variazioni basse e pressioni medie più alte mano a mano che aumenta la profondità. I sensori esterni, invece (PS5 a sinistra, PS9 e PS10 a destra) presentano oscillazioni più accentuate. Dai sensori PS9 e PS10, infine, è possibile notare il fatto che i loro andamenti temporali sono in controfase, essendo simmetrici rispetto all'asse verticale della facciata. Nota: durante i test sperimentali, il sensore di pressione PS4 (facciata laterale sinistra del dispositivo) ha subito un guasto. Grazie alla ridondanza di sensori applicati non è stato necessario smontare il prototipo

per sostituirlo, tuttavia per questo motivo in Figura 4.13 e nelle acquisizioni di pressione riportate nei paragrafi successivi, non bisogna considerare validi i dati ottenuti da tale sensore.

4.4 Onde irregolari

Il dispositivo è stato poi testato in varie onde irregolari, (Paragrafo 2.1). In particolare, in questo paragrafo è riportata l'onda irregolare con periodo più vicino alla risonanza, con $T_p = 1.33$ s e $H_s = 4.5$ cm. Rispetto alle onde regolari, si è preferito riportare in questo caso una storia temporale più estesa in modo tale da poter apprezzare meglio l'andamento irregolare degli andamenti delle varie grandezze acquisite.

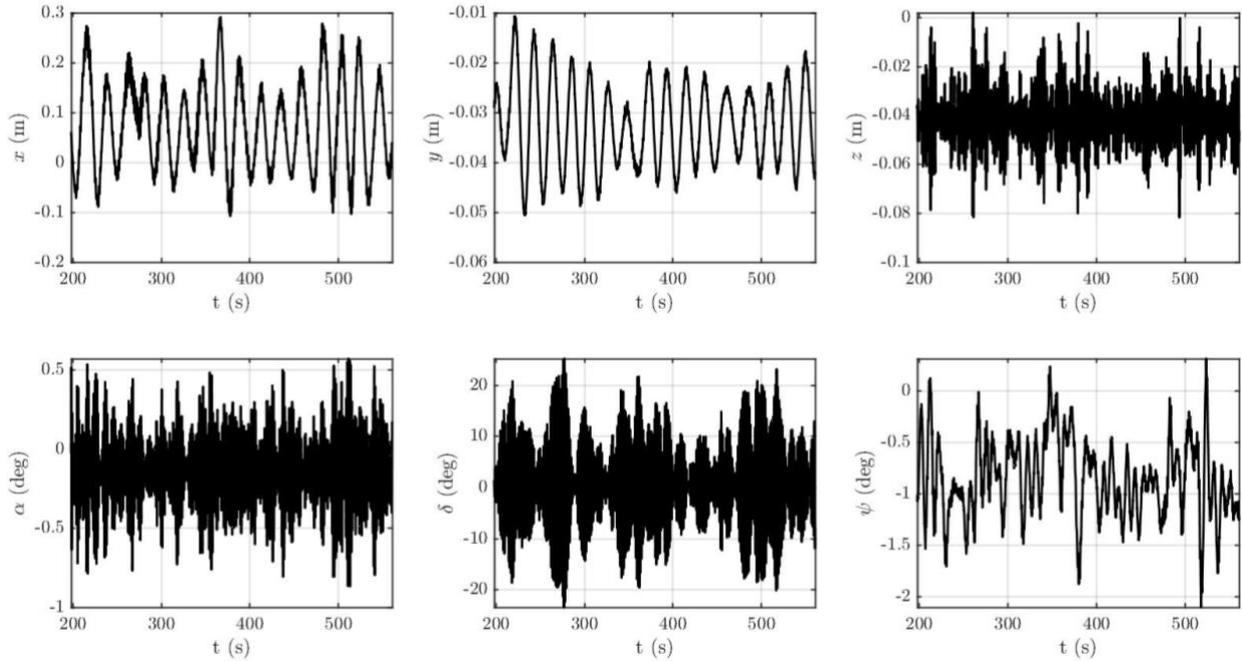


FIGURA 4.14. STORIA TEMPORALE DELLO SPOSTAMENTO NEI 6 DOF. ONDA IRREGOLARE DI RISONANZA

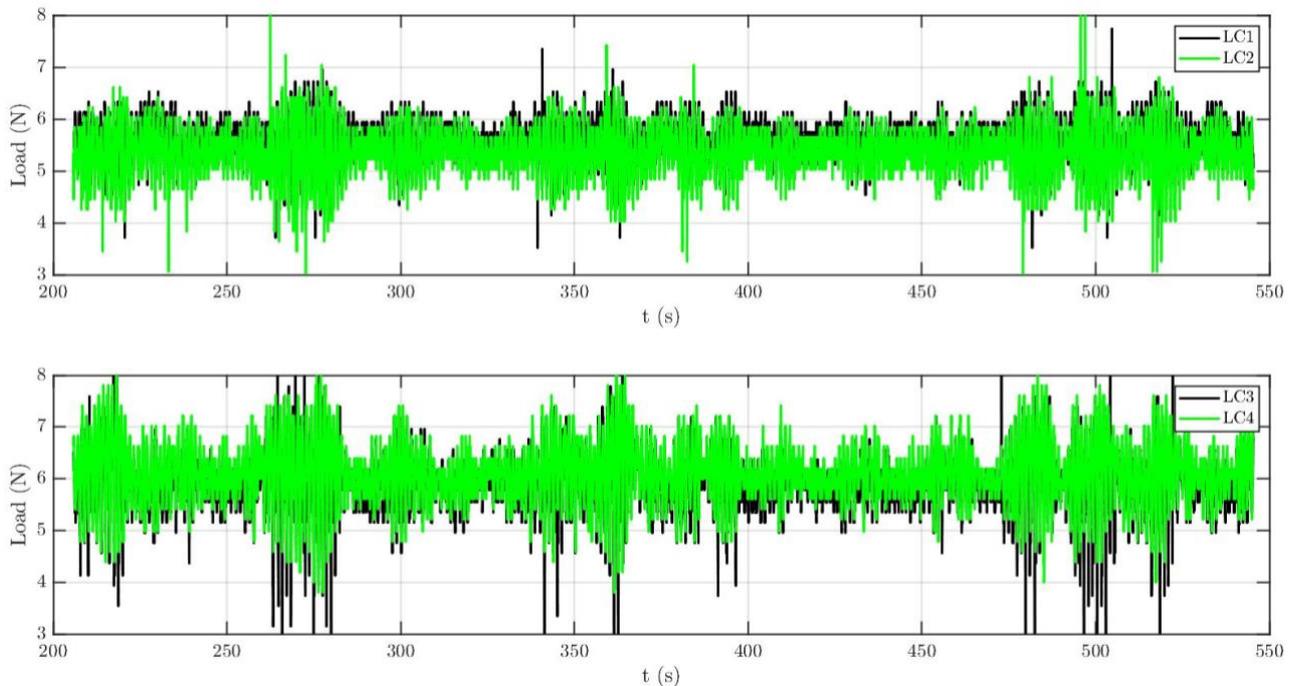


FIGURA 4.15. STORIA TEMPORALE DEI CARICHI AGENTI SULLE LINEE DELL'ORMEGGIO. ONDA IRREGOLARE DI RISONANZA

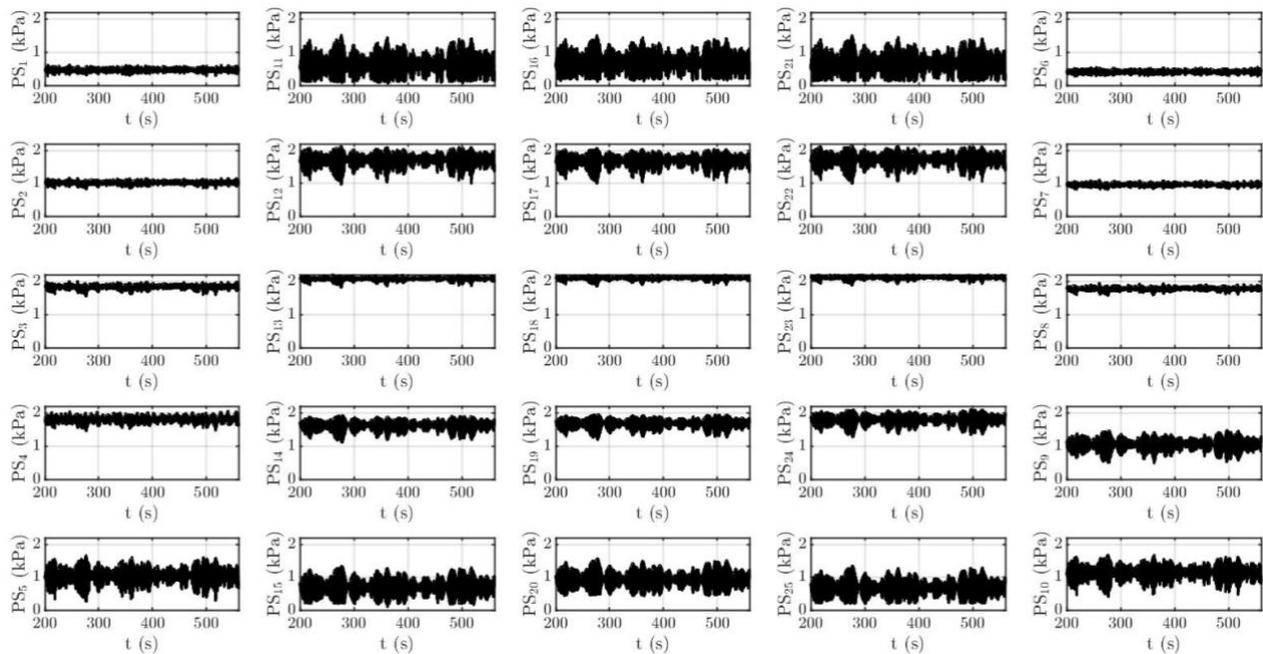


FIGURA 4.16. STORIA TEMPORALE DELLE PRESSIONI SULLA SUPERFICIE DELLO SCAFO. ONDA IRREGOLARE DI RISONANZA

4.5 Onde severe ed estreme

Si è poi passati a testare il dispositivo in onde severe, regolari e irregolari. Nota: nei grafici di onda severa sono state inserite anche le acquisizioni dei due sensori di pressione di trigger (PS28 e PS27, rispettivamente a prua e poppa). In sostanza, questi due trasduttori sono stati utilizzati per identificare gli istanti in cui la coperta del dispositivo viene sommerso dall'acqua (situazione riconoscibile per i conseguenti spike di pressione).

4.5.1 Regolari severe

La prova riportata nelle seguenti Figure è un'onda regolare severa, con $T = 1.2$ s e $H_{\text{target}} = 28$ cm. In onda severa non si è potuto superare il valore di altezza dell'onda $H_{\text{exp}} = 23.3$ cm per le questioni descritte precedentemente.

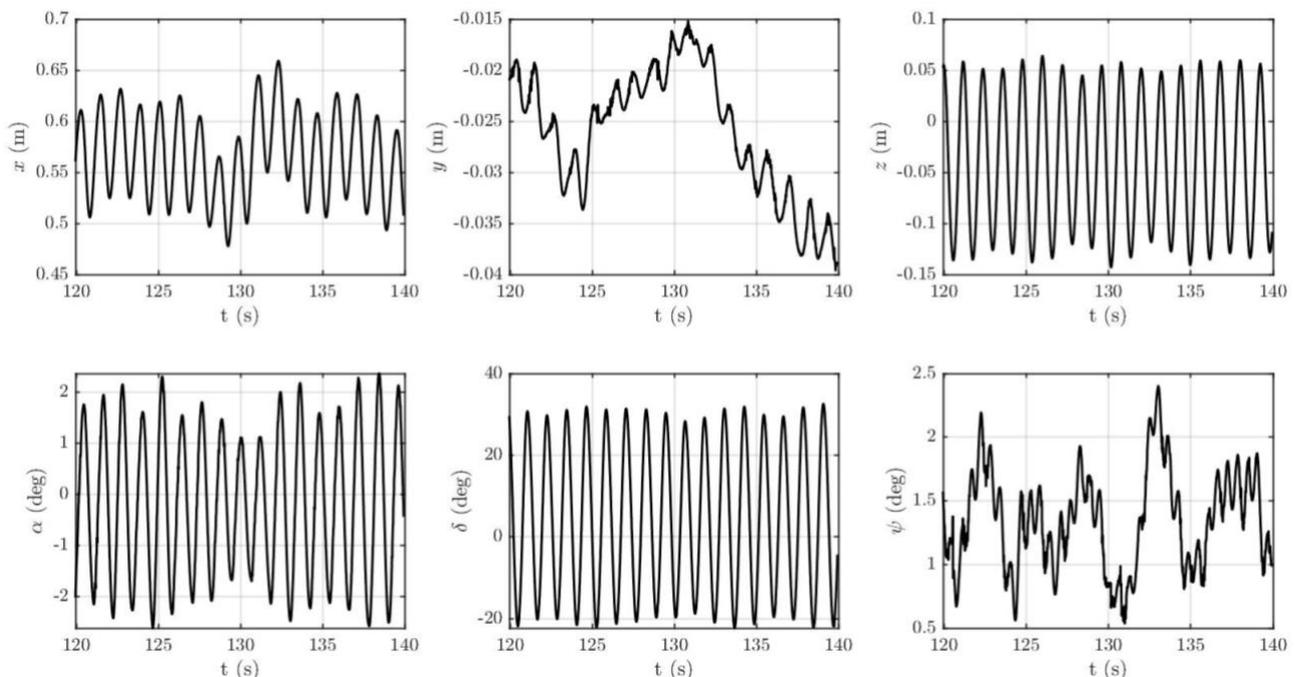


FIGURA 4.17. STORIA TEMPORALE DELLO SPOSTAMENTO NEI 6 DOF. ONDA REGOLARE SEVERA

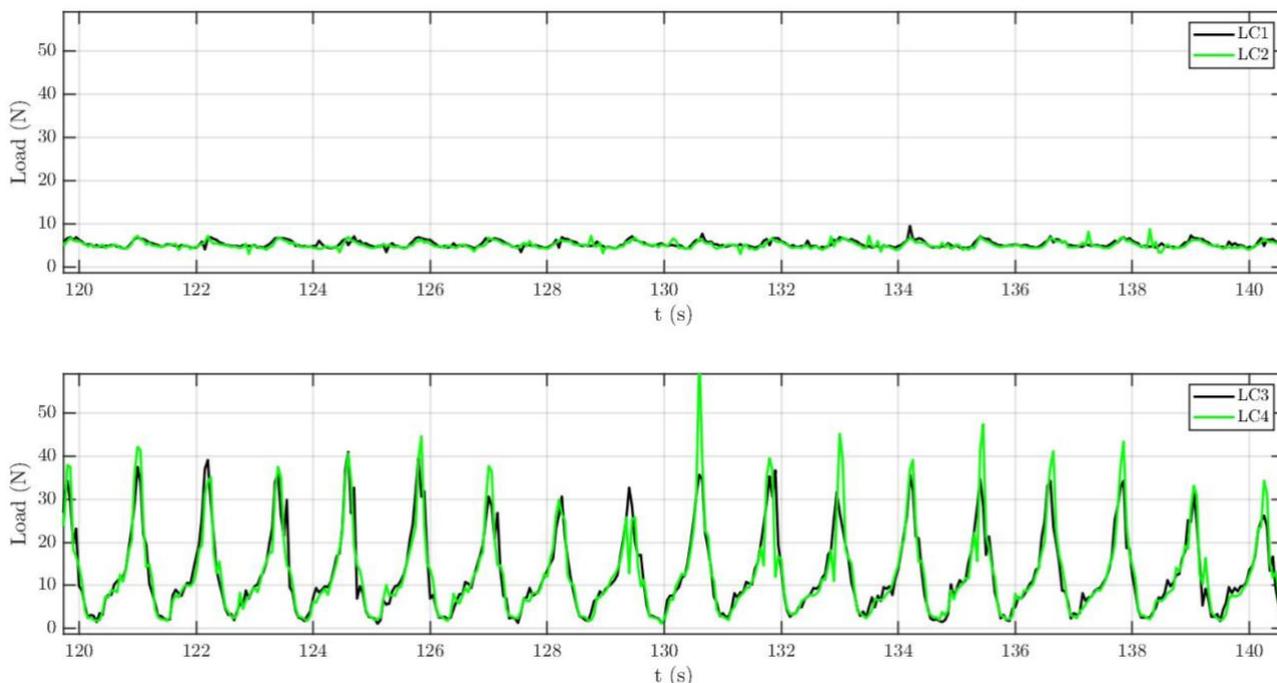


FIGURA 4.18. STORIA TEMPORALE DEI CARICHI AGENTI SULLE LINEE DELL'ORMEGGIO. ONDA REGOLARE SEVERA

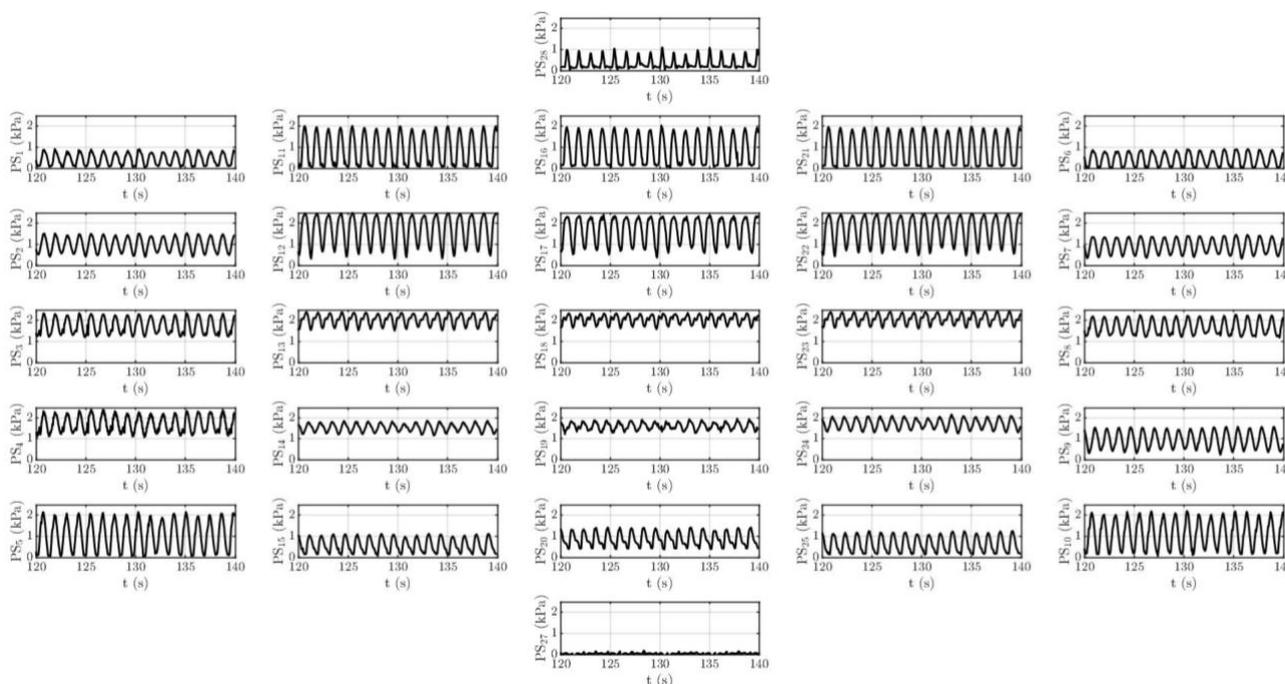


FIGURA 4.19. STORIA TEMPORALE DELLE PRESSIONI SULLA SUPERFICIE DELLO SCAFO. ONDA REGOLARE SEVERA

Rispetto alle prove in onda operativa, è possibile notare i picchi nei carichi alle linee di ormeggio di prua (celle di carico LC3 ed LC4), che arrivano a superare i 60 N.

4.5.2 Irregolari estreme

La prova in onda estrema irregolare qui riportata è caratterizzata da $T_e = 1.2$, $H_s = 16.76$ cm. Per questa situazione sono stati generati quattro semi (cioè realizzazioni temporali d'onda diverse, ma con le stesse proprietà statistiche), e il dispositivo è stato testato in ciascuno di questi casi.

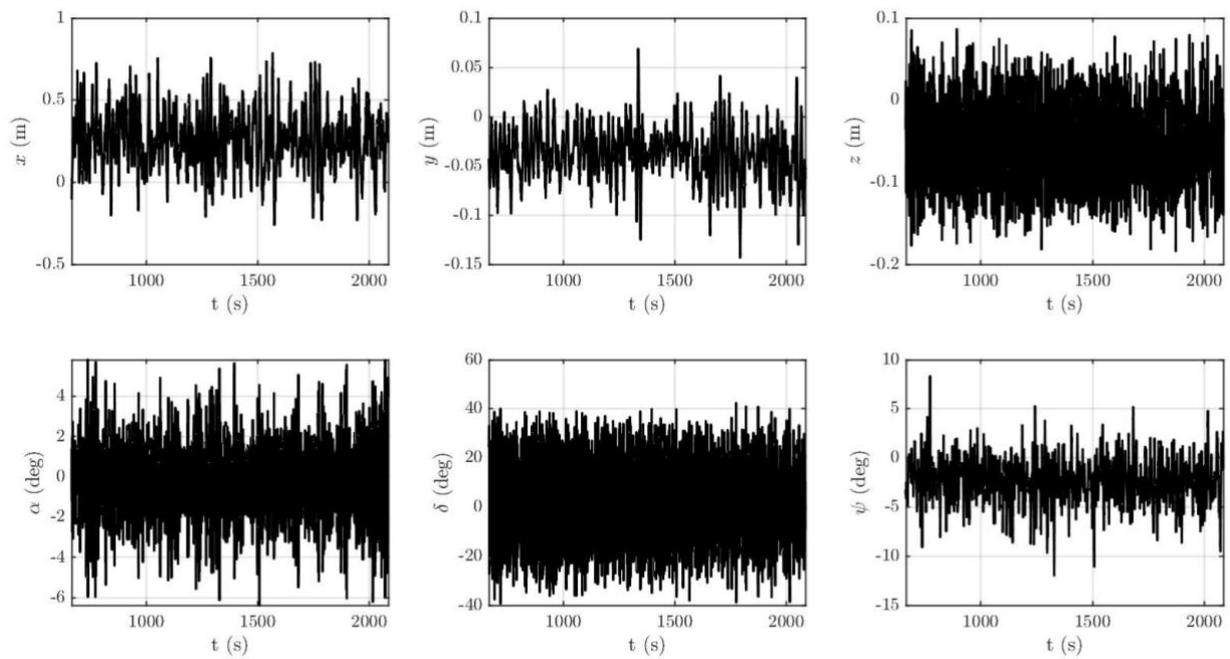


FIGURA 4.20. STORIA TEMPORALE DELLO SPOSTAMENTO NEI 6 DOF. ONDA IRREGOLARE SEVERA

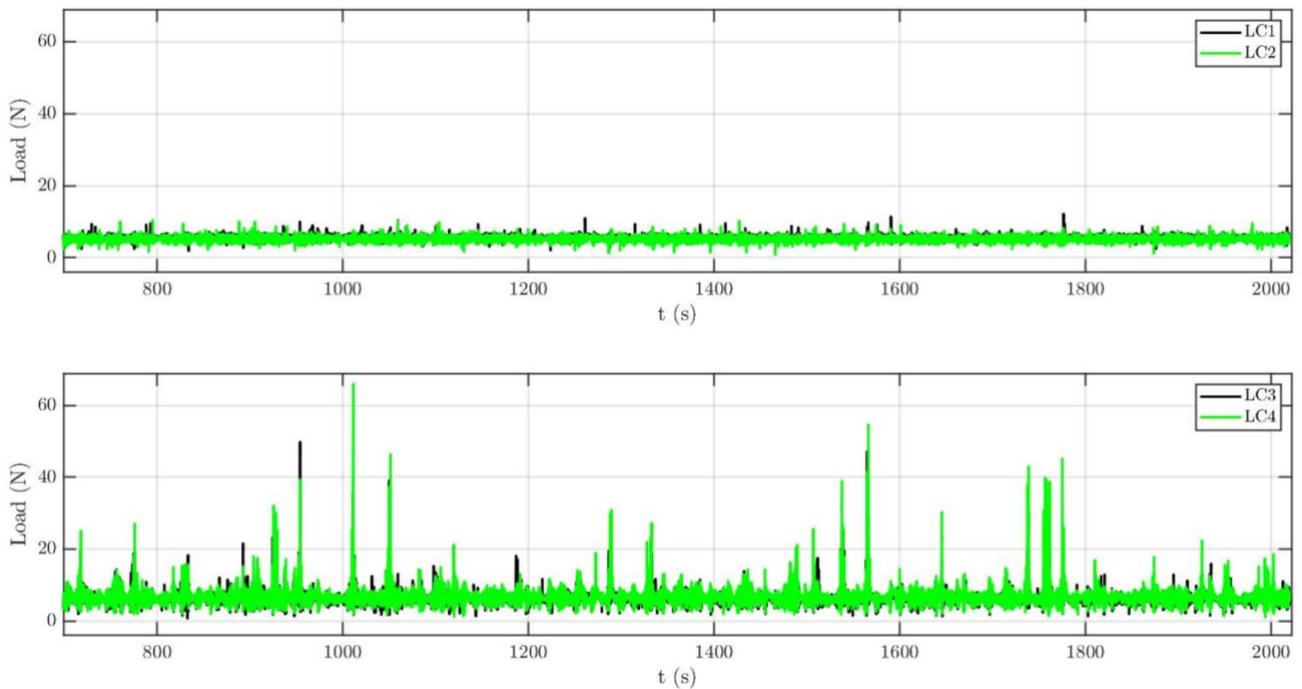


FIGURA 4.21. STORIA TEMPORALE DEI CARICHI AGENTI SULLE LINEE DELL'ORMEGGIO. ONDA IRREGOLARE SEVERA

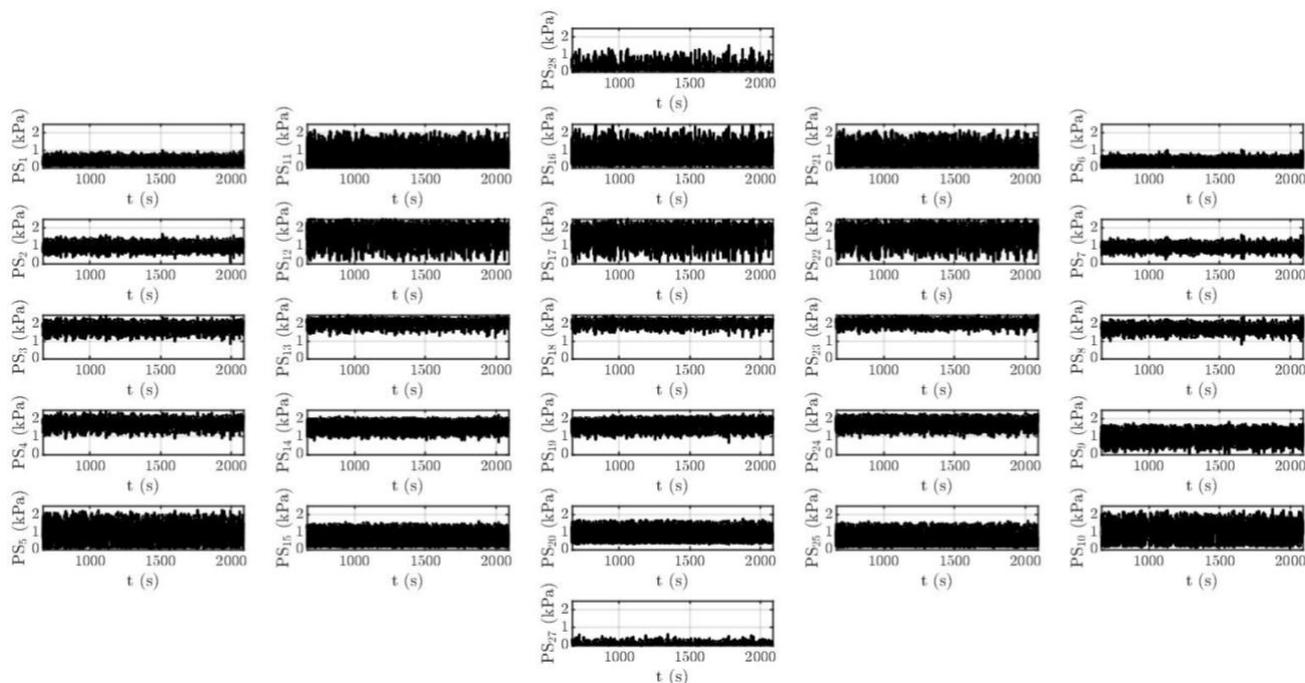


FIGURA 4.22. STORIA TEMPORALE DELLE PRESSIONI SULLA SUPERFICIE DELLO SCAFO. ONDA IRREGOLARE SEVERA

4.6 Densità spettrali

In questo capitolo vengo presentati i risultati ottenuti applicando il metodo P-Welch (average periodogram) per la stima della densità di potenza dello spettro (Power Spectrum Density, PSD). L’onda di riferimento è l’onda irregolare con periodo più vicino al periodo di risonanza, caratterizzata da $T_p = 1.33$ s e $H_s = 4.5$ cm. I risultati si riferiscono alla configurazione dell’ormeggio a 0° .

Come da aspettative, in Figura 4.23 i moti a Roll e a Pitch e Heave presentano la frequenza di picco nella vicina corrispondenza della frequenza naturale. I moti di Surge, Sway e Yaw presentano una frequenza di picco inferiore rispetto alla frequenza naturale del dispositivo. Questo perché, in accordo con le rispettive RAOs, questi sono moti a bassa frequenza.

In Figura 4.24 viene confrontata la PSD del moto a Heave con lo spettro teorico e sperimentale della stessa onda ma in condizioni indisturbate, cioè valutata nelle prove a vuoto senza il dispositivo. In accordo con il RAO a Heave, l’andamento della PSD a Heave segue lo spettro dell’onda a basse frequenze e presenta la stessa frequenza di picco nei tre casi.

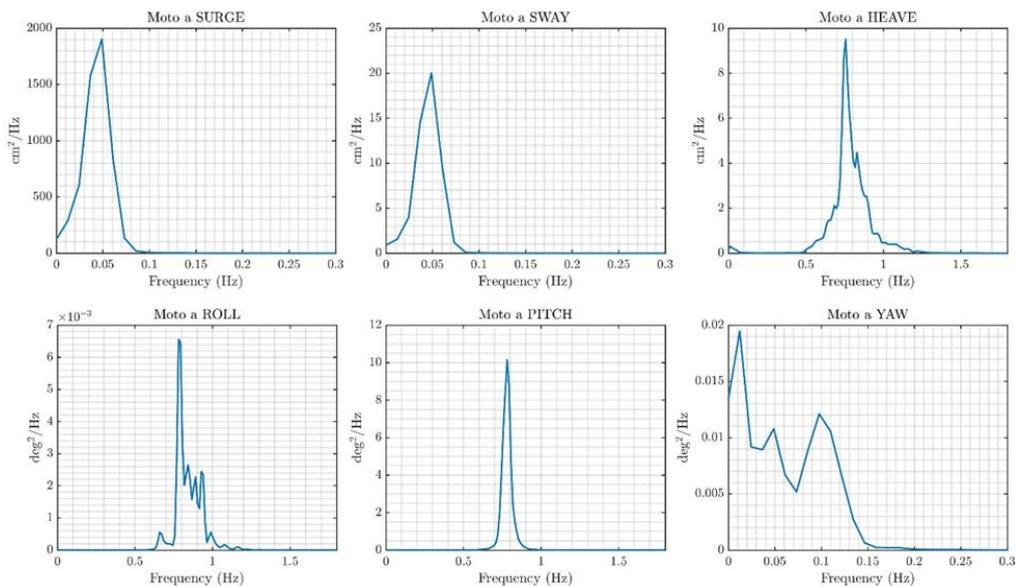


FIGURA 4.23. P-WELCH PSD DEI 6 DOF

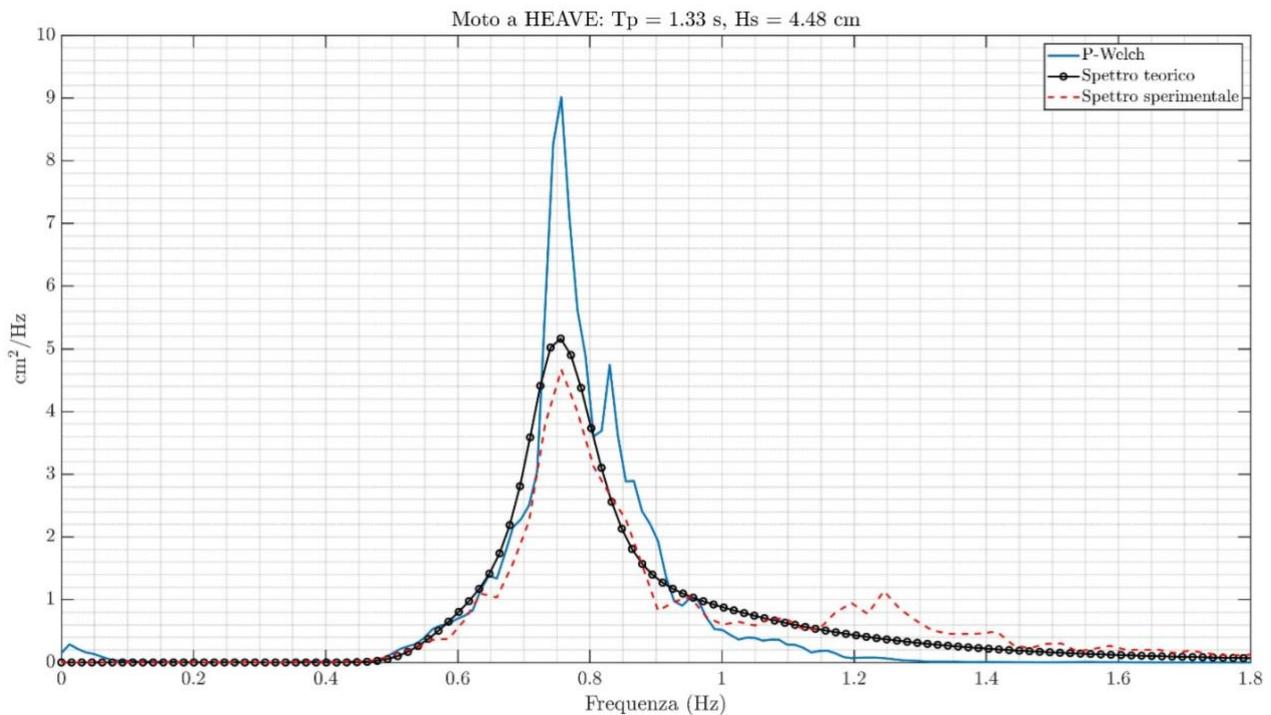


FIGURA 4.24. CONFRONTO PSD A HEAVE CON SPETTRO TEORICO E SPERIMENTALE DELL'ONDA DI RISONANZA INDISTURBATA

4.7 Response Amplitude Operators (RAOs)

4.7.1 Regolari con ormeggio

Nel seguente paragrafo vengono presentati i risultati relativi alla risposta in ampiezza a Pitch del dispositivo. La RAO (Response Amplitude Operator) sperimentale è calcolata attraverso la seguente formula:

$$RAO_i = \frac{\eta_i}{A}$$

dove i rappresenta il grado di libertà i -esimo, η_i è l'ampiezza di moto e A è l'ampiezza d'onda che incontra il prototipo. In questo caso vengono riportate in Figura 4.25 e in Figura 4.26, i RAO a Pitch per pendenza d'onda 1:30 e 1:50. Come si può notare, il sistema Qualisys e il cRIO si sovrappongono completamente.

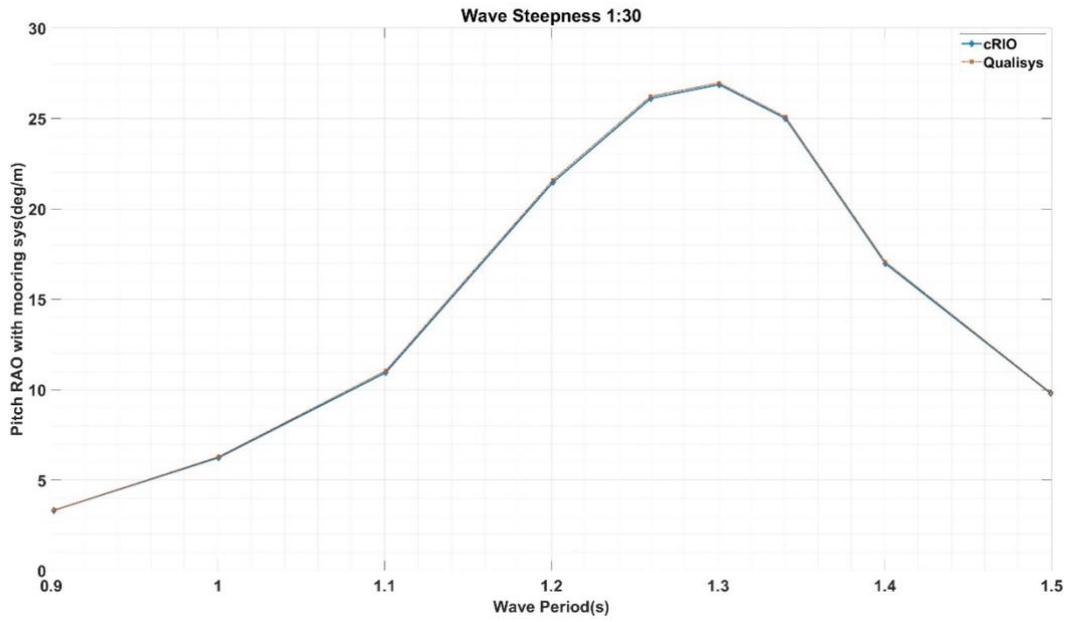


FIGURA 4.25. RAO A PITCH. CONFIGURAZIONE A 0° STEEPNESS 1:30.

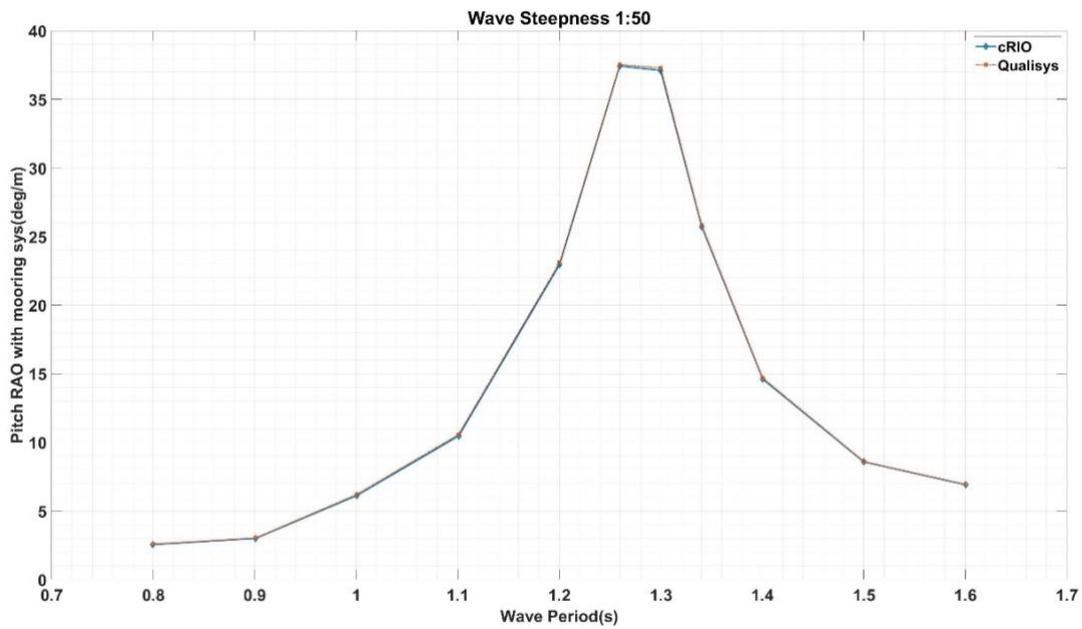


FIGURA 4.26. RAO A PITCH. CONFIGURAZIONE A 0° STEEPNESS 1:50.

5 Conclusioni

Nel presente report è stata descritta la prototipazione ed esecuzione della campagna sperimentale del dispositivo PeWEC. A partire dai dati del dispositivo al vero tutti i dati geometrici ed inerziali sono stati scalati per la costruzione del prototipo. È stato descritto nel dettaglio il setup sperimentale a partire dalla realizzazione meccanica dei vari sottosistemi fino alla definizione dei trasduttori bordo vasca e installati sul dispositivo e relativa architettura di acquisizione dei segnali. Sono state effettuate prove a decadimento libero con e senza ormeggio per la determinazione dei periodi di risonanza e smorzamento e prove di pullout per la determinazione della caratteristica statica dell'ormeggio. Tutte le onde di test sono state acquisite anche a vuoto in assenza del dispositivo per avere il dato di input per la validazione successiva dei modelli. Il dispositivo è stato testato in condizioni di onde regolari e irregolari a diversi periodi ed ampiezze per caratterizzare la dinamica e funzionamento del dispositivo in condizioni operative e severe. I dati sperimentali verranno poi adoperati nell'attività LA 1.20 per la validazione dei modelli numerici adottati per la progettazione del dispositivo.

6 Bibliografia

- [1] Politecnico di Torino, «PAR2019-2021-MISE, Deliverable LA1.14: Progettazione della campagna sperimentale».
- [2] Politecnico di Torino, «PAR2019-2021-MISE, Deliverable LA1.12: Sviluppo di algoritmi genetici per la progettazione del convertitore,» 2019.
- [3] Politecnico di Torino, «PAR2019-2021-MISE, Deliverable LA1.13: Implementazione in ambiente CFD del convertitore,» 2020.
- [4] Politecnico di Torino, «PAR2019-2021-MISE, Deliverable LA1.5: Analisi dei requisiti progettuali e normativi per Wave Energy Converters».
- [5] «<http://www.dii.unina.it/page.php?idlivello=125&tabella=livello2&flag=pagina>,» [Online]. Available: <http://www.dii.unina.it/page.php?idlivello=125&tabella=livello2&flag=pagina>. [Consultato il giorno 16 12 21].
- [6] «https://www.qualisys.com/?gclid=Cj0KCQiA5OuNBhCRARIsACgaiqUEDPC_9dmm09SXAW1Xbi5Oc-h2p7vD-US1YkJf0VmrCh1Q0CjIAaAp5PEALw_wcB,» [Online]. [Consultato il giorno 01 12 21].
- [7] DNV - DNVGL-OS-E301 - Edition July 2018 - Position mooring, [Online]. Available: <http://rules.dnvgl.com/docs/pdf/dnvgl/os/2018-07/dnvgl-os-e301.pdf>.
- [8] L. J. J. W. Mooring systems for wave energy converters: A review of design issues and choices - Robert E. Harris. [Online].
- [9] A. F. a. J. P. K. Comparison and Sensitivity Investigations of a CALM and SALM Type Mooring System for Wave Energy Converters - Arthur Pecher. [Online].
- [10] L. M. M. C. Screening of suitable mooring systems - Barbara Zanuttigh. [Online].
- [11] National Instrument, «NI Official Website,» [Online]. Available: <https://www.ni.com/it-it/shop/compactrio.html>. [Consultato il giorno 21 03 22].
- [12] National Instrument, «NI Official Website,» [Online]. Available: <https://www.ni.com/it-it/shop/software/products/labview.html>. [Consultato il giorno 16 12 21].
- [13] Xsens, «<https://www.xsens.com/products/mti-10-series>,» [Online]. Available: <https://www.xsens.com/products/mti-10-series>. [Consultato il giorno 16 12 21].
- [14] G. Pisacane, G. Sannino e A. Carillo, «Marine Energy Exploitation in the Mediterranean Region: Steps Forward and Challenges,» *Enrgy Research*, 2018.
- [15] Cummins, «The impulse response function and ship motions,» *Technical Report 1661, Department of the Navy,*, 1962.
- [16] D. Babarit, «Theoretical and numerical aspects of the open source BEM solver,» *In Proceedings of the 11th European Wave and Tidal Energy Conference*, 2015.
- [17] Ogilvie, «Recent progress toward the understanding and the prediction of ship motion,» *In Proceedings of the 5th Symposium on Naval Hydrodynamics*, 1964.
- [18] F. Perez, «Time- vs. frequency-domain identification of paraparametric radiation force models for marine structures at zero speed,» *Modeling, Identification and Control: A Norwegian Research Bulletin*, p. 29(1):1–19, 2008.
- [19] smartisland, «<http://www.smartisland.eu/replicabilita/pantelleria.html>,» [Online].

- [20] Comune di Pantelleria, «Piano d'azione per l'energia sostenibile,» 2015.
- [21] N. Pozzi, *Numerical Modeling and Experimental Testing of a Pendulum Wave Energy Converter (PeWEC)*, Torino, Italia, 2018.
- [22] W. Cummins, «The Impulse Response Function and Ship Motions,» *Schiffstechnik*, pp. 101-109, 1962.
- [23] B. Kouvaritakis e M. Cannon, *Model Predictive Control: Classical, Robust and Stochastic*, Advanced Textbooks in Control and Signal Processing, Springer, 2015.
- [24] J. B. Rawlings e D. Q. Mayne, *Model Predictive Control: Theory and Design*, Nob Hill Publishing, 2009.
- [25] M. Mammarella, E. Capello, H. Park, G. Guglieri e M. Romano, «Tube-Based Robust Model Predictive Control for Spacecraft Proximity Operations in the Presence of Persistent Disturbance,» *Aerospace Science and Technology*, 2018.
- [26] M. Mammarella e E. Capello, «A Robust MPC-based autopilot for mini UAVs,» *International Conference of Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pp. 1227-1235, 2018.
- [27] L. Busoniu, R. Babuska, B. De Schutter e D. Ernst, *Reinforcement Learning and Dynamic Programming Using Function Approximators*, CRC Press, 2010.
- [28] E. c. a. e. l. O. 2. [01] Recommended practice DNV-rp-c205. [Online]. Available: <https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/dnv/codes/docs/2010-10/rp-c205.pdf>.
- [29] [. [06] http://www.ilbelconcorso.it/webfm_send/63. [Online].
- [30] B. -. (. [08] Hydrodynamic analysis and mooring design of a floating pitching Wave Energy Converter / Passione. [Online].
- [31] t. a. o. w. c. c. -. 2. D. r. f. m. e. s. [05] IEC IECTS62600-2 - Edition1.0 2016-08 - TECHNICALSPECIFICATION - Marine energy –Wave. [Online].
- [32] [10] Report RdS/PAR2014/228, [Online]. Available: https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/energia-dal-mare/2014/rds-par2014-228.pdf.
- [33] [11] Report RdS/PAR2013/172, [Online]. Available: https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/energia-dal-mare/2013/rds-par2013-172.pdf.
- [34] P. d. Torino, «LA 1.14 - Progettazione della campagna sperimentale,» 2020.