



Ricerca di Sistema elettrico

Validazione del layout del prototipo PEWEC

F. Niosi, B. Paduano, S. Sirigu, G. Bracco, G. Mattiazzo



Report RdS/PTR(2021)/355

LA1.20: Validazione del layout del prototipo PEWEC

F. Niosi, B. Paduano, S. Sirigu, G. Bracco, G. Mattiazzo

Febbraio 2022

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero della Transizione Ecologica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità 2021

Obiettivo: *Tecnologie*

Progetto: "1.8 Energia elettrica dal mare"

Linea di attività: LA1.20: Validazione del layout del prototipo

Responsabile del Progetto: 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

Indice

SOMMARIO	6
1 INTRODUZIONE.....	6
2 SETUP DEL MODELLO NUMERICO.....	7
2.1 MODELLO ORCAFLEX.....	8
2.2 MODELLO STAR CCM+.....	11
3 CONFRONTO DATI SPERIMENTALI E SIMULAZIONE.....	12
3.1 FREE DECAY.....	12
3.2 ONDE OPERATIVE REGOLARI.....	15
<i>Cinematica</i>	16
<i>Carichi ormeggio</i>	19
3.3 ONDE OPERATIVE IRREGOLARI.....	21
<i>Cinematica</i>	21
<i>Carichi ormeggio</i>	24
3.4 ONDA ESTREMA REGOLARE.....	27
3.5 ONDA ESTREMA IRREGOLARE.....	28
<i>Cinematica</i>	28
<i>Carichi ormeggio</i>	31
4 CONCLUSIONI.....	34
5 BIBLIOGRAFIA.....	35
6 APPENDICE.....	35
SOMMARIO	6
1 INTRODUZIONE.....	6
2 SETUP DEL MODELLO NUMERICO.....	7
2.1 MODELLO ORCAFLEX.....	8
2.2 MODELLO STAR CCM+.....	11
3 CONFRONTO DATI SPERIMENTALI E SIMULAZIONE.....	12
3.1 FREE DECAY.....	12
3.2 ONDE OPERATIVE REGOLARI.....	15
<i>Cinematica</i>	16
<i>Carichi ormeggio</i>	19
3.3 ONDE OPERATIVE IRREGOLARI.....	21
<i>Cinematica</i>	21
<i>Carichi ormeggio</i>	24

3.4	ONDA ESTREMA REGOLARE	27
3.5	ONDA ESTREMA IRREGOLARE	28
	<i>Cinematica</i>	28
	<i>Carichi ormeggio</i>	31
4	CONCLUSIONI	34
5	BIBLIOGRAFIA	35
6	APPENDICE.....	35

Lista delle figure

Figura 1-Prototipo vs modello full-scale: confronto tra grandezze geometriche e inerziali	7
Figura 2- Prototipo vs modello full-scale: confronto tra le lunghezze dei tratti delle linee	7
Figura 3 – Rappresentazione grafica dei tratti di linee indicati nelle figure precedenti.....	8
Figura 4- caratteristiche degli attachments delle linee d’ormeggio e lunghezze delle diverse tipologie di catene utilizzate su ciascuna linea d’ormeggio.....	9
Figura 5- caratteristiche delle diverse tipologia di catene utilizzate su ciascuna linea d’ormeggio.....	9
Figura 6-Vista dall’alto del setup sperimentale	10
Figura 7-Vista dall’alto del setup del modello Orcaflex	10
Figura 8-Spettro sperimentale Onda Irregolare Irr01	11
Figura 9- modello CFD: soluzione del campo di pressione ad un istante di tempo fissato	12
Figura 10- Moto di beccheggio in CFD e Sperimentale riportato in scala 1:1	13
Figura 11 -Moto di beccheggio in CFD e Sperimentale riportato in scala 1:1	14
Figura 12-Confronto Free Decay sperimentale e in ambiente CFD	14
Figura 13- Posizionamento delle wave probes, configurazione a vuoto	15
Figura 14- Posizionamento delle wave probes, configurazione con pewec installato	16
Figura 15- RAO a beccheggio (ripidità dell’onda 1:50): sperimentale vs Numerico	17
Figura 16- RAO a sussulto (ripidità dell’onda 1:50): sperimentale vs Numerico	17
Figura 17- RAO a beccheggio (ripidità dell’onda 1:30): sperimentale vs Numerico	18
Figura 18- RAO a sussulto (ripidità dell’onda 1:30): sperimentale vs Numerico	18
Figura 19- Pullout statico ormeggio: Sperimentale-Orcaflex-Moodyn	19
Figura 20- Acquisizione sperimentale delle tensioni sulle celle di carico 3 e 4	20
Figura 21- RAO Tensioni alle fairleads (ripidità dell’onda 1:50): sperimentale vs Numerico	20
Figura 22- RAO Tensioni alle fairleads (ripidità dell’onda 1:30): sperimentale vs Numerico	21
Figura 23- Storia temporale del moto di beccheggio: numerico vs sperimentale	22
Figura 24- RAO medio a beccheggio: Sperimentale vs modelli numerici	23
Figura 25-RAO medio a sussulto: Sperimentale vs modelli numerici	23
Figura 26- RAO medio ad abbrivio: Sperimentale vs modelli numerici	24
Figura 27- Esempio di campionamento tensione con Peak Over Treshold (POT) method.	25
Figura 28-Tensione alla fairlead 3 su Surge in funzione del periodo d’onda.....	26
Figura 29- MPM per l’onda irregolare 01.....	27
Figura 30-Pitch, Surge e tensioni alle fairleads in onda estrema regolare	28
Figura 31- PSD a beccheggio numerica vs sperimentale per la singola realizzazione e mediata sulle tre realizzazioni ...	29
Figura 32- PSD a beccheggio numerica vs sperimentale in funzione del periodo d’onda riportata in decibel	29
Figura 33- PSD a sussulto numerica vs sperimentale per la singola realizzazione e mediata sulle tre realizzazioni	30
Figura 34- PSD a sussulto numerica vs sperimentale in funzione del periodo d’onda riportata in decibel	30
Figura 35- PSD ad abbrivio numerica vs sperimentale per la singola realizzazione e mediata sulle tre realizzazioni	31
Figura 36- PSD ad abbrivio numerica vs sperimentale in funzione del periodo d’onda riportata in decibel	31
Figura 37- Massimo Più probabile per la realizzazione 1	32

Figura 38- Massimo Più probabile per la realizzazione 2.....	33
Figura 39- Massimo Più probabile per la realizzazione 3.....	33
Figura 40- MPM per l'onda irregolare 02.....	37
Figura 41- MPM per l'onda irregolare 03.....	37
Figura 42- MPM per l'onda irregolare 04.....	38
Figura 43- MPM per l'onda irregolare 05.....	38
Figura 44- MPM per l'onda irregolare 06.....	39
Figura 45- MPM per l'onda irregolare 07.....	39
Figura 46- MPM per l'onda irregolare 08.....	40

Sommario

In questo documento vengono riportate tutte le analisi indispensabili per una corretta validazione dei modelli numerici utilizzati per il design del PeWEC (Pendulum Wave Energy Converter). Tutti i risultati sperimentali riportati in questo documento, sono afferenti alla campagna sperimentale effettuata presso l'Università Federico II di Napoli durante i mesi di Ottobre e Novembre 2021. Il principale obiettivo della campagna è la validazione dei modelli considerando il layout d'ormeggio e la dinamica del dispositivo ottimizzato. I tre principali protagonisti del sistema per la produzione di energia dal moto ondoso sono lo scafo, il sistema d'ormeggio e il pendolo. Proprio il modello numerico del pendolo è stato oggetto della precedente collaborazione sul prototipo in scala 1:12 e perciò non verrà tenuto in considerazione in questa trattazione in quanto già validato. Per quanto riguarda scafo e sistema d'ormeggio invece, la loro progettazione è affidata a modelli numerici che necessitano di una validazione sperimentale in quanto molti coefficienti dipendono dalle condizioni di prova in cui si ritrova a lavorare la macchina. Per questo motivo è stata pianificata una campagna sperimentale utilizzando un prototipo in scala 1:25 e considerando Pantelleria come sito di installazione. Tutte le grandezze utilizzate durante tale campagna sono ottenute tramite scalatura dal modello "al vero", il cui scafo è ottimizzato per minimizzare l'LCOE e il cui sistema d'ormeggio è progettato per resistere agli eventi estremi e allo stesso tempo minimizzare l'impatto dello stesso ormeggio sulla produttività del WEC. Ovviamente, sia il design dello scafo, che quello dell'ormeggio, sono stati effettuati considerando Pantelleria come sito di installazione.

1 Introduzione

Nonostante lo sviluppo di modelli ad alta fedeltà sia ad oggi lo strumento maggiormente utilizzato per la verifica e progettazione dei WEC, è sempre fortemente consigliato validare tali modelli attraverso campagne sperimentali su modelli in scala. Partendo dai dati di progetto ottenuti dai modelli di ottimizzazione (inerzie, masse, geometria, configurazione sistema di ormeggio, etc....) è stato costruito un modello in scala 1:25 da testare nella vasca navale dell'Università Federico II di Napoli. Durante ogni operazione di costruzione del prototipo si aggiunge un'incertezza relativa alla metodologia di costruzione o legata agli strumenti utilizzati per la stessa. Per questo motivo, quando la prototipazione è terminata, è prassi misurare sperimentalmente tutte le grandezze di interesse. Come illustrato nel deliverable LA1-15 [1] sono state effettuate tutte le misure di inerzia e posizione del baricentro del prototipo e confrontate con quelle di design. Per effettuare la validazione dei modelli numerici vengono perciò utilizzate le grandezze misurate sperimentalmente up-scalate. In questo deliverable, cui focus è la validazione dei modelli numerici costruiti attraverso Orcaflex e Star-Ccm+, tutti i confronti del caso verranno effettuati in scala 1:1 riportando le grandezze acquisite da piccola a grande scala secondo le regole di scalatura riportate nel Deliverable LA1-15 [1]. Particolare attenzione è stata posta nella realizzazione del sistema di ormeggio sperimentale in cui piccole variazioni in termini di lunghezza o peso influenzano fortemente il comportamento del PeWEC.

In questo documento è presente la validazione dei modelli per diverse condizioni di funzionamento. Nella prima parte verranno brevemente descritti i set-up dei due modelli numerici realizzati rispettivamente con Orcaflex e Star-Ccm+. Con il primo verranno effettuate tutte le validazione delle prove statiche e dinamiche in condizioni sia operative che estreme con onde regolari e irregolari. Con il secondo modello invece le simulazioni dei modelli verranno messe a confronto con tre onde operative regolari e onda estrema regolare poiché il costo computazionale delle analisi CFD è non permette l'esecuzione di lunghe simulazioni in stato di mare irregolare. In CFD sono state inoltre svolte le simulazioni di Free-Decay per i gradi di libertà di rollio e beccheggio del dispositivo senza ormeggio.

La validazione dei modelli è relativa sia ai moti del dispositivo che alla tensione ai punti di attacco del sistema di ormeggio con il PeWEC stesso. I moti del dispositivo sono acquisiti sperimentalmente attraverso il sistema di acquisizione Qualisys (moti di traslazione e rotazione) e il sistema di acquisizione cRIO (solo rotazioni), sono riferiti al baricentro del dispositivo e confrontati con quelli ottenuti in Orcaflex e StarCcm+. Per quanto riguarda l'acquisizione delle tensioni delle linee d'ormeggio, esse sono acquisite attraverso le 4 celle di carico attaccate alle bitte del PeWEC. Per conformità con la lettura dei risultati della campagna sperimentale, nei modelli numerici la lettura della tensione è fatta più vicino possibile alla reale posizione delle celle di carico. Per ulteriori informazioni sulla descrizione dei sistemi di acquisizione si può fare riferimento al Deliverable LA1-15[1].

2 Setup del modello numerico

In questo paragrafo viene illustrato il modello costruito in Orcaflex per ciò che riguarda caratteristiche di massa, inerzia, posizione del baricentro e configurazione del sistema di ormeggio. In Figura 1 sono riportate le grandezze di design (scalate in basso) nella colonna "Design Value" e la corrispettiva misura sperimentale nella colonna a fianco. Per il modello in Orcaflex sono stati utilizzati i valori riportati nella colonna "DATA for Orcawave" mentre per il modello di Star-Ccm+ quelli in "DATA for CFD". I dati inerziali relativi al modello CFD fanno riferimento a metà scafo in quanto si sfrutta la simmetria del problema per la risoluzione della sua idrodinamica. Ciò consente di abbattere il costo computazionale della metodologia.

Per quanto riguarda il sistema di ormeggio, le misure utilizzate sono relative alla configurazione riportata in Figura 2 ottenute scalando verso l'alto le misure sperimentale delle lunghezze delle linee di ormeggio. La definizione dei tratti da P0 a P4 è invece riportata in Figura 3.

DATI Modello Full-Scale	MSU	Design Value	Misura Sperimentale	err perc(%)	Full-scale riscaled	DATA for CFD	DATA for Orcawave
Lunghezza	[m]	0,592	0,592	0,0%	14,80	14,80	14,80
Larghezza	[m]	0,900	0,900	0,0%	22,50	22,50	22,50
Altezza	[m]	0,296	0,296	0,0%	7,40	7,40	7,40
Massa	[kg]	71,552	72,360	1,1%	1130625,00	565313	1130625
COG (from deck)	[m]	-0,145	-0,139	4,1%	-3,48	-3,48	-3,48
Linea di gallegg. (from deck)	[m]	-0,104	-0,100	3,7%	-2,50	-2,50	-2,50
I44	[kg*m ²]	5,668	5,827	2,8%	56904296,88	28452148	57990149
I55	[kg*m ²]	3,070	3,334	8,6%	32558593,75	16279297	33644446
I66	[kg*m ²]	7,388	7,388	0,0%	72150648,00	36075324	72150648
Draft	[m]	0,192	0,196	2,0%	4,91	4,91	4,91
COG(from waterline)		-0,041	-0,039	5,0%	-0,98000	-0,98000	-0,98000

FIGURA 1-PROTOTIPO VS MODELLO FULL-SCALE: CONFRONTO TRA GRANDEZZE GEOMETRICHE E INERZIALI

Prototype			Full scale Model (m)			
	Distance (m)	Cumulative Length(m)		Distance (m)	Cumulative Length(m)	
P0->P1	0,41	0,41	P0->P1	10,25	10,25	
P1->PN->P2	2,49	2,9	P1->PN->P2	62,25	72,5	
P2->P3	1,19	4,09	P2->P3	29,75	102,25	
P3->P4	0,7	4,79	P3->P4	17,5	119,75	
Total length	4,79	4,79	Total length	119,75	119,75	

FIGURA 2- PROTOTIPO VS MODELLO FULL-SCALE: CONFRONTO TRA LE LUNGHEZZE DEI TRATTI DELLE LINEE

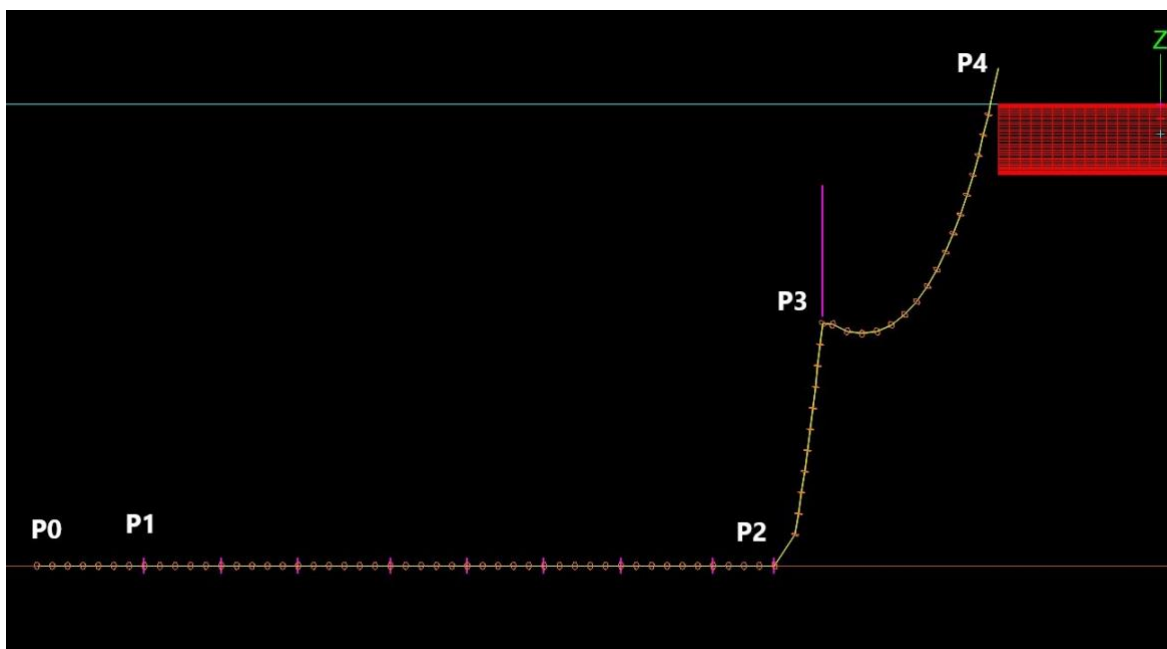


FIGURA 3 – RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DEI TRATTI DI LINEE INDICATI NELLE FIGURE PRECEDENTI

Dal tratto P1 a P2 sono disposti dei pesi da 10 tonnellate distribuiti ogni 8m di catena. Nel punto P2 è presente una molla per rispettare all'interno del modello, le caratteristiche (rigidezza, distribuzione di massa, etc.) della linea di ormeggio usata nella prototipazione. Al punto P3 è invece collegato il jumper con caratteristiche di galleggiamento (massa e volume) scalate al vero rispetto al galleggiante utilizzato durante la campagna sperimentale. Infine, al punto P4 è collegata una linea con caratteristiche (rigidezza e peso) della cella di carico utilizzata per il prototipo. Tale linea fa riferimento all'ultimo tratto del segmento P3-P4.

Mentre in Orcaflex, per l'ormeggio si utilizza il solutore dinamico interno al software stesso, per quanto riguarda Star Ccm+ viene utilizzato Moordyn attraverso una libreria esterna implementata su Star [2].

Prima di procedere con la validazione dei modelli numerici è bene chiarire che il modello di ormeggio è leggermente modificato rispetto al caso originale di design. Infatti, nel layout d'ormeggio originale è presente una zavorra nel tratto di catena P3-P4 ed il jumper è più vicino allo scafo. Tali modifiche non inficiano sulla metodologia di validazione del modello numerico né tantomeno sulla bontà dei risultati in termini di moti nave. Queste piccole variazioni sono state effettuate poiché, mentre nel modello numerico il jumper viene modellato con parametri concentrati sulla linea di ormeggio, all'atto pratico, ciò non è possibile, quindi il fondo del jumper è collegato tramite un moschettone alla linea di ormeggio. Per evitare quindi che il jumper stesso fuoriesca dall'acqua è stato spostato il punto di attacco del moschettone alla linea.

2.1 Modello Orcaflex

Nel modello Orcaflex le caratteristiche specifiche in input in termini di massa e inerzia sono riportate in Figura 1 mentre quelle relative alle linee di ormeggio in Figura 4 e 5.

Attachments: 10

No.	Attachment type	Position (m)			z relative to
		x	y	z	
1	Clump-Weight	0,0	0,0	10,0	End B
2	Clump-Weight	0,0	0,0	18,0	End B
3	Clump-Weight	0,0	0,0	26,0	End B
4	Clump-Weight	0,0	0,0	34,0	End B
5	Clump-Weight	0,0	0,0	42,0	End B
6	Clump-Weight	0,0	0,0	50,0	End B
7	Clump-Weight	0,0	0,0	58,0	End B
8	Clump-Weight	0,0	0,0	66,0	End B
9	Clump-Weight	0,0	0,0	74,0	End B
10	Jumper	0,0	0,0	91,5	End B

Sections: 4 Total length = 119,75m

No.	Line type	Section length (m)	Expansion factor	Target segment length (m)	Number of segments	Clash check	Cumulative values	
							Length (m)	Segments
1	Load_cell	3,375	~	1,0	3	<input type="checkbox"/>	3,375	3
2	Chain_150mm_studless	40,2	~	1,5	27	<input type="checkbox"/>	43,575	30
3	Spring	3,675	~	3,0	1	<input type="checkbox"/>	47,25	31
4	Chain_150mm_studless	72,5	~	1,5	48	<input type="checkbox"/>	119,75	79

FIGURA 4- CARATTERISTICHE DEGLI ATTACHMENTS DELLE LINEE D'ORMEGGIO E LUNGHEZZE DELLE DIVERSE TIPOLOGIE DI CATENE UTILIZZATE SU CIASCUNA LINEA D'ORMEGGIO

Name	Diameters		Centre of mass		Bulk modulus (kPa)	Mass per unit length (te/m)
	Outer (m)	Inner (m)	x (m)	y (m)		
1 Chain_150mm_studless	0,283	0,0	0,0	0,0	Infinity	0,458
2 Load_cell	0,001	0,0	0,0	0,0	Infinity	0,09259
3 Spring	0,21735	0,0	0,0	0,0	Infinity	0,772

Name	Young's modulus (kPa)	Bending stiffness (kN.m ²)		Axial stiffness (kN)	Poisson ratio	Torsional stiffness (kN.m ²)	Tension / torque coupling (kN.m)	Additional bending stiffness (kN.m ²)
		x	y					
1 Chain_150mm_studless	0,0	~	~	1,921e6	0,5	80,0	0,0	0,0
2 Load_cell	0,0	~	~	1,921e6	0,5	80,0	0,0	0,0
3 Spring	0,0	~	~	58,18e3	0,5	80,0	0,0	0,0

FIGURA 5- CARATTERISTICHE DELLE DIVERSE TIPOLOGIA DI CATENE UTILIZZATE SU CIASCUNA LINEA D'ORMEGGIO

In Figura 6 e Figura 7 vengono riportate rispettivamente le viste dall'alto del setup sperimentale e del setup del modello Orcaflex.



FIGURA 6-VISTA DALL'ALTO DEL SETUP SPERIMENTALE

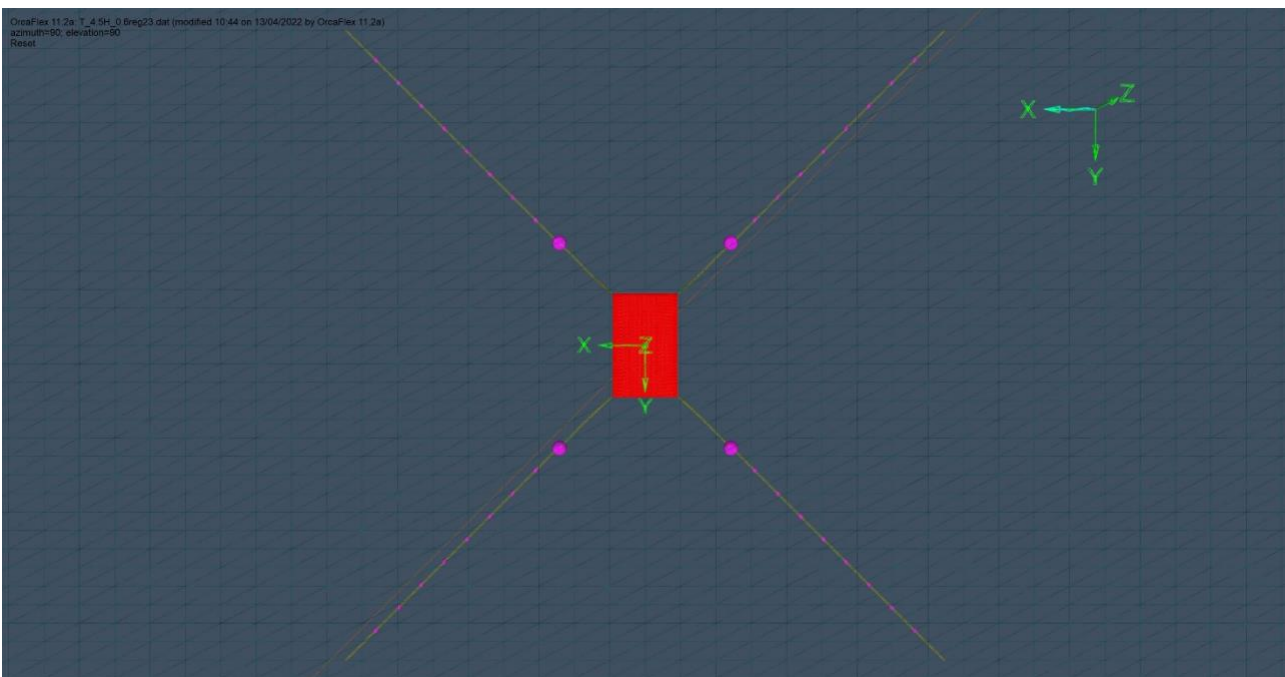


FIGURA 7-VISTA DALL'ALTO DEL SETUP DEL MODELLO ORCAFLEX

Per la scelta della forzante ondosa in Orcaflex si è proceduto seguendo due principali approcci:

- Forzante Ondosa regolare: dopo aver verificato la ripetibilità delle onde a vuoto, si misura l'altezza e il periodo di ciascuna onda facendo la FFT del segnale della sonda 5, dove si trova posizionato PeWEC [1] e prendendo l'ampiezza e la fase principale. I valori di ampiezza e periodo vengono up-scalati ed importanti come parametri di generazione delle onde regolari in Orcaflex.
- Forzante Ondosa irregolare: dopo aver verificato che lo spettro sperimentale delle onde a vuoto fosse conforme a quello teorico [1], questo viene scalato al vero ed importato direttamente in Orcaflex. Come esempio fare riferimento a Figura 6.

OrcaFlex 11.2a: PeWEC_irr01.dat (modified 17:18 on 06/12/2021 by OrcaFlex 11.1a)
Spectral density for wave train 'Wave1'

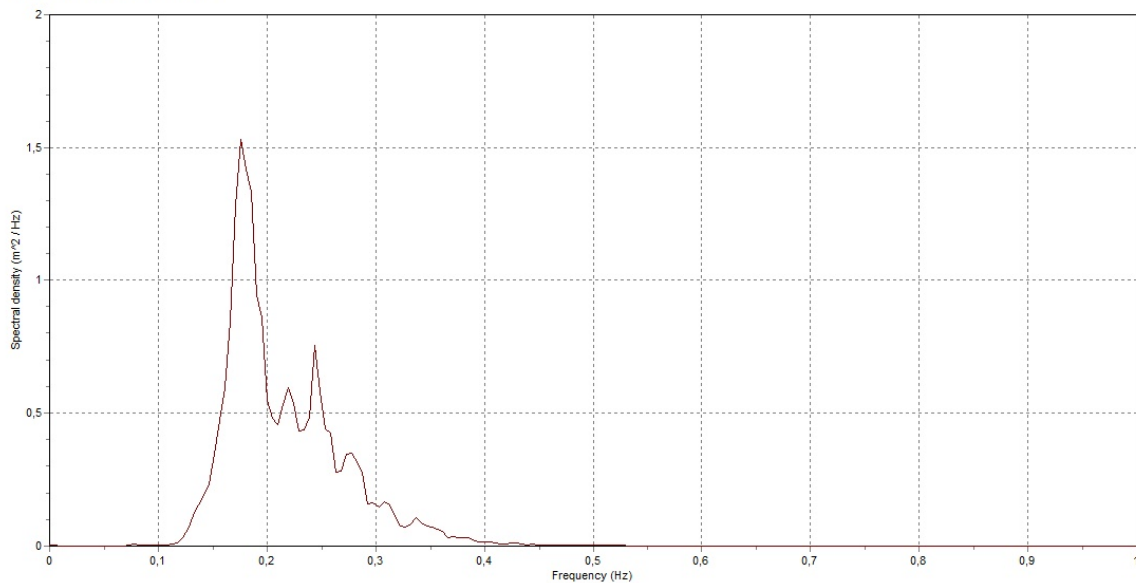


FIGURA 8-SPETTRO SPERIMENTALE ONDA IRREGOLARE IRR01

2.2 Modello Star Ccm+

La realizzazione del modello CFD è stata effettuata in maniera equipollente al modello sviluppato su Orcaflex: le caratteristiche dello scafo sono state scalate al vero dai dati sperimentali e le linee d'ormeggio hanno le stesse caratteristiche indicate nel paragrafo precedente. Riguardo alla modellazione fluidodinamica della simulazione (modelli numerici, solutori numerici, discretizzazione spaziale (mesh), Boundary Condition etc...) si faccia riferimento al Deliverable LA1-13 [2] in cui è descritto il set-up della simulazione CFD, riportato per solo scopo di visualizzazione in Figura 9.

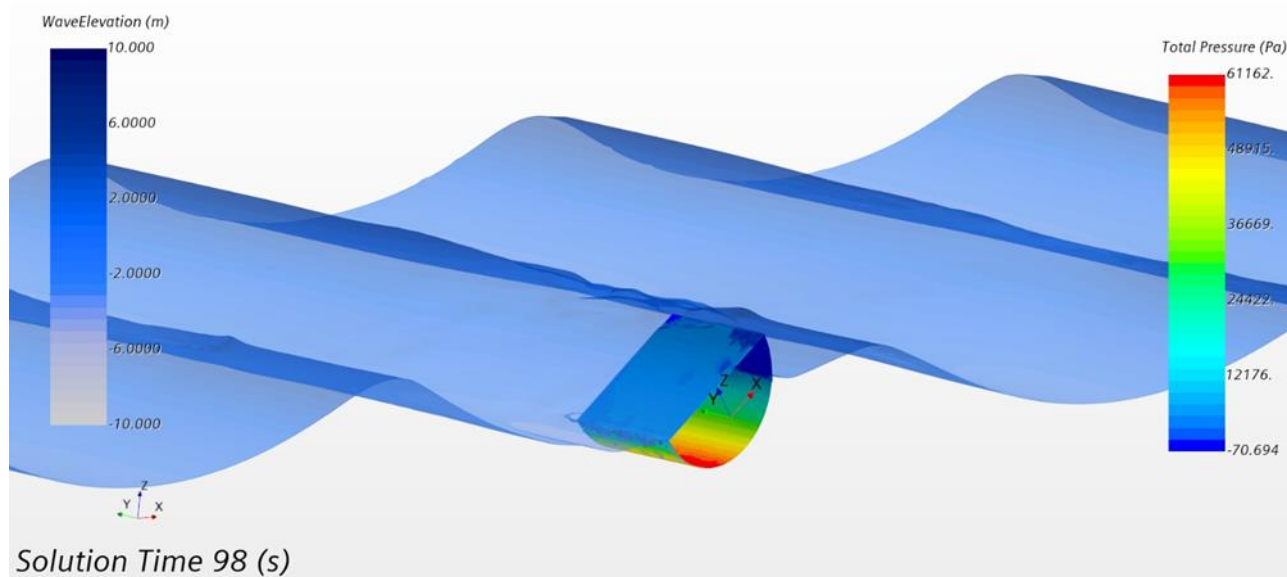


FIGURA 9- MODELLO CFD: SOLUZIONE DEL CAMPO DI PRESSIONE AD UN ISTANTE DI TEMPO FISSATO

3 Confronto dati sperimentali e simulazione

In questo paragrafo verranno confrontati i modelli numerici sviluppati con Orcaflex e Star-Ccm+ con i dati acquisiti durante le prove sperimentali effettuate nella vasca navale dell’università Federico II di Napoli. Tutti i confronti vengono riportati per le seguenti tipologie di prove:

- Free Decay per i moti di rollio e beccheggio
- Pullout statico
- Onde operative regolari
- Onda estrema regolare
- Onde operative irregolari
- Onda estrema irregolare

3.1 Free decay

Durante lo sviluppo di modelli con idrodinamica lineare come Orcaflex gli effetti apportati da fenomeni viscosi vengono perduti amplificando i moti del dispositivo. Per questo motivo vengono effettuate le prove a Free-Decay. Da un’analisi di Free-Decay è possibile stimare i coefficienti di damping viscoso dello scafo e, una volta linearizzato, inserirlo su modelli BEM lineari. In questo paragrafo si vuole mostrare come una simulazione CFD ben fatta può sopperire allo svolgimento di prove sperimentali per la determinazione di tali coefficienti. Le prove che sono state svolte in CFD e che vengono confrontate con le acquisizioni sperimentali sono quelle relative ai moti di beccheggio e rollio dello scafo in assenza del sistema di ormeggio. In Figura 7 è il moto di beccheggio adimensionalizzato sulla massima oscillazione iniziale risultato dalla prova in sperimentale e CFD.

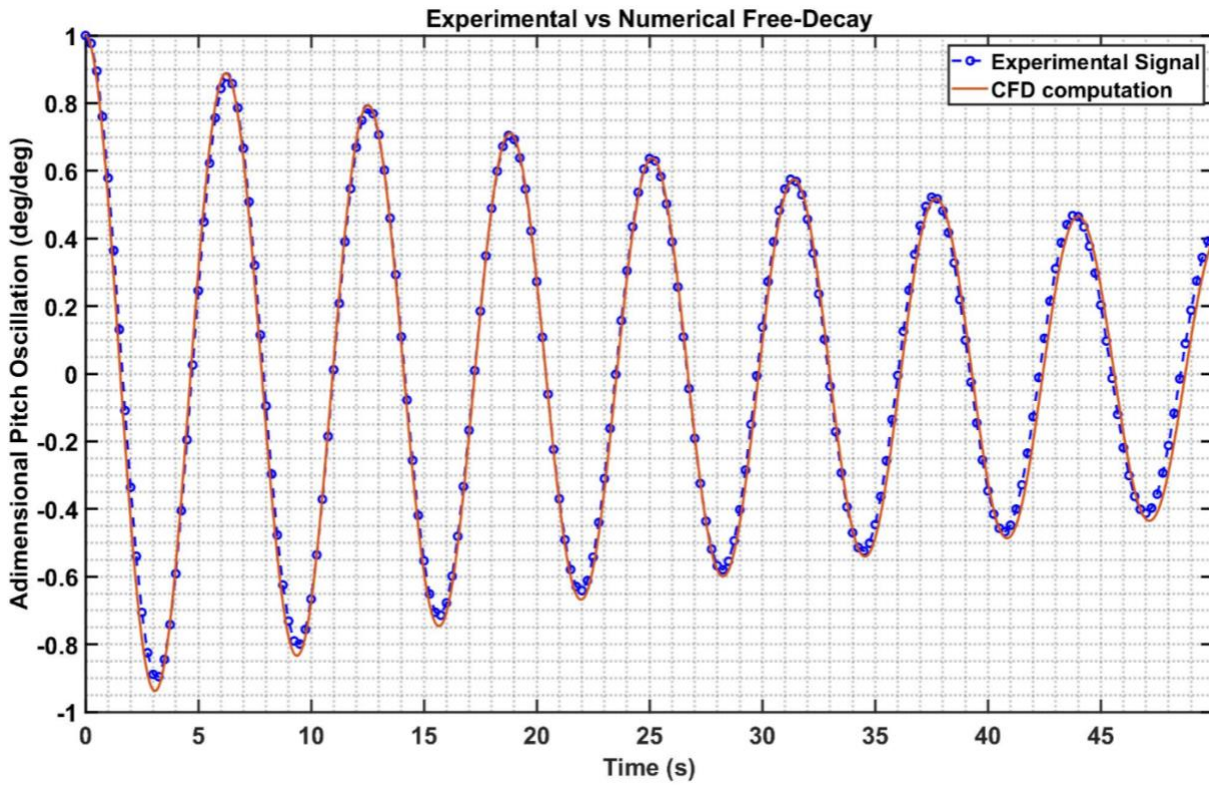


FIGURA 10- MOTO DI BECCHEGGIO IN CFD E SPERIMENTALE RIPORTATO IN SCALA 1:1

Attraverso la metodologia illustrata in [3] è possibile determinare il coefficiente di damping lineare α , quello quadratico β e il periodo di risonanza per ciascuno dei due segnali. I valori relativi alla prova a beccheggio sono riportati insieme a quelli per la prova di rollio in Figura 9. La stessa procedura è stata svolta sulla prova di rollio la cui storia temporale è riportata in Figura 8. È da notare come in entrambe le Figure 7 e 8 sia stata riportata solo parte della storia temporale poiché è questo l'intervallo in cui si calcolano i coefficienti di damping tralasciando le oscillazioni più piccole dove il rumore non è trascurabile.

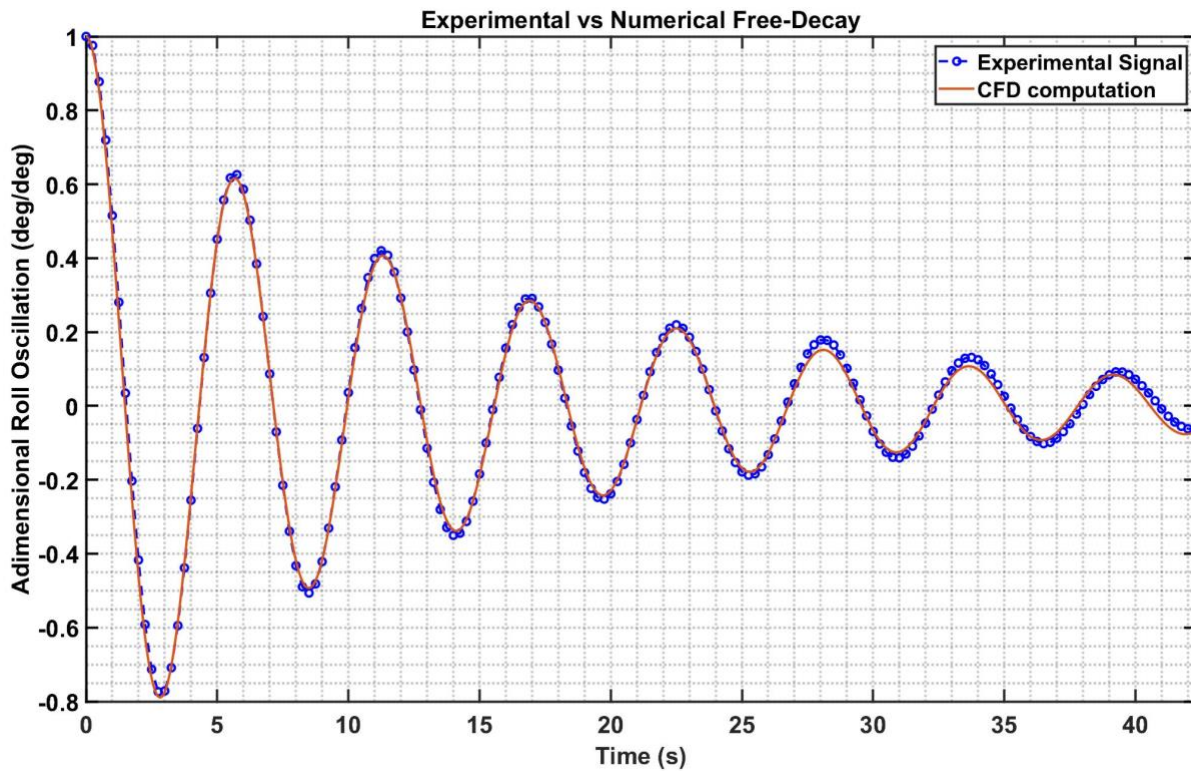


FIGURA 11 -MOTO DI BECCHEGGIO IN CFD E SPERIMENTALE RIPORTATO IN SCALA 1:1

Il fattore di estinzione lineare α e quello quadratico β sono stati ottenuti attraverso l'applicazione Metodo di Fourier [4] alle due serie temporali ottenute da sperimentale e CFD. I risultati ottenuti sono riportati e confrontati tra loro in termini di errore percentuale in Figura 12. Si nota come i risultati ottenuti attraverso analisi CFD siano ampiamente conformi rispetto a quelli sperimentali ciò consentirà di utilizzare lo stesso setup di simulazione per determinare le grandezze di interesse considerate anche per eventuali ulteriori scafi. Inoltre, il calcolo dei coefficienti α e β consente di calcolare il damping viscoso e linearizzandolo importarlo in modelli lineari BEM come damping esterno. In questo modo si tiene conto degli effetti viscosi anche nei modelli lineari come Orcaflex. La procedura di linearizzazione, mostrata nel Metodo di Fourier si trova dettagliatamente descritta in [4].

		$\alpha(1/s)$	$\beta()$	$Td(s)$	Error on α	Error on β	Error on Td
Pitch Test	Experimental	0,154	0,031	6,25	3,90%	3,23%	0,64%
	CFD	0,148	0,032	6,29			
Roll Test	Experimental	0,042	0,914	5,58	2,38%	0,11%	0,36%
	CFD	0,041	0,915	5,6			

FIGURA 12-CONFRONTO FREE DECAY SPERIMENTALE E IN AMBIENTE CFD

3.2 Onde operative regolari

In questo paragrafo viene analizzata la risposta del PeWEC in condizione di onda operativa regolare. Le onde eseguite in vasca sono riportate nel deliverable precedente [1] e sono state scelte in modo da caratterizzare al meglio la risposta del dispositivo. Dai parametri di design del prototipo, il periodo di risonanza dello stesso è intorno a 1,2 s in piccola scala e cioè intorno a 6s in grande scala, perciò, sono state scelte diverse onde con periodo nell'intorno di 1,2s per poi arrivare ad un periodo minimo di 0,8s e uno massimo di 1,6s. I periodi minimi e massimi sono stati di fatto obbligati dall'analisi della ripetibilità dell'onda a vuoto: a bassi periodi l'onda non era ripetibile a causa dei limiti di funzionamento del setup sperimentale, ad alti periodi invece il fondo virtuale agiva da eccitatore non garantendo la ripetibilità dell'onda. I limiti in questione sono inoltre variabili con la ripidità dell'onda. Per ripidità d'onda pari a 1:50 si sono testate onde nel range da 0,8s a 1,6s (4s-8s in scala 1:1) mentre per ripidità d'onda di 1:30 da 0,9s a 1,5s (4,5s-7,5s in scala 1:1). In totale sono state effettuate 11 onde per ripidità 1:50 e 9 per ripidità 1:30. Per riportare le onde dal modello reale a quello in scala 1:1 e quindi inserirle su Orcaflex e Star Ccm+ le grandezze delle onde sono state scalate in alto secondo i fattori di scala. Le grandezze scalate sono state quelle provenienti dalle letture della sonda 5 (dove è posizionato il PeWEC) una volta accertata la ripetibilità e regolarità di ciascuna onda a vuoto. Per chiarezza in Figura 1 e Figura 2 vengono riportati rispettivamente il setup delle onde a vuoto e il setup quando PeWEC è installato. Nel primo dei due sottoparagrafi successivi vengono validati i modelli numerici in termini di cinematica dello scafo (moto di beccheggio e sussulto) in condizioni di onda frontale. Nel secondo invece vengono monitorate le tensioni dell'ormeggio nei punti di attacco dello scafo (dove si trovano le celle di carico nello sperimentale) e confrontate opportunamente in termini di ampiezza.

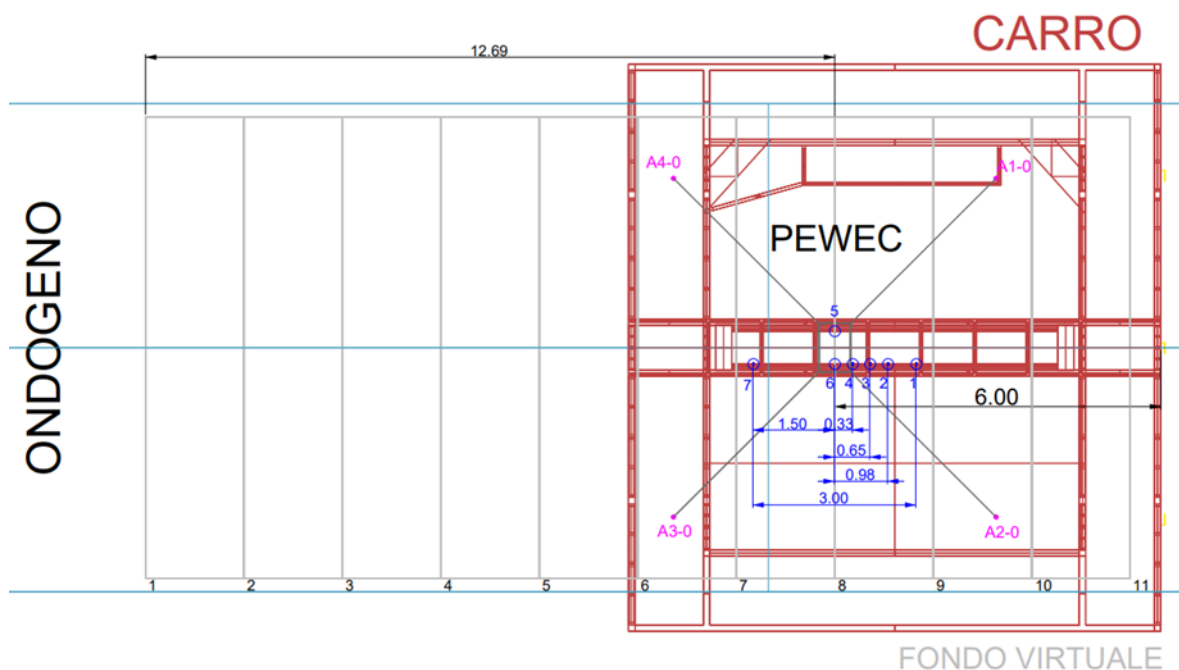


FIGURA 13- POSIZIONAMENTO DELLE WAVE PROBES, CONFIGURAZIONE A VUOTO

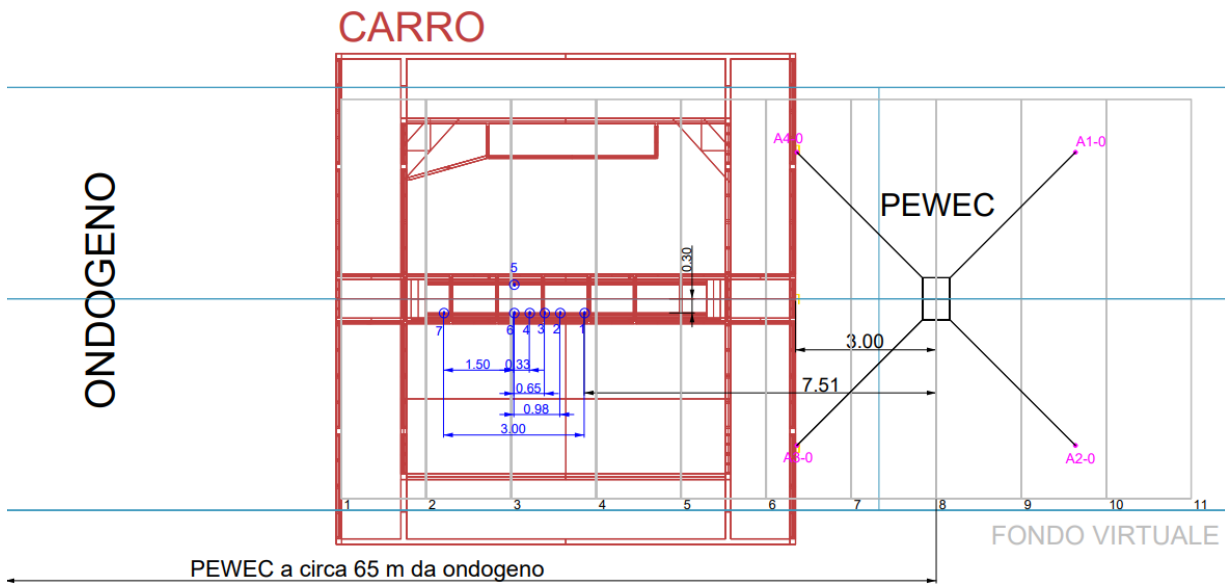


FIGURA 14- POSIZIONAMENTO DELLE WAVE PROBES, CONFIGURAZIONE CON PEWEC INSTALLATO

Cinematica

Come anticipato nel paragrafo precedente, durante lo svolgimento delle prove sperimentali sono state effettuate onde regolari con ripidità di 1:50 e 1:30. In Figura 15 e in Figura 16 sono riportati i RAO a beccheggio e sussulto calcolati come:

$$RAO = \frac{\eta_i}{A_w}$$

In cui η_i è l'ampiezza di oscillazione del moto considerato e A_w è l'ampiezza d'onda. I moti di beccheggio e sussulto sono moti eccitati principalmente dalla frequenza dell'onda e per questo motivo sono riportati entrambi. Il moto di abbrivio (surge) invece, essendo caratterizzato da più componenti in frequenza (frequenza d'onda e basse frequenze) è stato approfondito nell'analisi delle onde irregolari. I moti di rollio, imbardata e deriva non sono invece di interesse in onda frontale.

La stessa analisi è stata effettuata in Figura 17 e Figura 18 per onde con ripidità di 1:30. Dal confronto tra i dati sperimentali e i modelli numerici, soprattutto relativamente al moto di beccheggio, si nota come l'errore numerico aumenti con l'ampiezza di oscillazione a beccheggio. La condizione peggiore si trova quindi per onde con ripidezze elevate e con periodo vicino a quello di risonanza del dispositivo.

Questo è in accordo con la teoria lineare [5] usata nel modello Orcaflex. Per limitare al minimo tale errore verrà implementato nel modello una matrice di damping esterno calcolato attraverso le simulazioni CFD come mostrato nel paragrafo precedente.

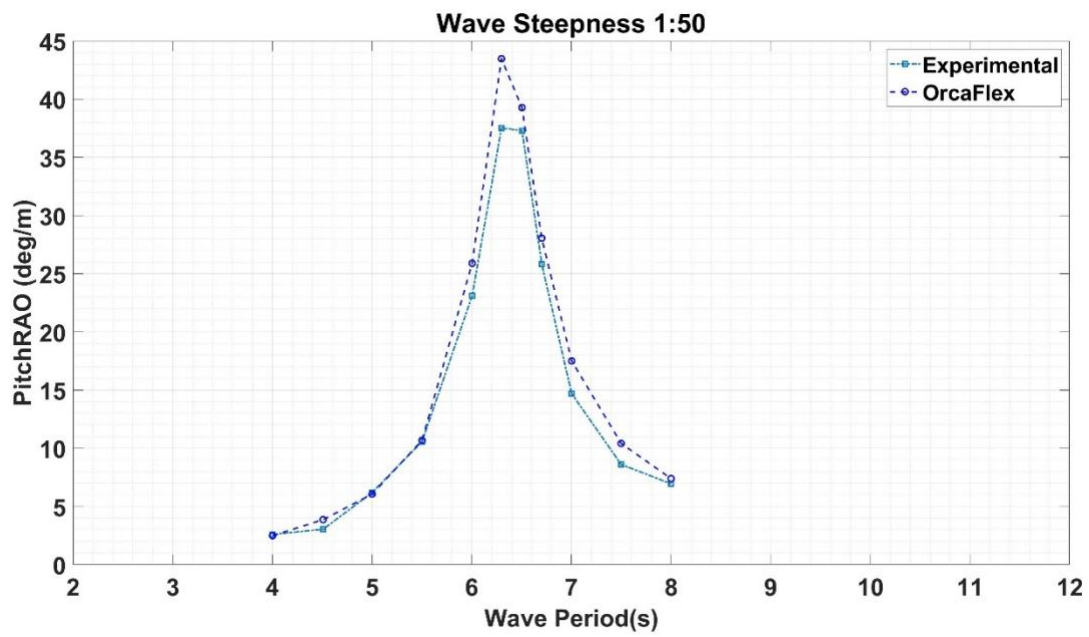


FIGURA 15- RAO A BECCHEGGIO (RIPIDITÀ DELL'ONDA 1:50): SPERIMENTALE VS NUMERICO

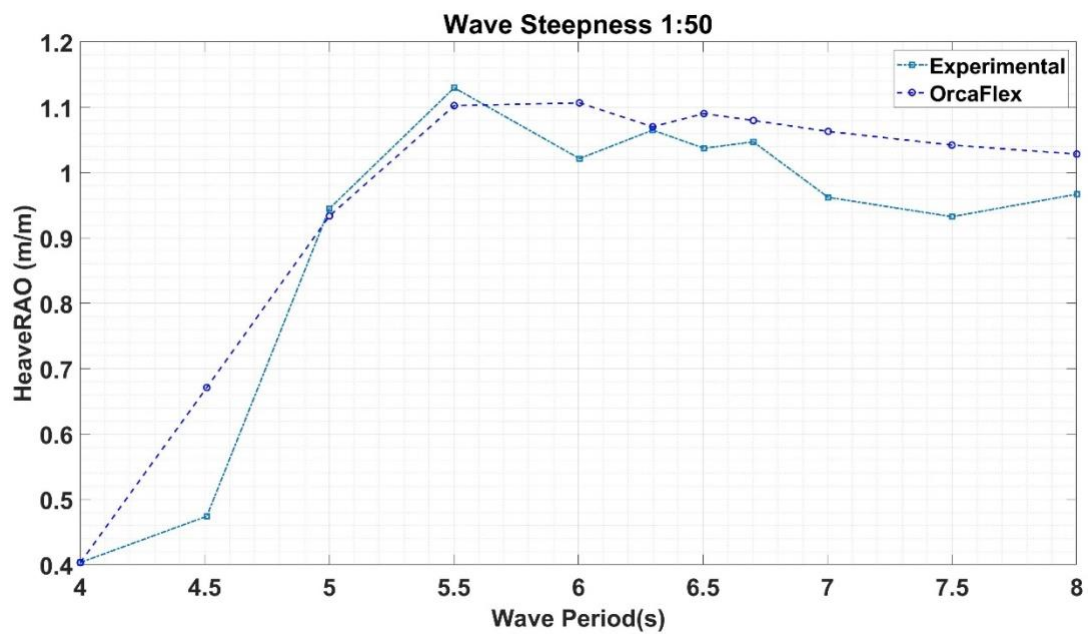


FIGURA 16- RAO A SUSSULTO (RIPIDITÀ DELL'ONDA 1:50): SPERIMENTALE VS NUMERICO

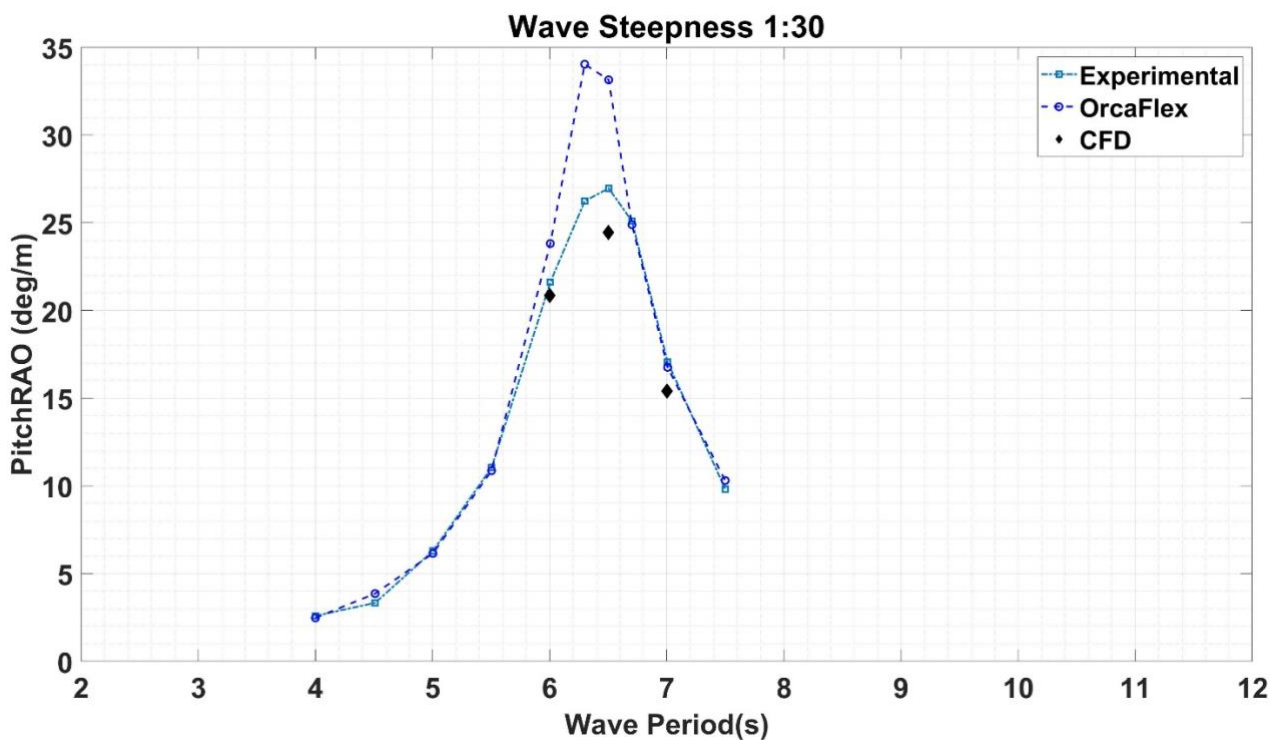


FIGURA 17- RAO A BECCHEGGIO (RIPIDITÀ DELL'ONDA 1:30): SPERIMENTALE VS NUMERICO

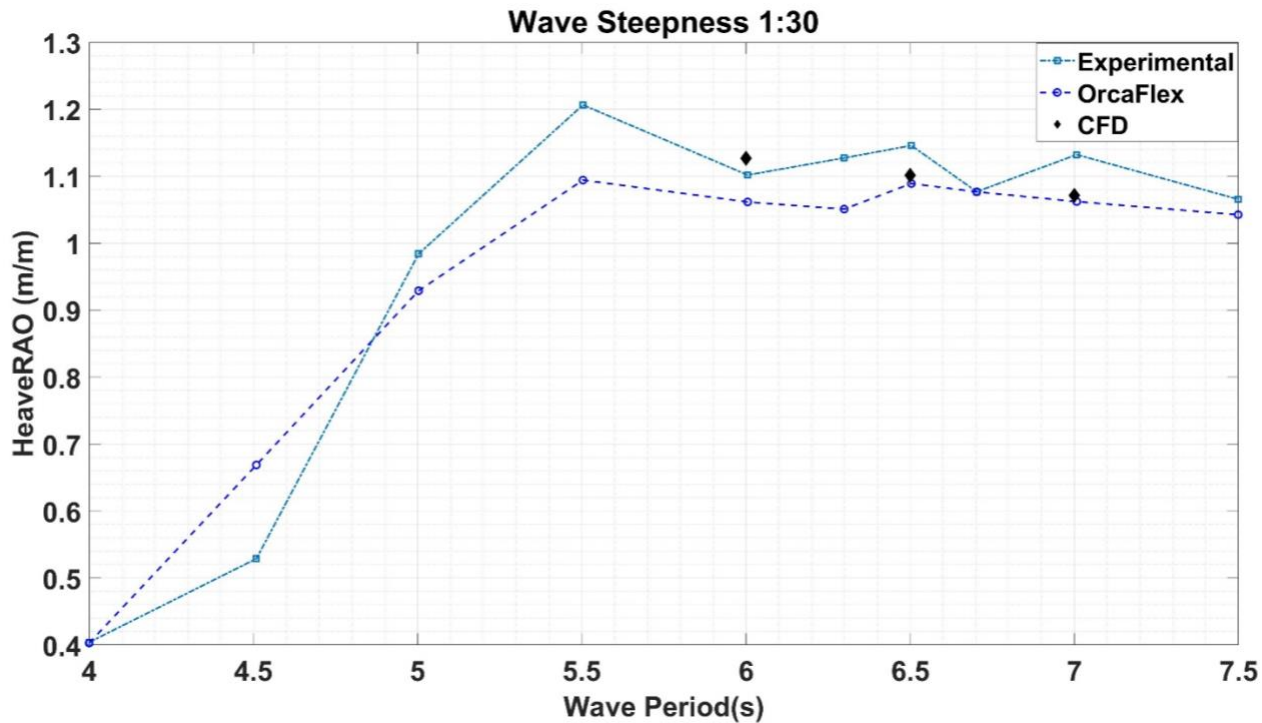


FIGURA 18- RAO A SUSSULTO (RIPIDITÀ DELL'ONDA 1:30): SPERIMENTALE VS NUMERICO

Carichi ormeggio

Una parte fondamentale durante il design di un WEC è l'influenza dell'ormeggio sul dispositivo stesso. In questo paragrafo vengono determinate le caratteristiche del sistema di ormeggio collegato al PeWEC. In Figura 19 è mostrato l'andamento delle forze delle linee in tensione in funzione della posizione longitudinale del dispositivo. Il "Pullout" viene effettuato legando delle cime alle ogive del PeWEC e tirandolo fino alla massima escursione data dall'estensione delle linee d'ormeggio. Mentre il PeWEC viene tirato viene acquisita la forza letta dalle celle di carico in tensione. Lo stesso procedimento è stato simulato in Orcaflex e Moordyn. Le caratteristiche statiche dell'ormeggio sono perfettamente replicate dai software.

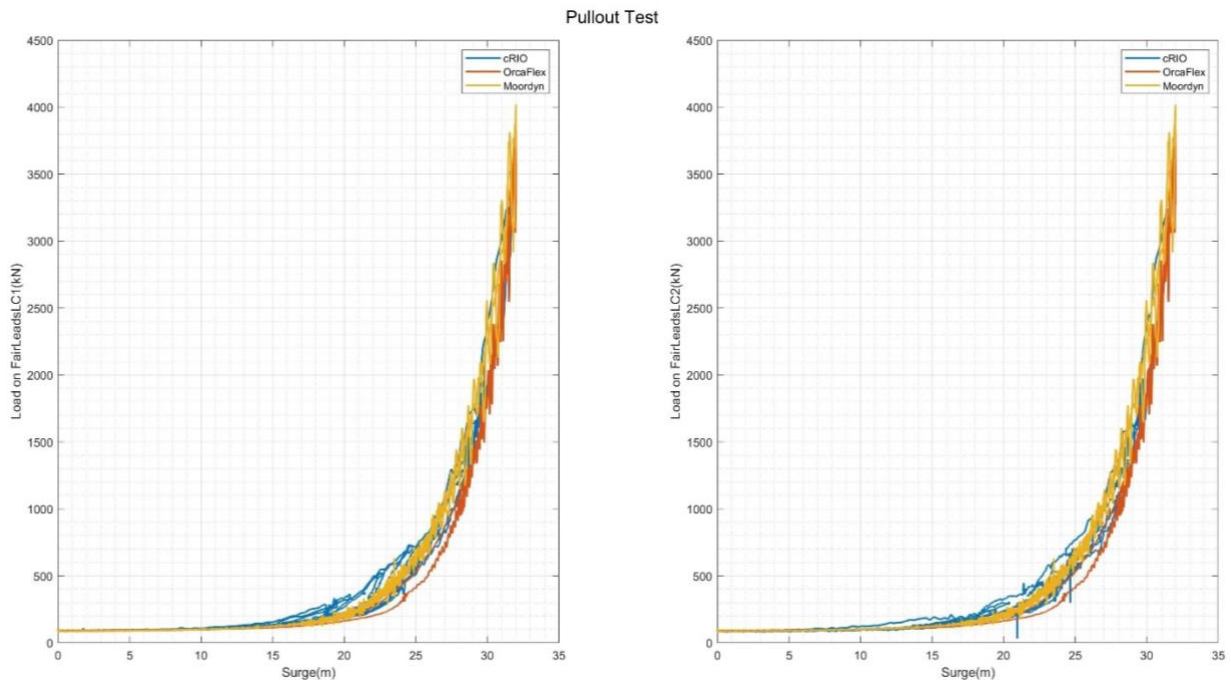


FIGURA 19- PULLOUT STATICO ORMEGGIO: SPERIMENTALE-ORCAFLEX-MOORDYN

Una volta effettuata la validazione statica dell'ormeggio, si è passati alla validazione delle letture in ampiezza delle celle di carico in onde regolari operative. A questo proposito bisogna fare una premessa: poiché la campagna sperimentale è stata focalizzata sulla determinazione dei carichi in eventi estremi, le celle di carico sono state scelte in funzione del carico massimo predetto in onda estrema; perciò, la loro risoluzione non è adatta a registrare piccole oscillazioni in onde operative. Perciò, come si vede in Figura 21, le celle di carico a prua (LC3 ed LC4) registrano valori di ampiezza molto diversi durante la prova. In Figura 20 viene riportata la tensione sulle celle di carico 3 e 4 per l'onda irregolare operativa Irr_01. Si vede come, il valore massimo arrivi intorno ai 9N ovvero 0,92 kg mentre il fondoscala della cella di carico è di 100 lb ovvero circa 45kg; perciò, soprattutto in onde operative, dove la cella di carico deve registrare oscillazioni di pochi Newton, si riscontrano segnali molto sporchi. Nonostante questa non conformità il modello numerico approssima abbastanza fedelmente i valori di ampiezza misurati dalla cella di carico LC4 in onde a ripidità 1:50 mentre meno fedelmente in quelle a più alta ripidezza.

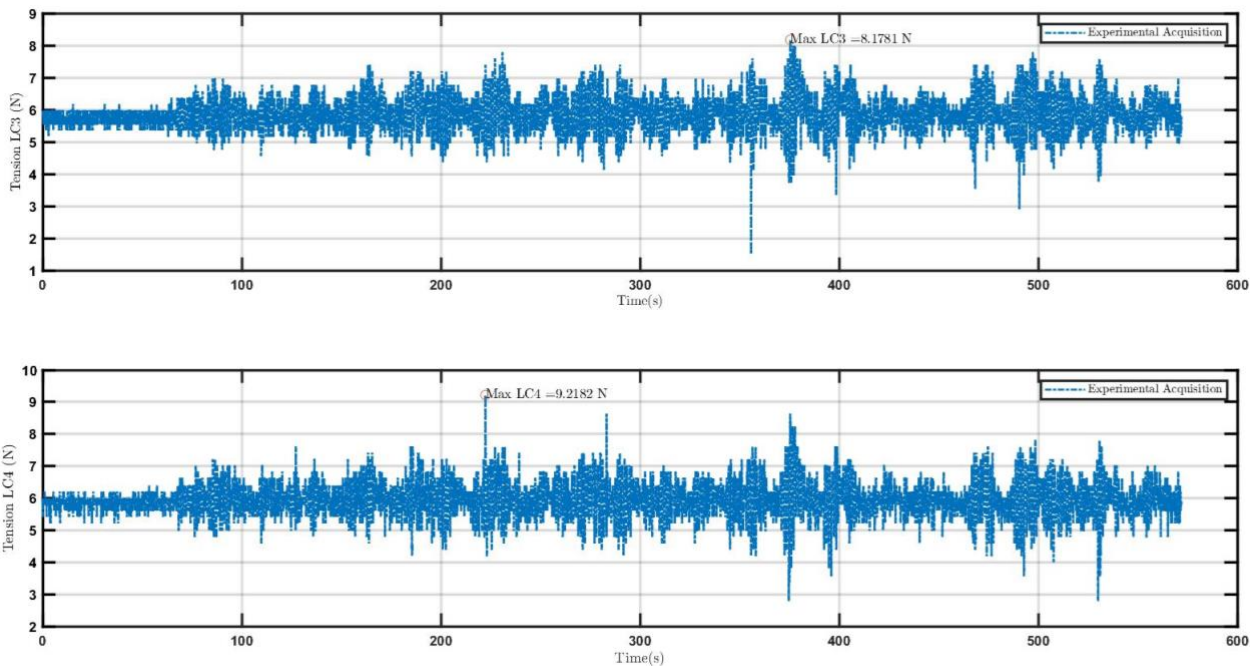


FIGURA 20- ACQUISIZIONE SPERIMENTALE DELLE TENSIONI SULLE CELLE DI CARICO 3 E 4

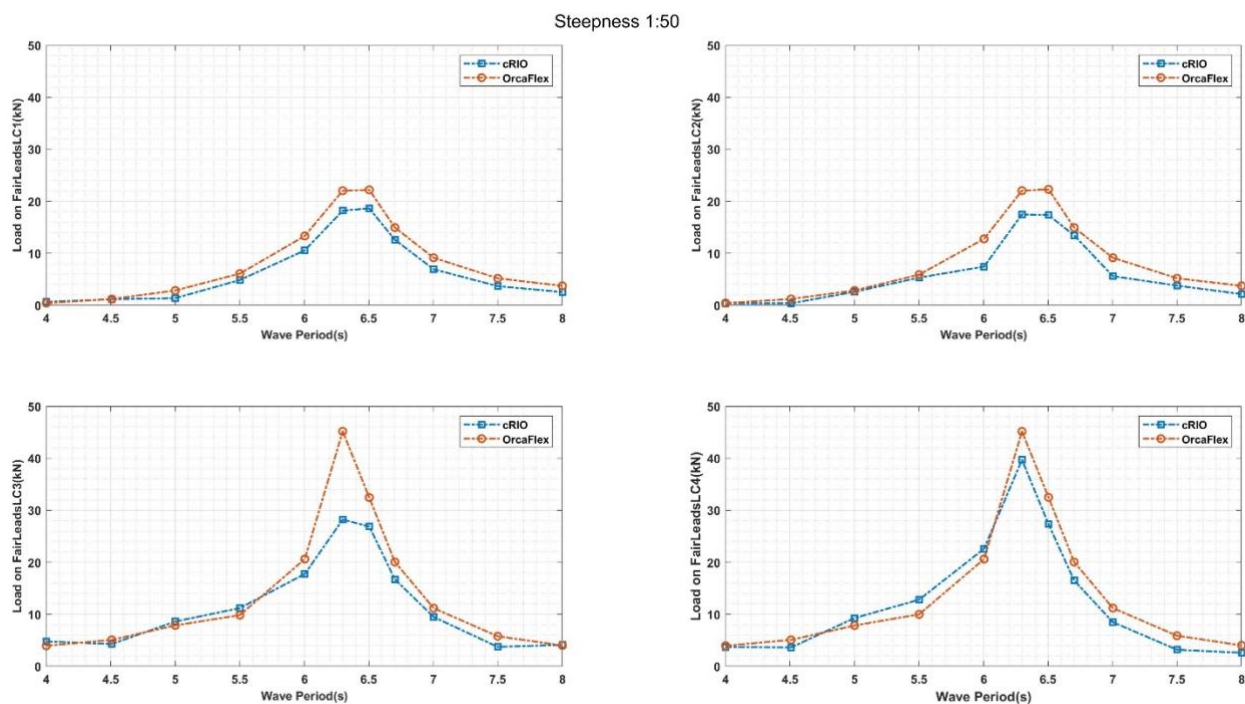


FIGURA 21- RAO TENSIONI ALLE FAIRLEADS (RIPIDITÀ DELL'ONDA 1:50): SPERIMENTALE VS NUMERICO

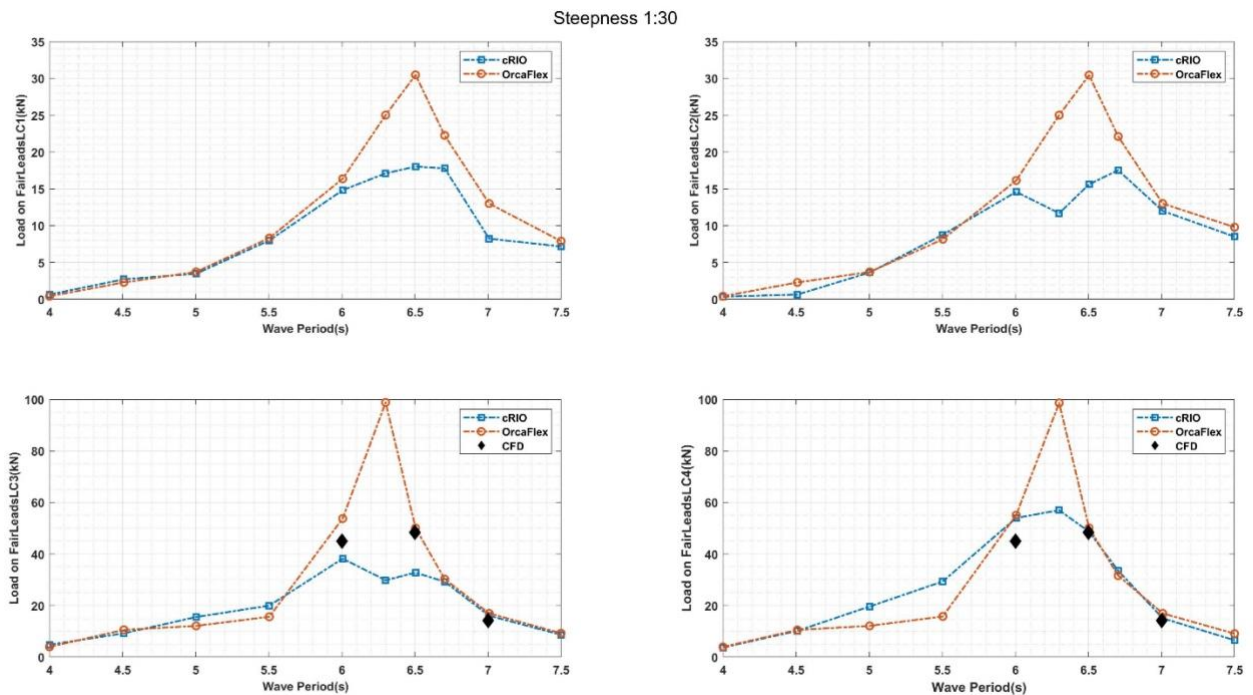


FIGURA 22- RAO TENSIONI ALLE FAIRLEADS (RIPIDITÀ DELL'ONDA 1:30): SPERIMENTALE VS NUMERICO

3.3 Onde operative irregolari

Diversamente dalle onde regolari, in questo paragrafo viene validato soltanto il modello numerico costruito in Orcaflex poiché dovendo simulare 3h di stato di mare irregolare il tempo di calcolo associato ad una simulazione CFD è insostenibile. Per la scelta delle onde irregolari è stata seguita la stessa di linea di ragionamento adottata per la scelta delle onde regolari a differenza che in questo caso i parametri da tenere in considerazione sono i parametri statistici H_s e T_e per la definizione dello spettro JONSWAP. Attraverso l'acquisizione della sonda 5 infatti è stato ricostruito lo spettro dell'onda sperimentale e confrontato con quello teorico. Lo spettro sperimentale costruito utilizzando la storia temporale relativa a 40 min di acquisizione è stato scalato verso l'alto e inserito in Orcaflex come mostrato precedentemente. La validazione della cinematica del dispositivo e dei carichi sulle linee vengono in questo caso effettuate attraverso analisi statistiche ed in frequenza.

Cinematica

Facendo riferimento al Deliverable LA1-15 [1] si ricorda che sono state scelte 8 onde irregolari operative e su queste verranno condotte tutte le seguenti analisi. La validazione specialmente della cinematica del dispositivo viene principalmente condotta nel dominio della frequenza. Nel caso in esame ciò è anche dovuto al fatto che il segnale di trigger, che comunica la concomitanza tra il lancio dell'onda dal sistema ondogeno e l'arrivo della stessa in prossimità del dispositivo, non è presente. In Figura 23 è comunque presente un confronto tra la storia temporale a beccheggio del modello e quella ottenuta da prototipo sperimentale. A tal proposito si osserva che la validazione in termini di valori sintetici (STD, valore di deviazione standard del segnale) è pressochè perfetta, ma anche la sovrapposizione dei segnali nel dominio del tempo (ottenuta per i motivi sopra citati facendo slittare uno dei due segnali in post-processing) fornisce ottimi risultati.

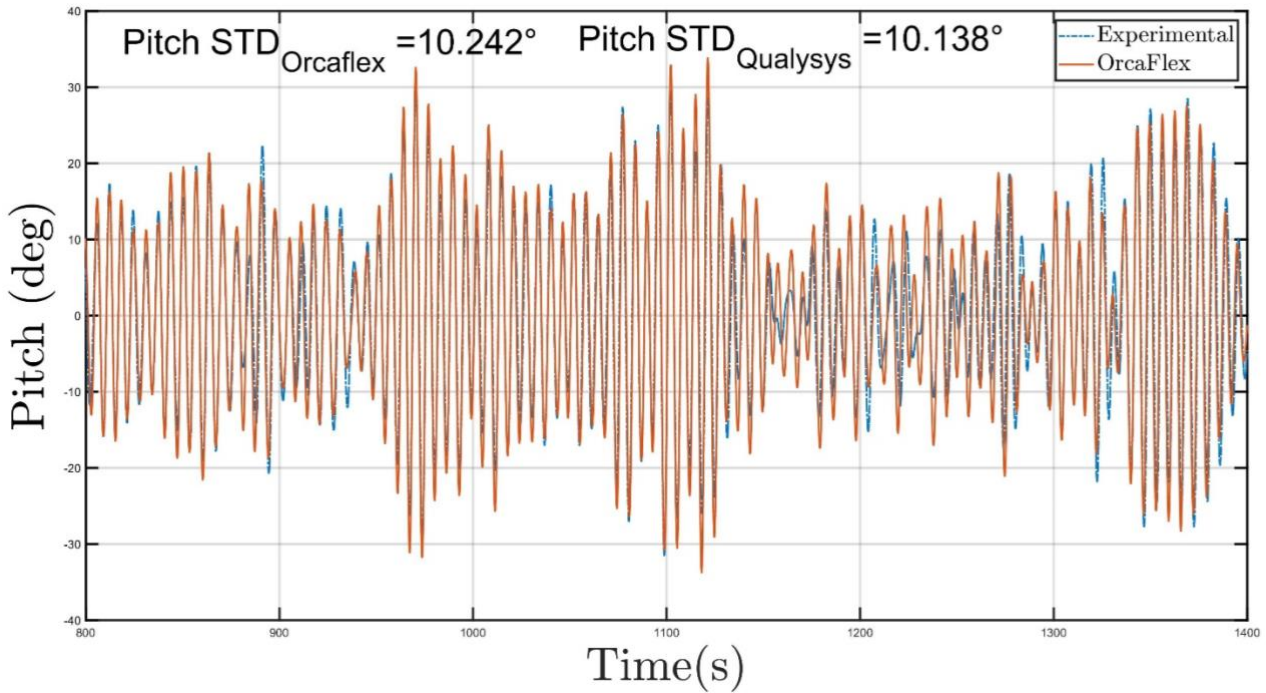


FIGURA 23- STORIA TEMPORALE DEL MOTO DI BECCHEGGIO: NUMERICO VS SPERIMENTALE

In Figura 24 è mostrato il RAO medio a beccheggio calcolato utilizzando l’acquisizione sperimentale e il modello numerico Orcaflex. Inoltre, in rosso è riportato il RAO idrodinamico per sottolineare come la presenza del sistema di ormeggio impatta sul beccheggio del dispositivo. Il RAO medio è calcolato seguendo la metodologia di sotto riportata:

1. lettura del segnale di beccheggio e dell’altezza d’onda nel tempo relativi all’onda irregolare n (il segnale dell’altezza d’onda per lo sperimentale è quello acquisito per l’onda a vuoto dalla sonda 5 cioè quella in cui si trova PeWEC mentre con il modello numerico si utilizza una “Wave Probe” nella stessa posizione del PeWEC)
2. applicazione della trasformata di Fourier ad entrambi i segnali depurati dalla media per passare dal dominio del tempo a quello della frequenza
3. rapporto tra le rispettive trasformate di Fourier
4. dopo aver calcolato il rapporto dei due segnali per tutte e otto le onde irregolari si effettua la media ad ogni frequenza dei valori ottenuti da tutti i segnali

I passaggi sopra elencati possono essere riscritti nella seguente formulazione:

$$RAO_{mean} = mean\left(\frac{fft(x_{5i}(t))}{fft(\eta_{wavei}(t))}\right) \text{ dove } i=1:8$$

La stessa metodologia è stata applicata anche per i moti di sussulto in Figura 25 e abbrivio in Figura 26.

In tutte le figure sopra citate, la linea verde è stata ottenuta imponendo in Orcaflex quattro onde (definite multisine waves) con diversa ripidità costante e periodi uniformemente distribuiti tra 2.5s e 15s e facendo la media dei segnali ottenuti. I segnali blu e nero invece mostrano l’applicazione della procedura sopradescritta rispettivamente dei segnali sperimentali (scalato al vero), e del modello matematico costruito in Orcaflex. La linea in rosso mostra il rao del dispositivo ottenuto dal solo calcolo idrodinamico tramite software BEM, e quindi non considera il sistema di ormeggio e le non-linearità correlate. Il modello numerico riesce a stimare correttamente i moti a beccheggio e sussulto (si vede dalla coincidenza delle linee verdi e nere con quella blu) mentre non riesce a stimare accuratamente quello di abbrivio. Questo è dovuto alle incertezze presenti nel setup sperimentale come, per esempio, la distribuzione topologica delle

zavorre sul fondo virtuale all'inizio di ogni prova o alla stima dei coefficienti di drag delle catene o al livello effettivo del fondale.

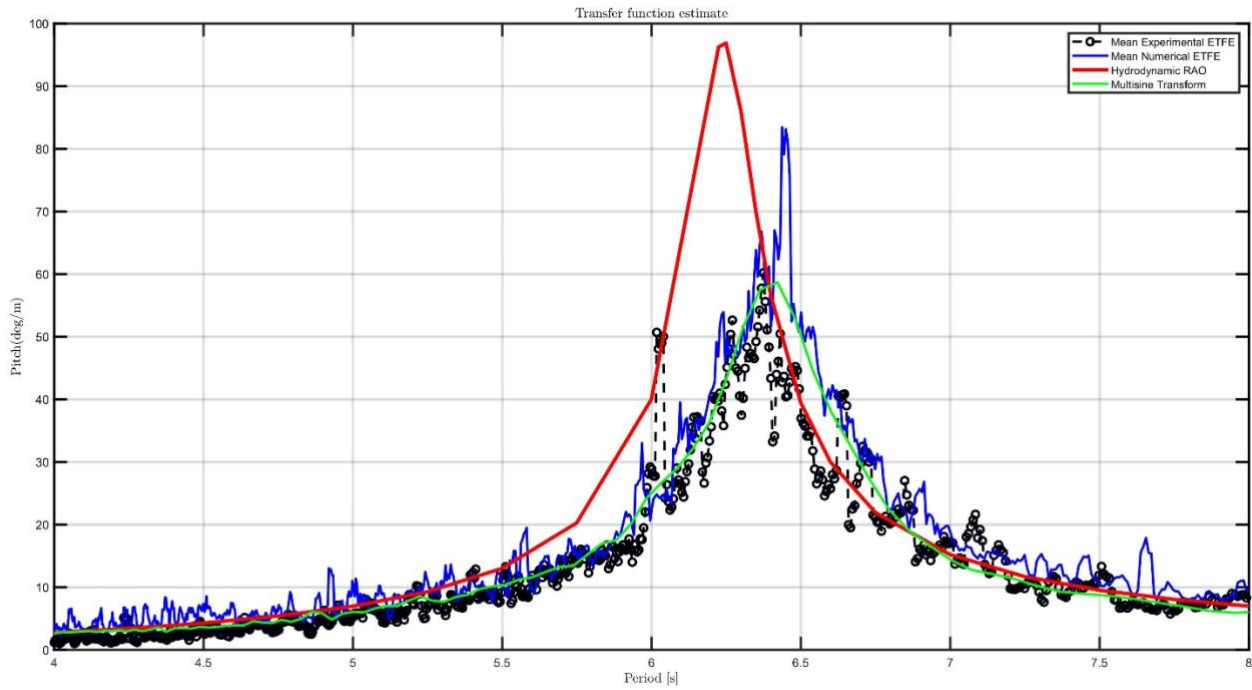


FIGURA 24- RAO MEDIO A BECCHEGGIO: SPERIMENTALE VS MODELLI NUMERICI

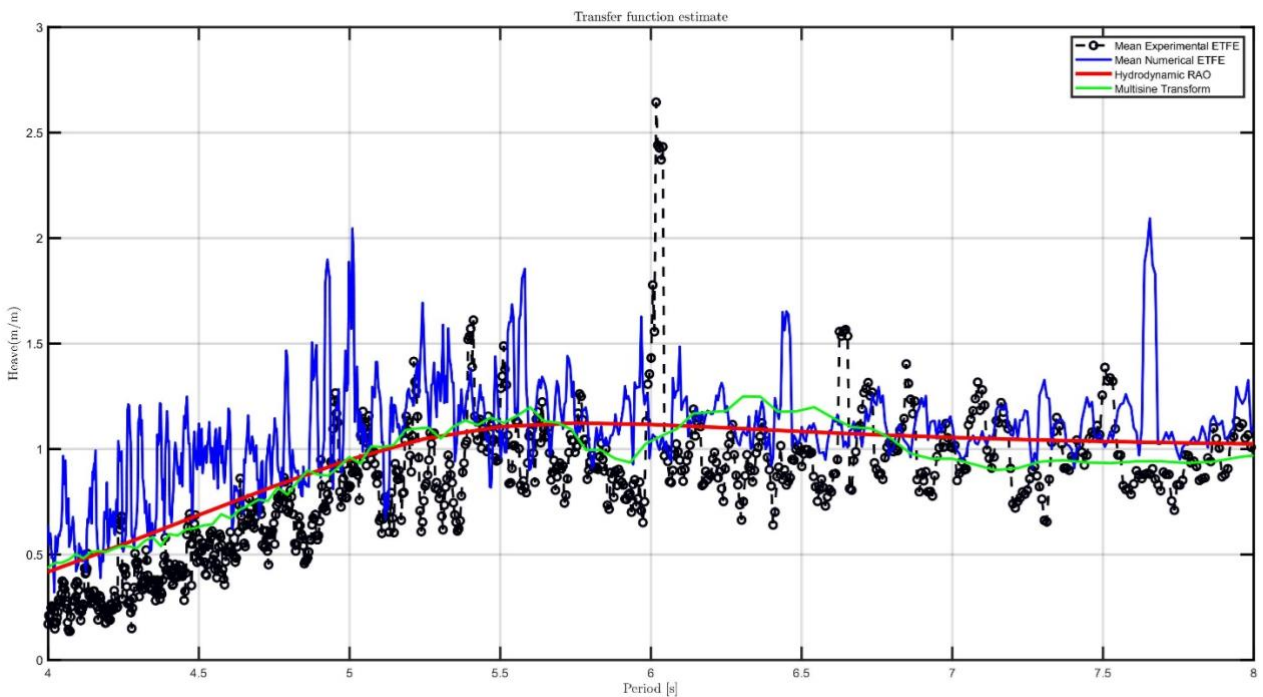


FIGURA 25-RAO MEDIO A SUSSULTO: SPERIMENTALE VS MODELLI NUMERICI

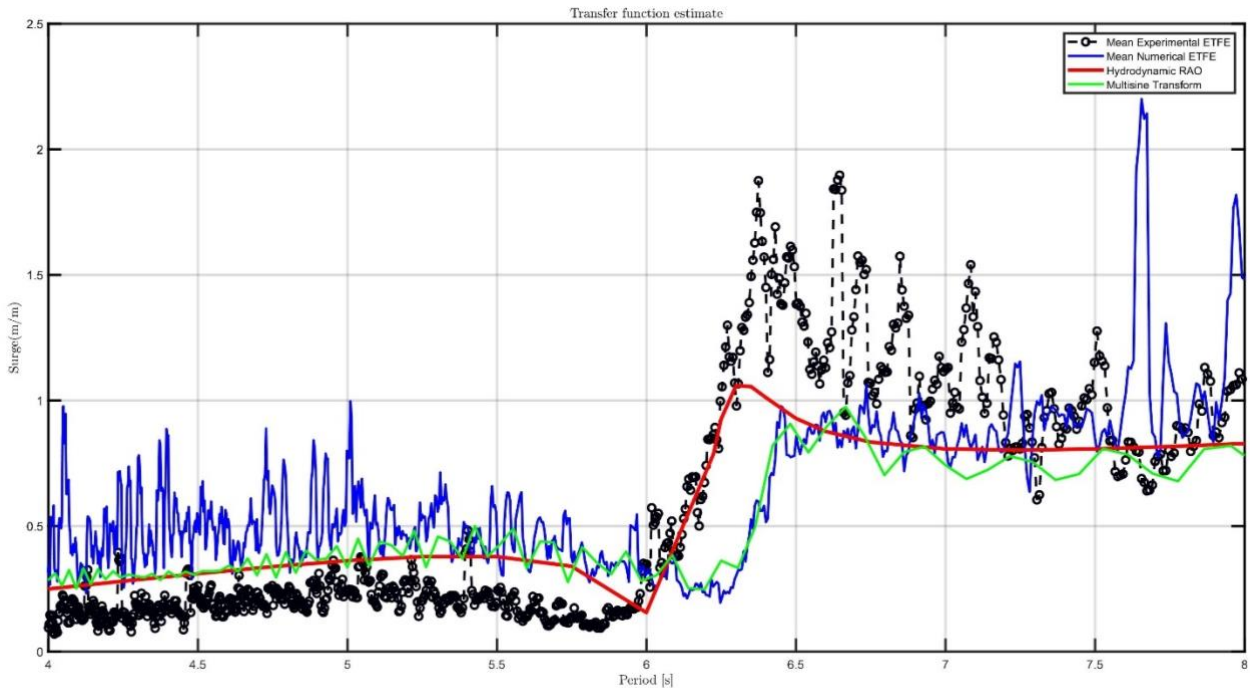


FIGURA 26- RAO MEDIO AD ABBRIVIO: SPERIMENTALE VS MODELLI NUMERICI

Carichi ormeggio

Per la determinazione dei carichi agenti sull'ormeggio sono stati seguiti due approcci:

- Determinazione statistica del carico più probabile
- Determinazione della funzione di trasferimento Carico/Surge in funzione del periodo d'onda

Riferendosi al secondo approccio proposto, è stata seguita la stessa metodologia adottata per determinare il RAO medio per i moti di beccheggio, sussulto e abbrivio a differenza che il rapporto tra le Trasformate di Fourier viene effettuato tra il segnale di tensione delle linee cariche e il segnale di abbrivio. Il risultato ottenuto è mostrato in Figura 28 e mostra lo stesso comportamento ottenuto per il RAO medio per il moto di abbrivio.

L'approccio statistico invece vuole determinare il carico dimensionante che si verifica con più probabilità. Lo stesso approccio è stato utilizzato per le condizioni estreme. In Figura 29 è mostrata una distribuzione del tipo "Generalized Extreme Distribution" realizzata tramite un fitting dei dati ottenuti dalle storie temporali delle tensioni sulle quattro linee d'ormeggio. I dati in questione sono ottenuti tramite l'applicazione della normativa DNV-RP-C205 -OS-E301 [7]:

- La base per le statistiche sui valori estremi è: la risposta massima tra due successivi incroci della media è definita un massimo globale (vedi Figura 27)
- Si presume che i massimi globali siano variabili stocastiche indipendenti, spesso modellate da una distribuzione "Generalized Extreme Value" [6]

In onda operativa, il modello stima accuratamente il valore del carico atteso, tutti i valori di MPM (Most Probable Maxima) sono riportati nelle figure in appendice.

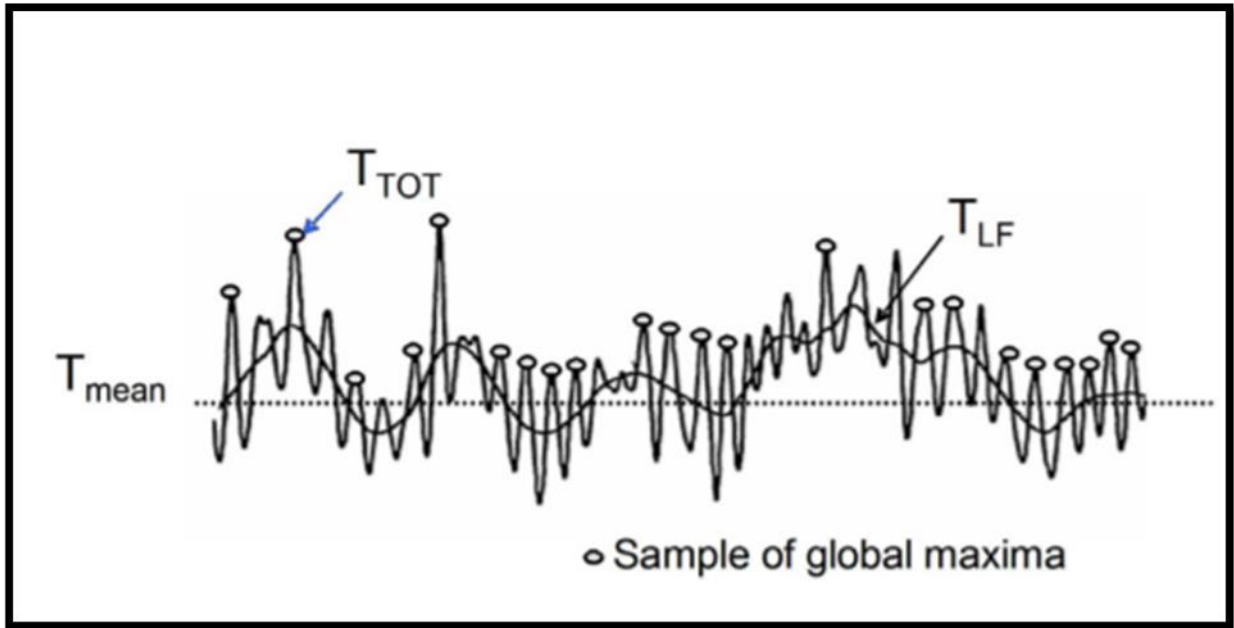


FIGURA 27- ESEMPIO DI CAMPIONAMENTO TENSIONE CON PEAK OVER TRESHOLD (POT) METHOD.

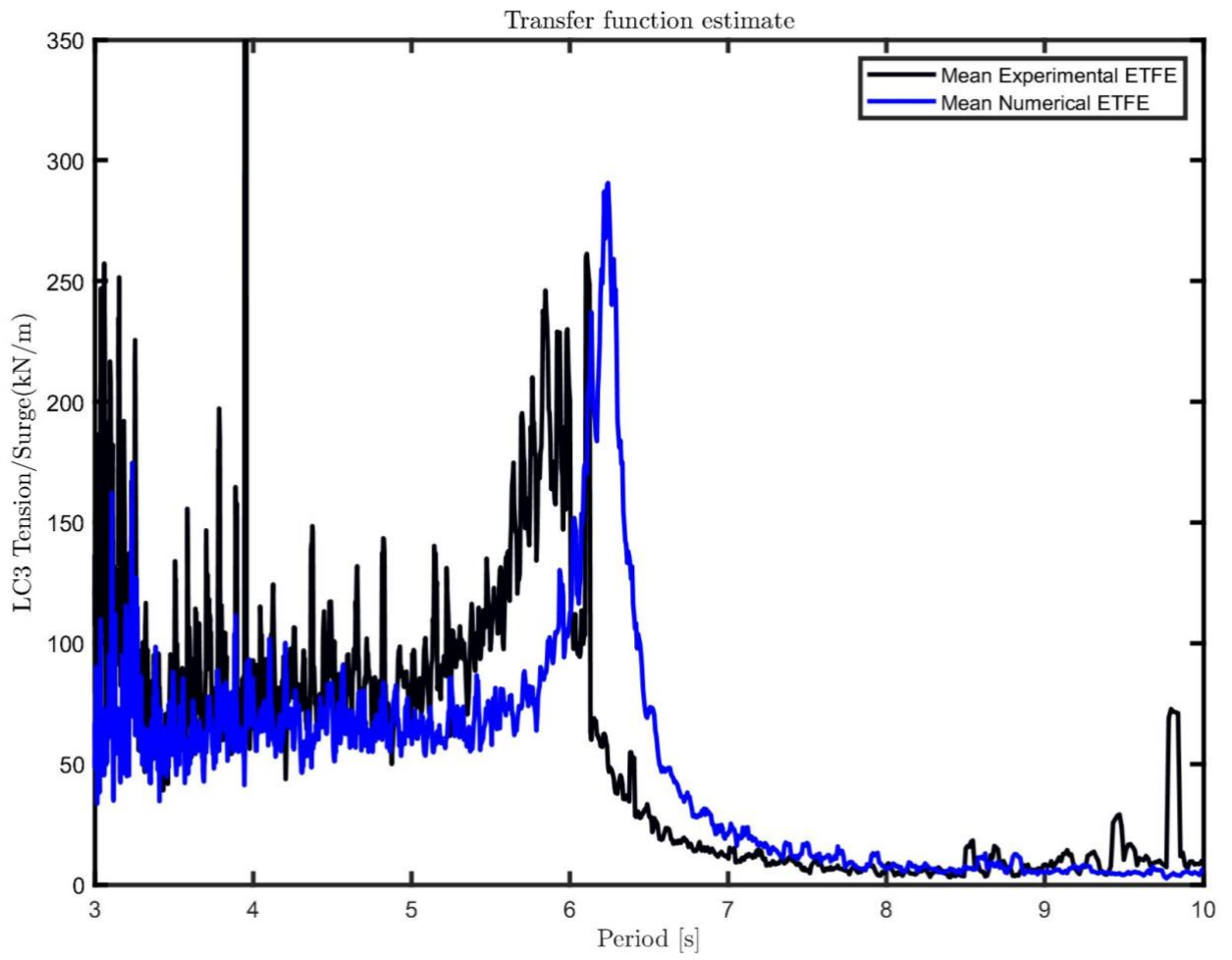


FIGURA 28-TENSIONE ALLA FAIRLEAD 3 SU SURGE IN FUNZIONE DEL PERIODO D'ONDA

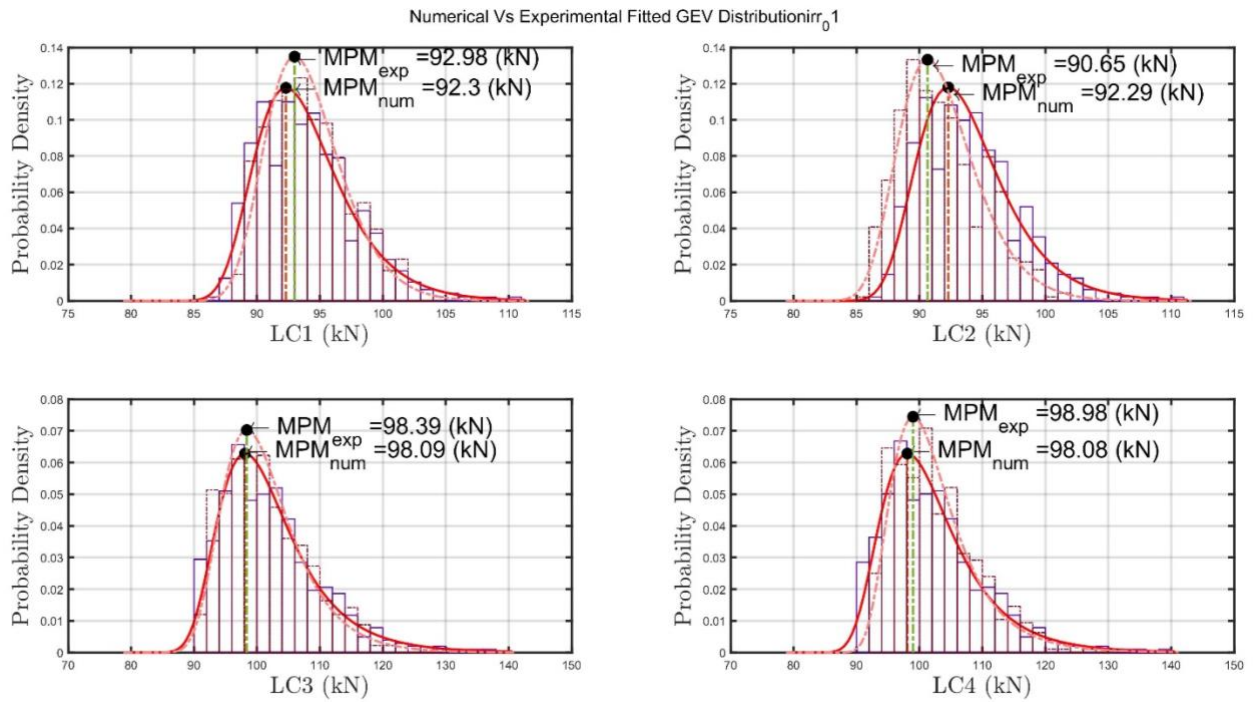


FIGURA 29- MPM PER L'ONDA IRREGOLARE 01

3.4 Onda estrema regolare

Per l'onda estrema regolare vengono tenute in considerazione le stesse grandezze analizzate per le onde operative, vale a dire moti e tensioni. In questo caso l'onda estrema viene post-processata e implementata in input ai modelli numerici come fatto per le onde operative regolari.

Come si vede in Figura 30, il modello Orcaflex, che essendo un modello basato sulla teoria a potenziale [5], non considerando effetti viscosi o effetti non-lineari dovuti alla variazione di superficie bagnata e agli spigoli vivi, sovrastima la risposta a beccheggio del dispositivo cosa che invece non succede nel modello CFD in cui tutte le non linearità del problema sono tenute in considerazione. Anche la stima del surge del dispositivo, come quella delle tensioni relativa alla cella di carico LC4 viene effettuata con buon risultato da entrambi i modelli numerici.

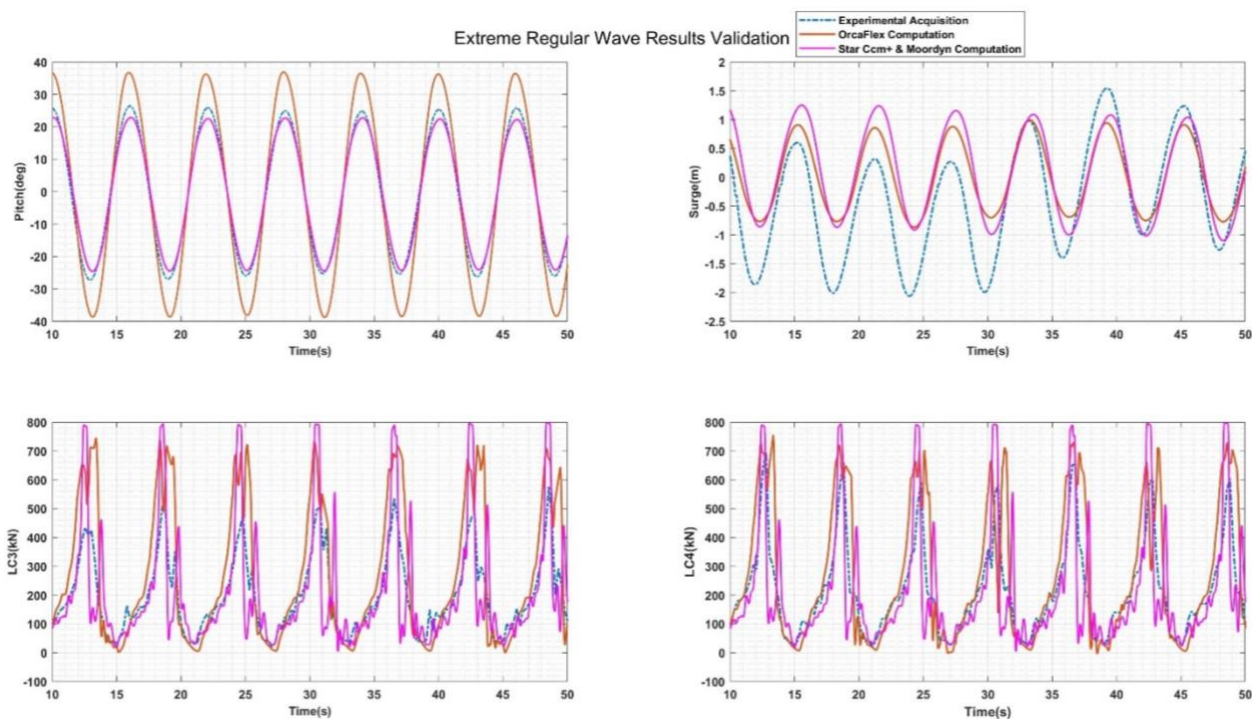


FIGURA 30-PITCH, SURGE E TENSIONI ALLE FAIRLEADS IN ONDA ESTREMA REGOLARE

3.5 Onda estrema irregolare

Per l'onda estrema irregolare individuata nel Deliverbale LA1-15[1], le simulazioni numeriche sono state svolte implementando su Orcaflex ciascuno degli spettri ottenuti dall'acquisizione della storia temporale dell'onda generata in vasca prova. Sono state effettuate tre realizzazioni per l'onda estrema. Nel sottoparagrafo seguente, vengono mostrati i risultati ottenuti effettuando la Power Spectral Density (PSD) dell'acquisizione sperimentale e del modello numerico.

Cinematica

In Figura 31 sono riportate le PSD del segnale relativo al moto di beccheggio in onda estrema. Il grafico in alto a sinistra dell'immagine è relativo alla prima realizzazione dell'onda estrema (seme 1), mentre alla sua destra quella relativa alla seconda. In basso a sinistra invece è riportata la PSD afferente alla terza realizzazione. In basso a destra della Figura 31 è riportata la PSD mediata sulle tre realizzazioni. In Figura 32 è riportata la PSD media espressa in Decibel e in funzione non della frequenza d'onda ma del periodo. Dalle figure sopra citate è possibile notare come il modello numerico stimi accuratamente, anche in onda estrema, il comportamento a beccheggio del dispositivo ormeggiato. La stessa considerazione può essere fatta relativamente al moto di sussulto, di cui i risultati sono riportati in Figura 33 e Figura 34. Come detto precedentemente, a causa delle incertezze nel setup sperimentale ed alla disposizione iniziale delle zavorre sul fondo virtuale, il modello numerico non riesce a predire accuratamente il comportamento in abbrivio del dispositivo ormeggiato. In Figura 35 e Figura 36 si vede come il modello numerico sovrastimi la riposta.

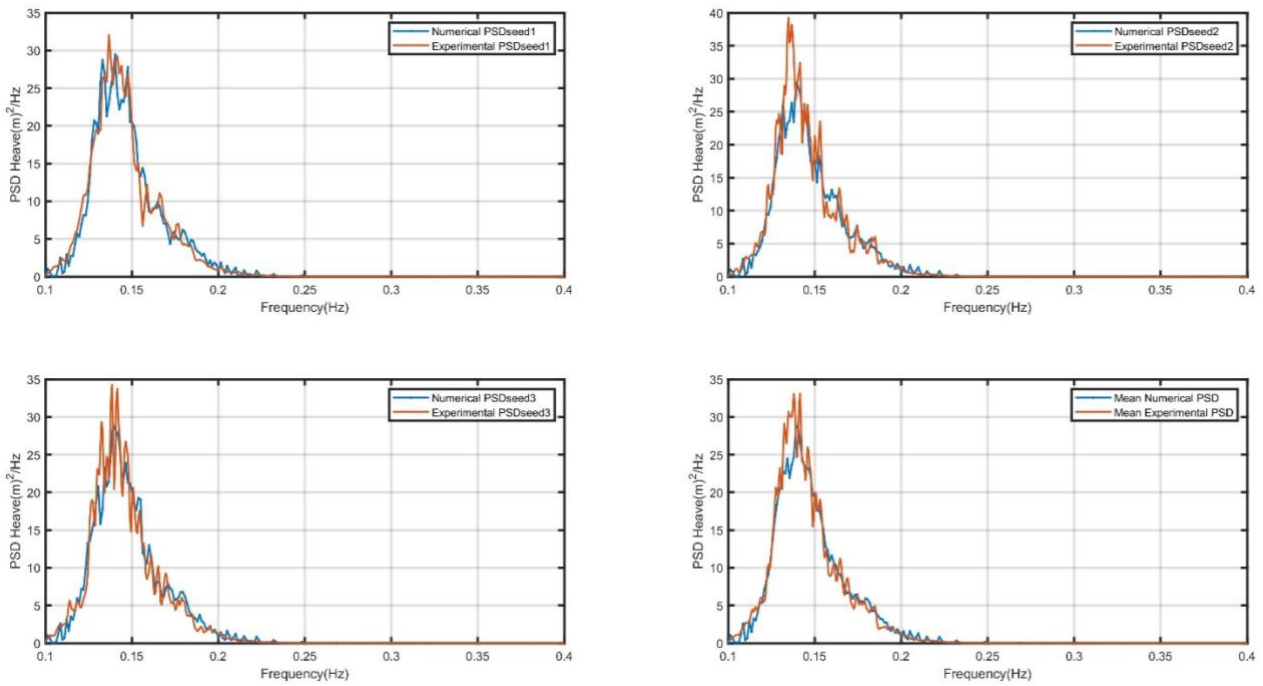


FIGURA 31- PSD A BECCHEGGIO NUMERICA VS SPERIMENTALE PER LA SINGOLA REALIZZAZIONE E MEDIATA SULLE TRE REALIZZAZIONI

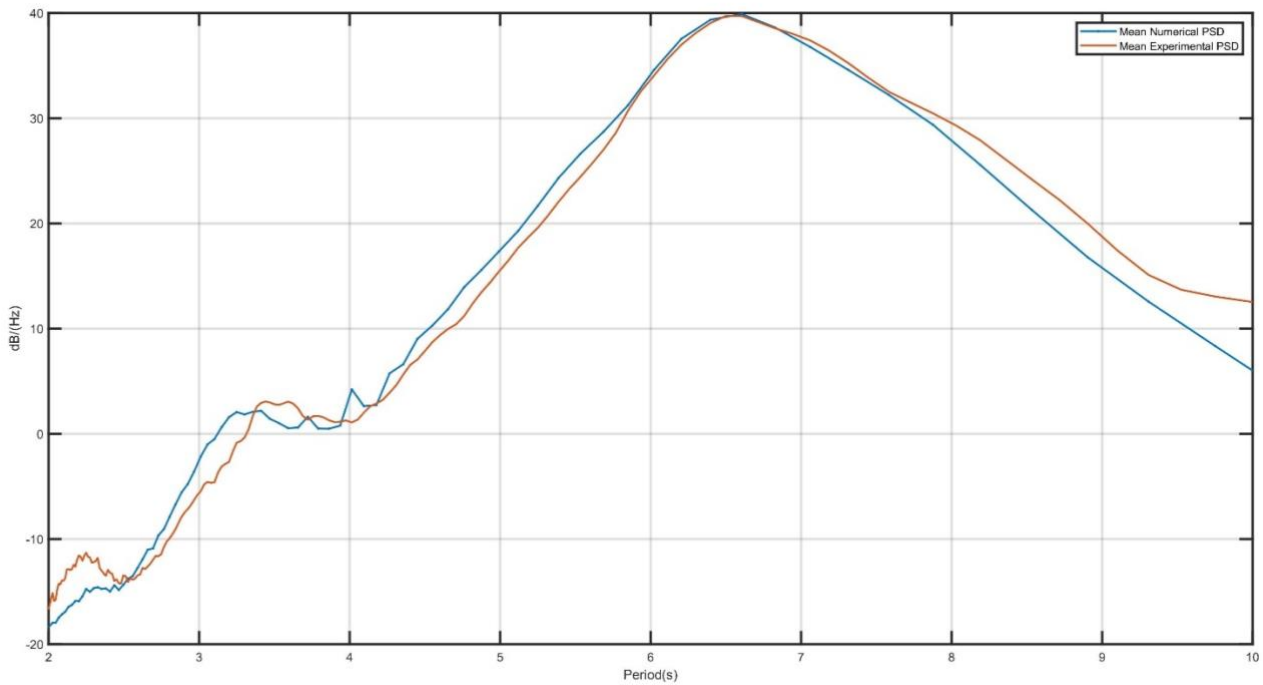


FIGURA 32- PSD A BECCHEGGIO NUMERICA VS SPERIMENTALE IN FUNZIONE DEL PERIODO D'ONDA RIPORTATA IN DECIBEL

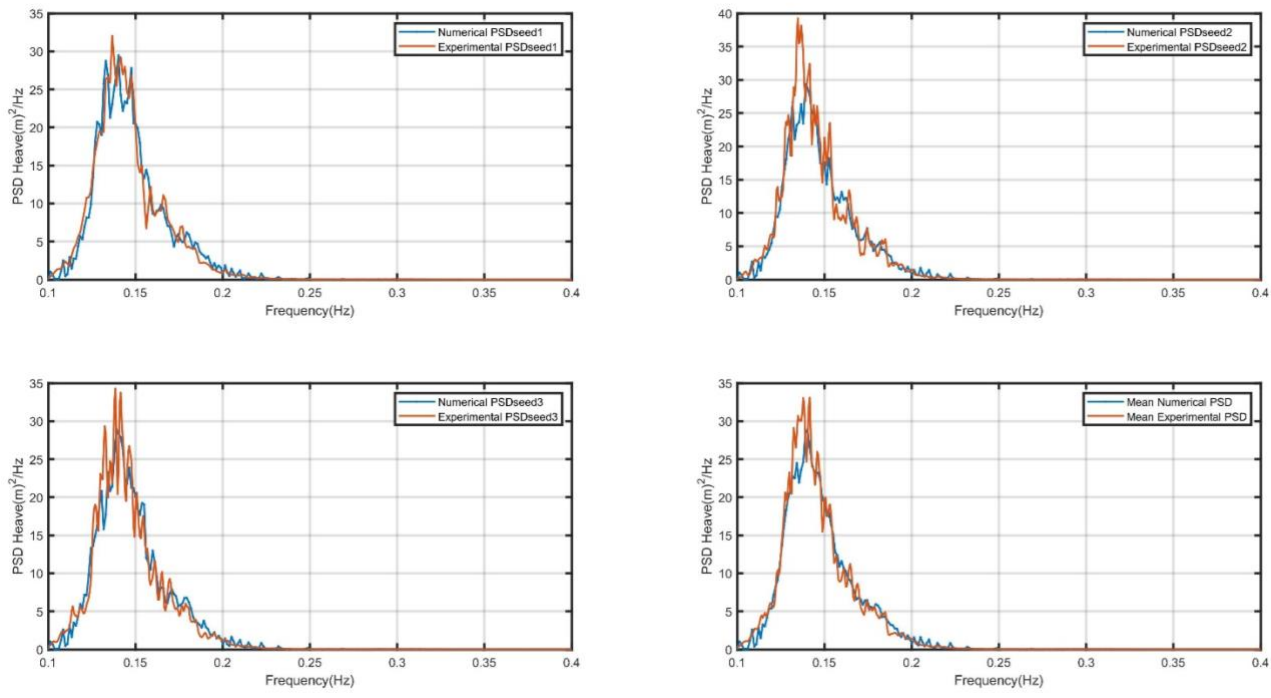


FIGURA 33- PSD A SUSSULTO NUMERICA VS SPERIMENTALE PER LA SINGOLA REALIZZAZIONE E MEDIATA SULLE TRE REALIZZAZIONI

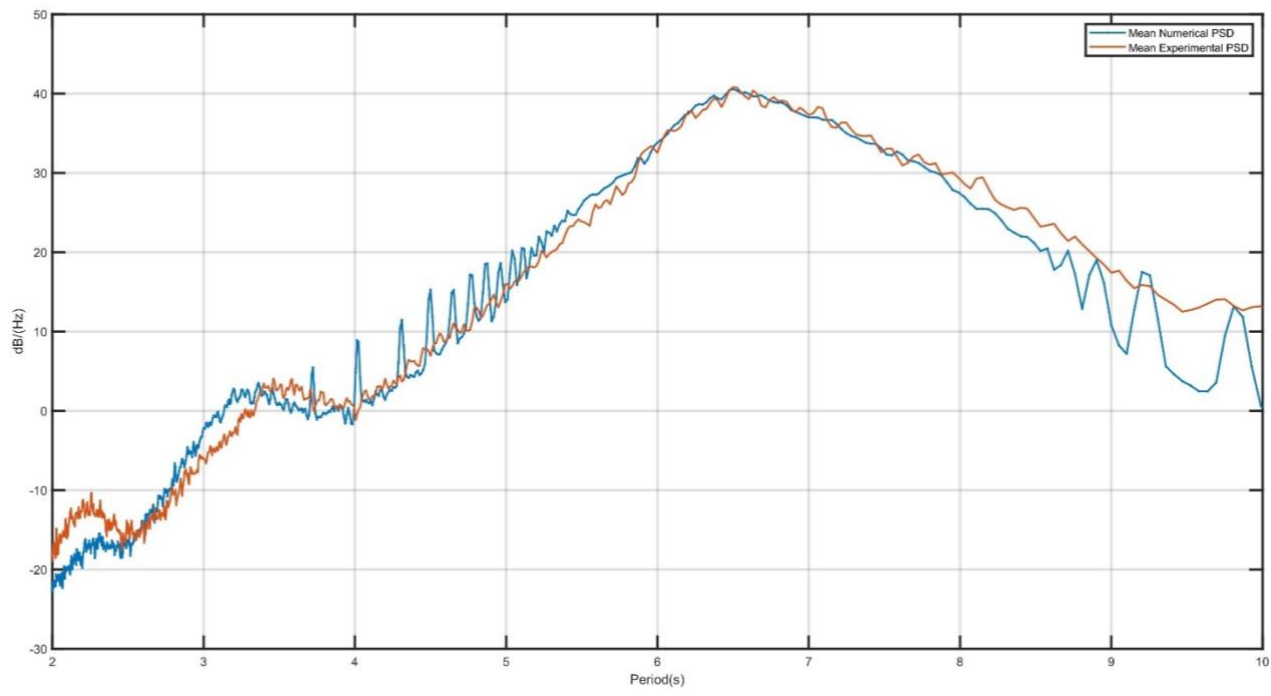


FIGURA 34- PSD A SUSSULTO NUMERICA VS SPERIMENTALE IN FUNZIONE DEL PERIODO D'ONDA RIPORTATA IN DECIBEL

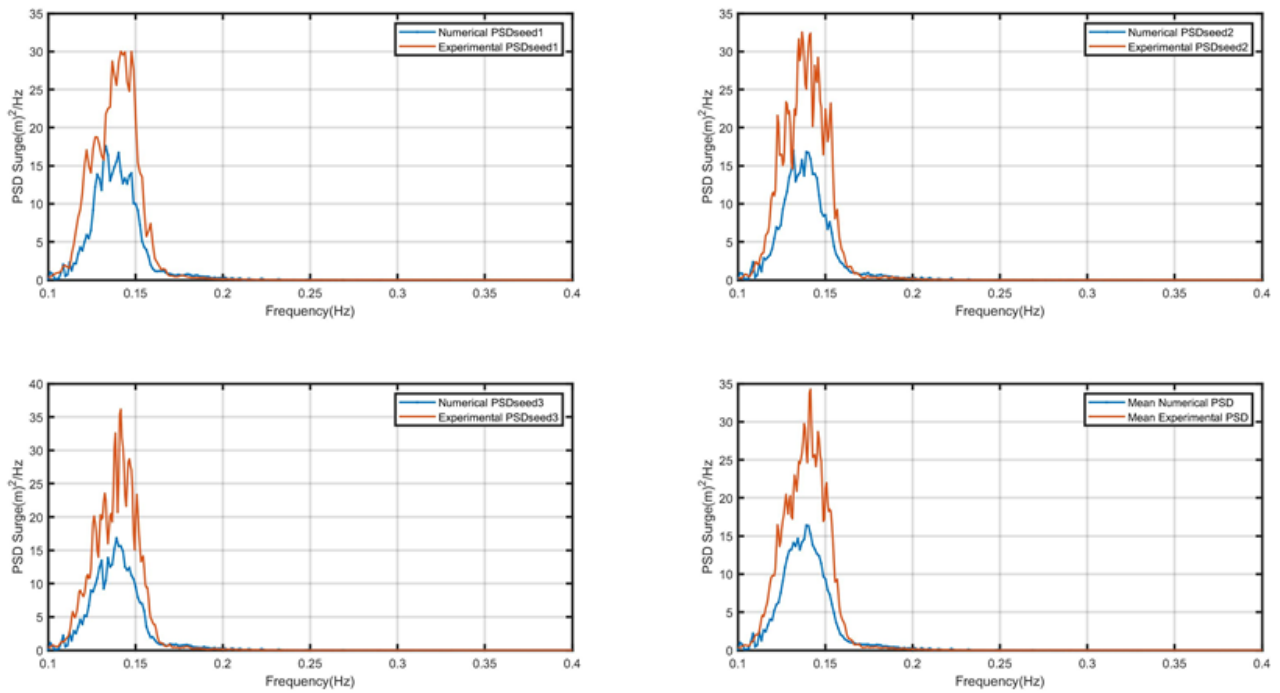


FIGURA 35- PSD AD ABBRIVIO NUMERICA VS SPERIMENTALE PER LA SINGOLA REALIZZAZIONE E MEDIATA SULLE TRE REALIZZAZIONI

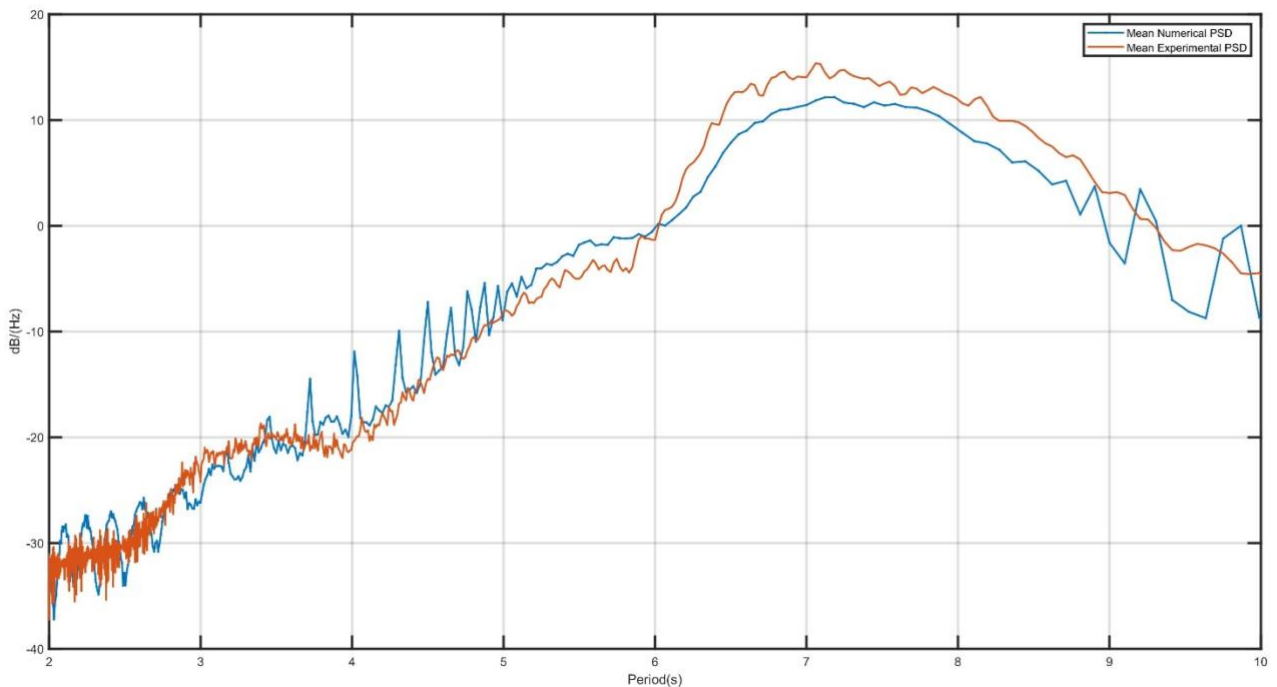


FIGURA 36- PSD AD ABBRIVIO NUMERICA VS SPERIMENTALE IN FUNZIONE DEL PERIODO D'ONDA RIPORTATA IN DECIBEL

Carichi ormeggio

Particolare attenzione va posta alla determinazione del carico dimensionante le linee d'ormeggio in onda estrema. In accordo con la metodologia DNVGL-OS-E301 [6] sono stati determinati i "Global Maxima" (vedi Figura 27) delle storie

temporali di ciascuna realizzazione che servono a costruire una distribuzione statistica e partire dalla quale viene identificato il carico estremo dimensionante. In Figura 37, Figura 38 e Figura 39 è riportato il confronto tra la distribuzione generata sulla base dei carichi ottenuti da modello numerico e prova sperimentale rispettivamente per la realizzazione n.1, realizzazione n.2 e realizzazione n.3. In tutti i casi, la distribuzione creata attraverso i carichi ottenuti dal modello numerico è conforme a quella ottenuta sperimentalmente fornendo un carico massimo più probabile leggermente più elevato di quello sperimentale. Quando le distribuzioni statistiche delle linee d’ormeggio cariche in onda estrema sono conformi tra loro si può asserire che i modelli numerici utilizzati sono affidabili per la progettazione delle linee d’ormeggio del dispositivo. Durante la fase di dimensionamento delle linee, infatti, si procede con l’individuazione dei contorni ambientali afferenti al sito di installazione e la generazione delle onde estreme. Ogni onda viene simulata con dieci semi diversi e per ogni simulazione viene preso il massimo della tensione per ciascuna storia temporale, con tutti i massimi selezionati viene generata la distribuzione statistica e il massimo più probabile viene utilizzato come valore di progetto. Figura 37- Massimo Più probabile per la realizzazione 1 risultato aggiunge una validazione pratica ad una forte base statistica durante il design delle linee d’ormeggio. Tale metodologia, infatti, essendo anche conforme a tutte le norme vigenti, può essere considerata come metodologia cardine quando si dimensiona un sistema d’ormeggio per wave energy converters di questo tipo.

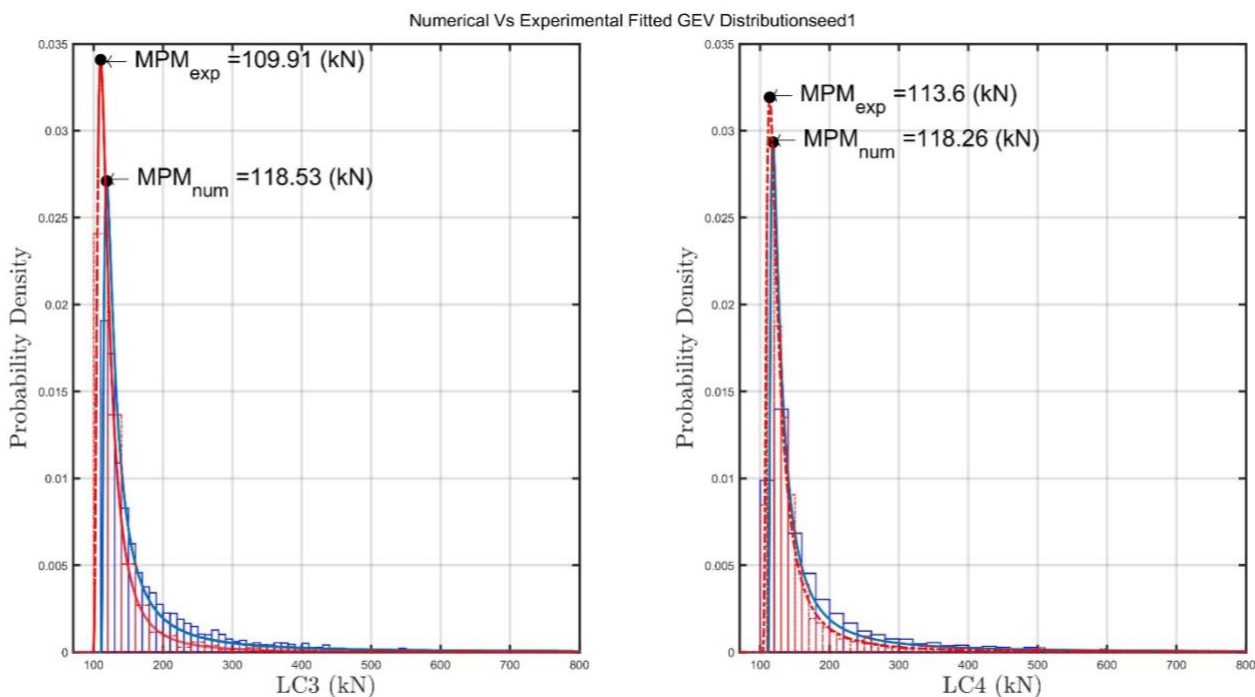


FIGURA 37- MASSIMO PIÙ PROBABILE PER LA REALIZZAZIONE 1

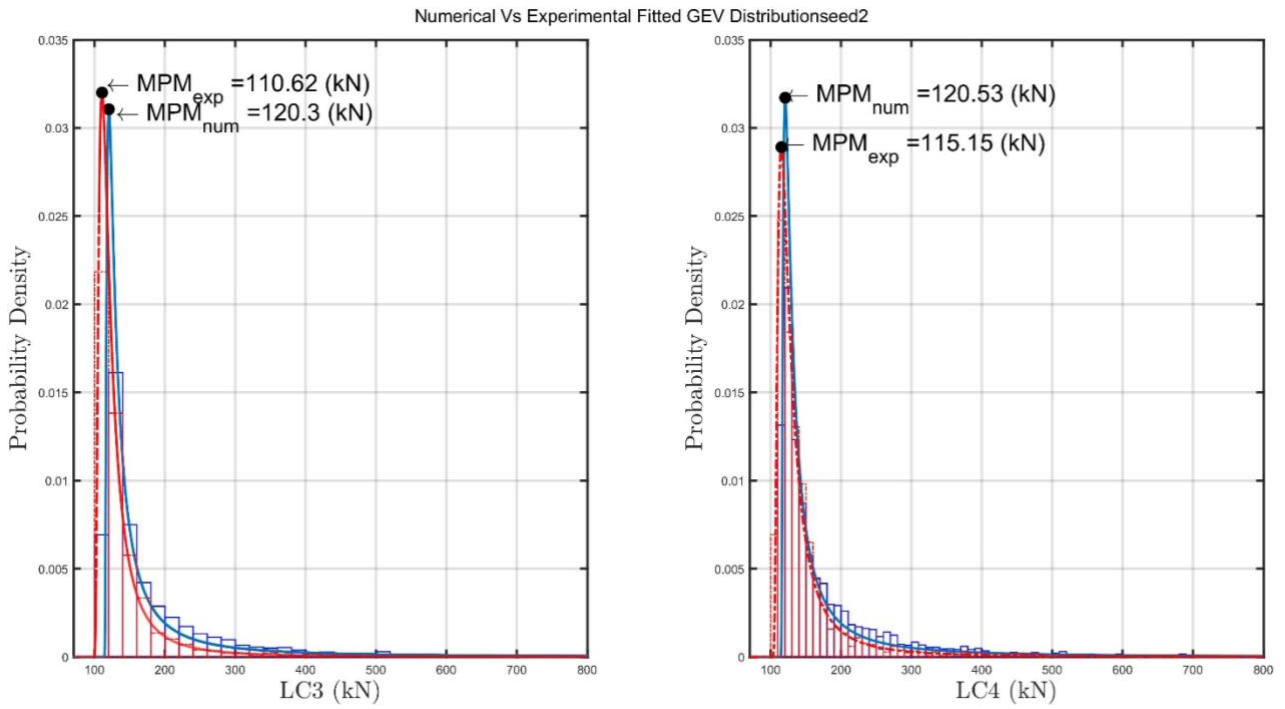


FIGURA 38- MASSIMO PIÙ PROBABILE PER LA REALIZZAZIONE 2

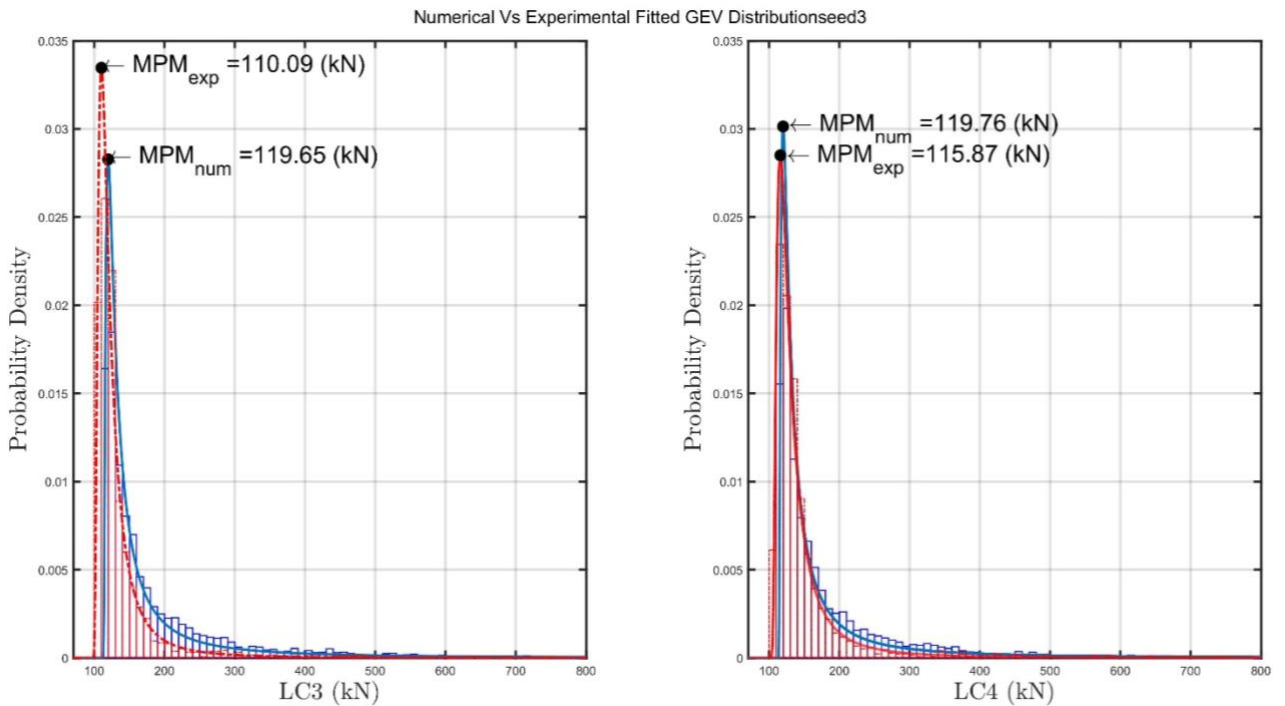


FIGURA 39- MASSIMO PIÙ PROBABILE PER LA REALIZZAZIONE 3

4 Conclusioni

I risultati riportati nel presente documento, mostrano come i modelli numerici riescano a stimare accuratamente il comportamento di PeWEC ormeggiato in termini di predizione di moti nave e tensioni dimensionanti agenti sulle linee d'ormeggio. Le validazioni effettuate non sono solo relative a singole prove ma portano con sé una base statistica su predizione e stima di parametri dimensionanti come, per esempio, la tensione dimensionante agente sulle linee d'ormeggio che è ottenuta attraverso la stima di una distribuzione statistica. Inoltre, essendo la validazione focalizzata sulla risposta in frequenza del sistema completo, essa può essere riferita a stati di mare qualunque con spettri definiti nel range di frequenze identificati durante la campagna sperimentale. Tale peculiarità consente di poter traslare la metodologia di design anche in altri siti di installazione semplicemente modificando le condizioni ambientali dei modelli numerici. Ciò consiste nella generazione di diverse onde operative ed estreme e regolazione del sistema di ormeggio rispetto alla profondità del sito.

La validazione dei modelli numerici è stata realizzata in modo da soddisfare i seguenti obiettivi:

- Validazione con confronto dei moti scafo in onda operativa per la futura stima di produzione energetica
- Validazione con confronto dei moti scafo in onda estrema per la verifica della bontà del modello sotto condizioni non-lineari.
- Validazione delle tensioni dimensionanti ottenute da modello agenti sulle linee d'ormeggio.
- Confronto dettagliato di modello ad alta fedeltà (CFD+ormeggio) al fine di ottenere un tool affidabile per la verifica dei risultati dei modelli a più bassa fedeltà e calcolo di coefficienti dovuti a non-linearità del sistema.

Si è visto come, allontanandosi da condizioni di linearità il modello Orcaflex risulta sovrastimare leggermente i moti scafo e quindi le tensioni mentre il modello CFD risulta ovviamente più accurato.

5 Bibliografia

- [1] B. Fenu, M. Serra, F. Niosi, S. Sirigu, G. Bracco, and G. Mattiazzo, "LA1 . 15 : Prototipazione ed esecuzione della campagna sperimentale," pp. 1–66.
- [2] F. Niosi, O. D. Edera, S. Sirigu, G. Bracco, and G. Mattiazzo, "LA1 . 13 : Implementazione in ambiente CFD del convertitore."
- [3] B. Paduano *et al.*, "Experimental validation and comparison of numerical models for the mooring system of a floating wave energy converter," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 8, no. 8, pp. 1–20, 2020, doi: 10.3390/JMSE8080565.
- [4] M. Fontana, P. Casalone, S. A. Sirigu, G. Giorgi, G. Bracco, and G. Mattiazzo, "Viscous damping identification for a wave energy converter using CFD-URANS simulations," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 8, no. 5, 2020, doi: 10.3390/JMSE8050355.
- [5] Orcina, "www.orcina.com/webhelp/OrcaFlex/," 2021. .

6 Appendice

	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

TABELLA ONDE REGOLARI STEEPNESS 1:30

	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

TABELLA ONDE REGOLARI STEEPNESS 1:50

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%

TABELLA ONDE IRREGOLARI

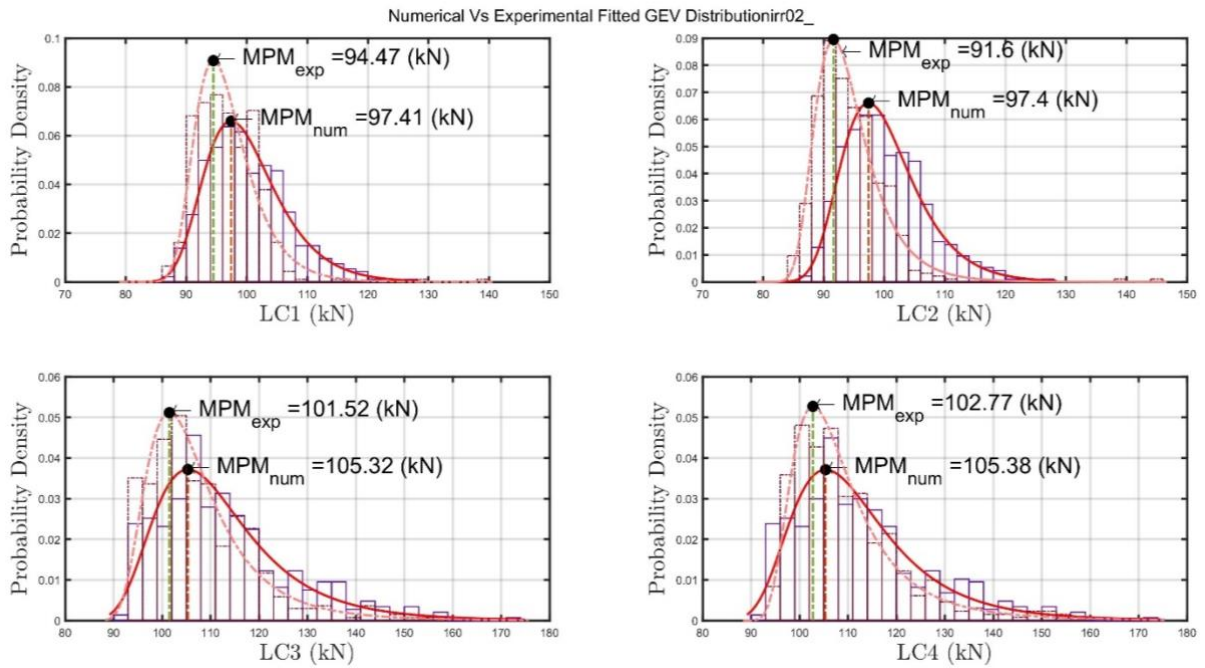


FIGURA 40- MPM PER L'ONDA IRREGOLARE 02

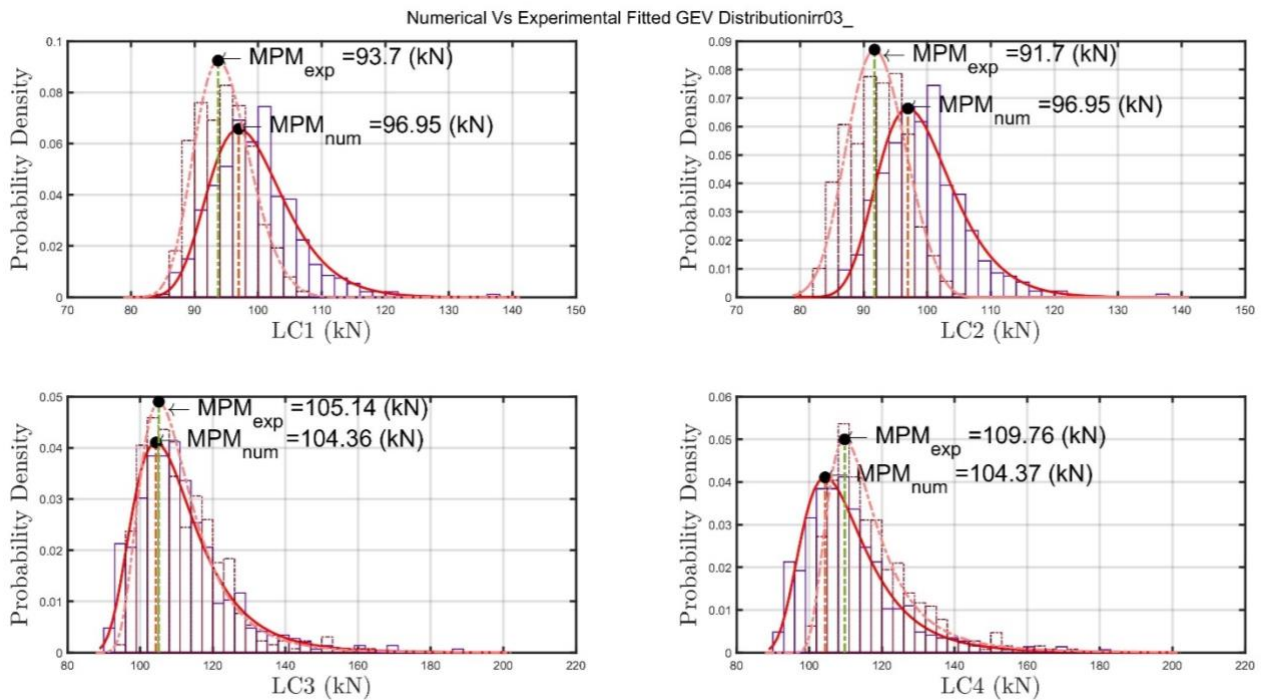


FIGURA 41- MPM PER L'ONDA IRREGOLARE 03

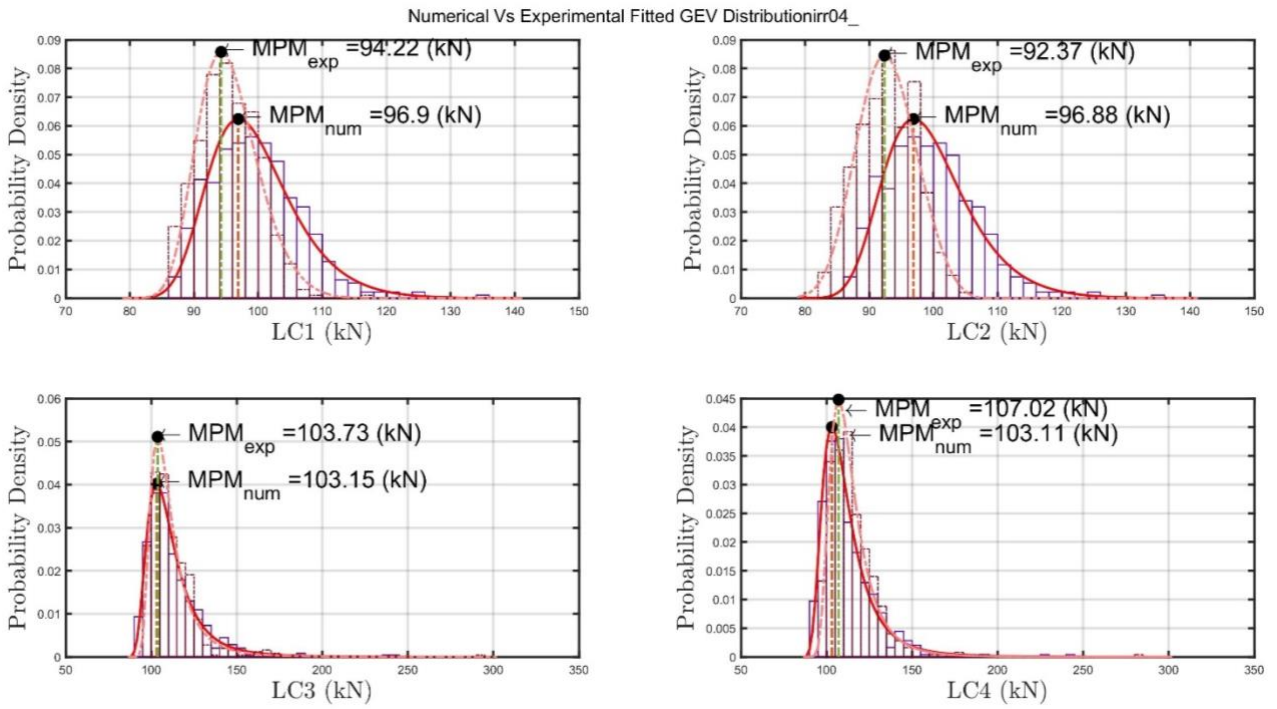


FIGURA 42- MPM PER L'ONDA IRREGOLARE 04

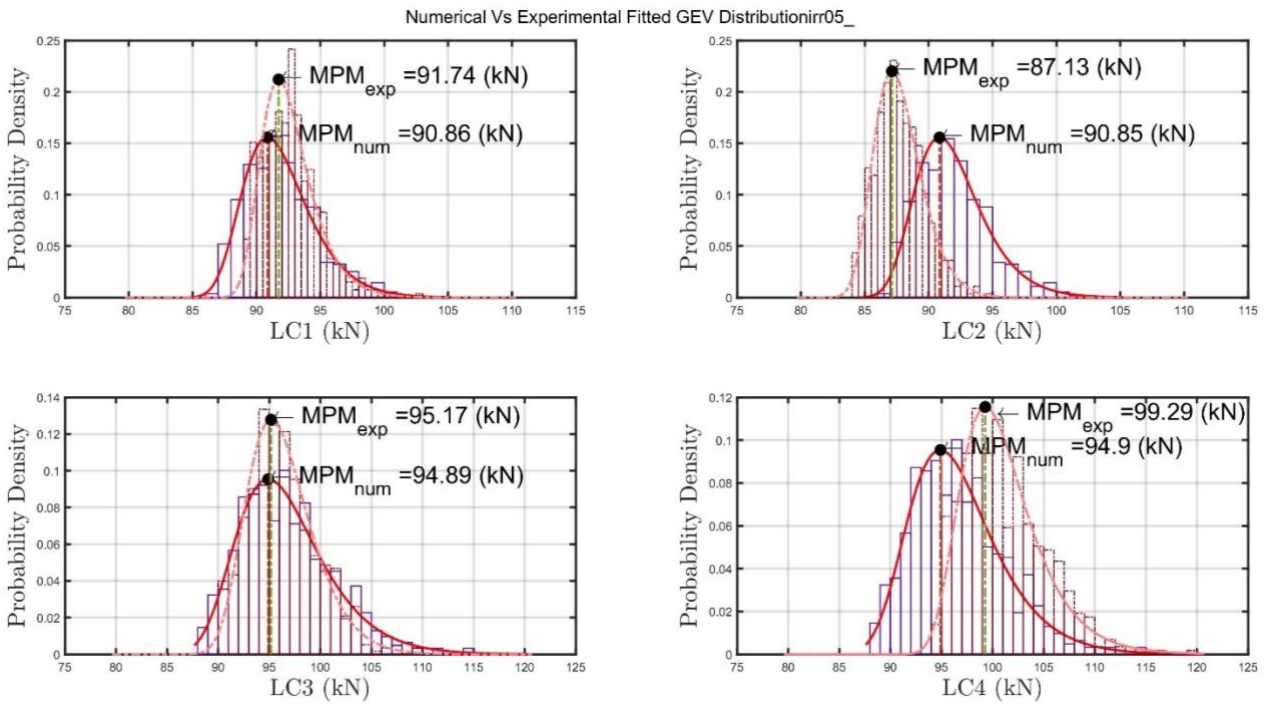


FIGURA 43- MPM PER L'ONDA IRREGOLARE 05

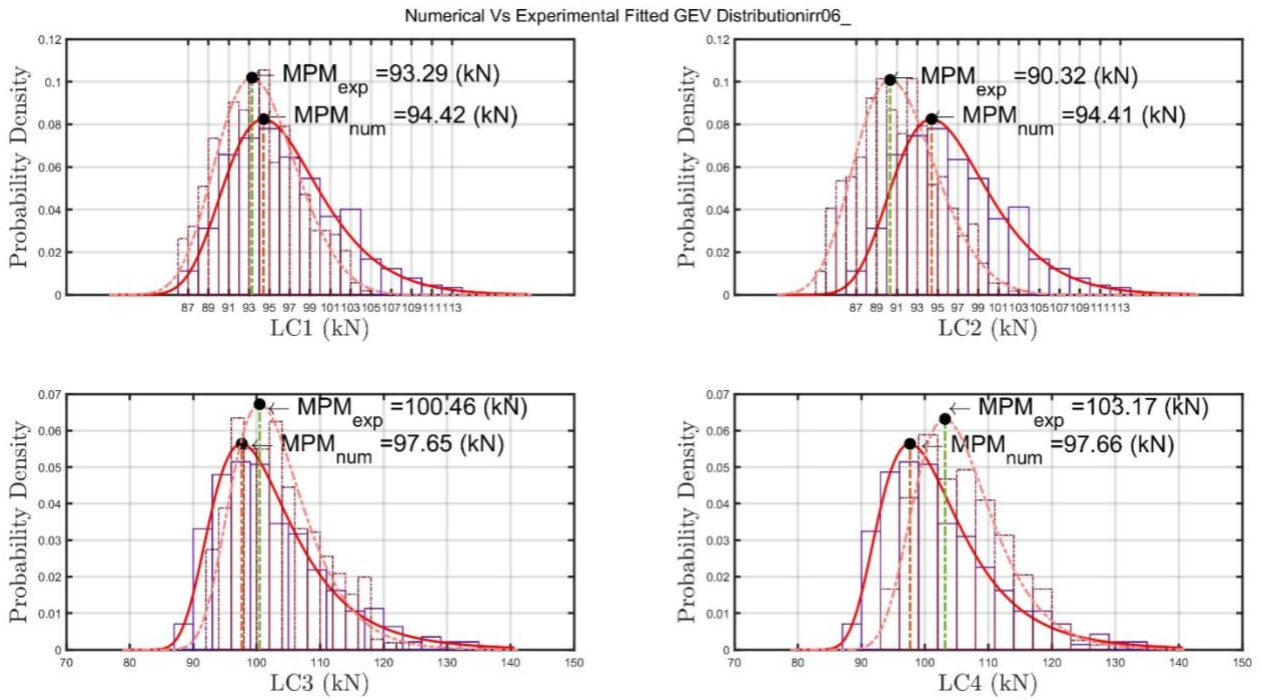


FIGURA 44- MPM PER L'ONDA IRREGOLARE 06

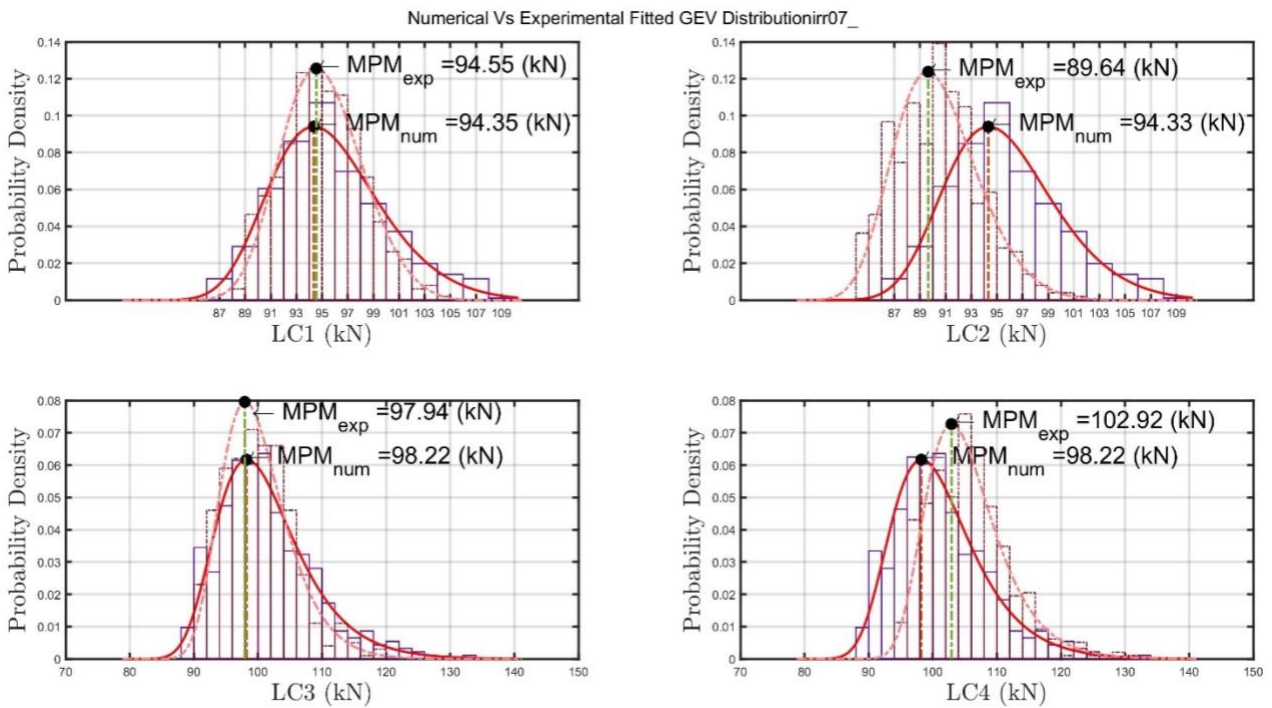


FIGURA 45- MPM PER L'ONDA IRREGOLARE 07

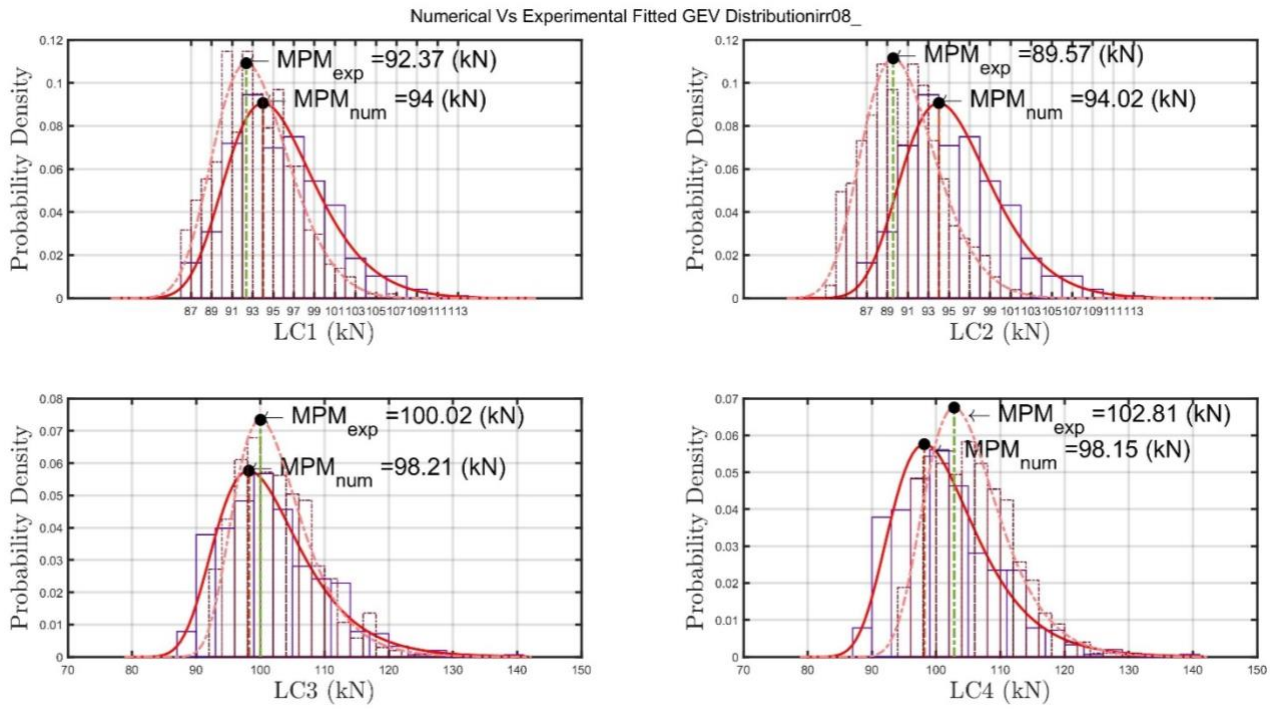


FIGURA 46- MPM PER L'ONDA IRREGOLARE 08