

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI

“FEDERICO II”



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA INDUSTRIALE

XXX CICLO

ELABORATO FINALE

Unità *FPSO* – Sistema di Ormezzo e Criticità

Napoli, Italia 2018

Tutor  
Ch.mo Prof. Ing.  
ANTONIO CAMPANILE

Dottorando:  
Ing.  
ALFREDO DELLA GATTA

Ch.mo Prof. Ing.  
GUIDO BOCCADAMO

*A chi c'era, che forse mi osserva con orgoglio,  
A chi c'è, per la forza che mi dà ogni giorno,  
A chi ancora non c'è, che in fondo di tutto quanto è il senso.*

## INDICE

<b>PREMESSA .....</b>	<b>5</b>
<b>Tematica della Ricerca .....</b>	<b>5</b>
Scopo del lavoro.....	5
Legenda dei simboli ed acronimi .....	6
<b>CAPITOLO 1 .....</b>	<b>7</b>
<b>Generalità.....</b>	<b>7</b>
1.1 Introduzione .....	7
1.2 Strutture <i>Offshore</i> .....	7
<b>CAPITOLO 2 .....</b>	<b>10</b>
<b>Sistema <i>FPSO</i> .....</b>	<b>10</b>
2.1 Generalità .....	10
2.2 Scafo e Ormezzo.....	11
2.3 Topside.....	15
<b>CAPITOLO 3 .....</b>	<b>18</b>
<b>Definizione dei dati di Progetto.....</b>	<b>18</b>
3.1 Introduzione .....	18
3.2 Caratteristiche principali dell'unità.....	18
<b>CAPITOLO 4 .....</b>	<b>21</b>
<b>Heading Analysis.....</b>	<b>21</b>
4.1 Introduzione .....	21
4.2 Descrizione del sistema d'ormeggio.....	21
4.3 Modello dell' <i>FPSO</i> .....	23
4.4 Heading Analysis .....	25
4.5 Risultati .....	31
<b>CAPITOLO 5 .....</b>	<b>38</b>
<b>Moti Nave.....</b>	<b>38</b>
5.1 Funzioni di Trasferimento - RAO .....	38
5.2 Moti Nave ed Accelerazioni.....	56
<b>CAPITOLO 6 .....</b>	<b>69</b>
<b>Mooring Strength and Fatigue Analysis .....</b>	<b>69</b>
6.1 Introduzione .....	69
6.2 Modello del Sistema di Ormezzo .....	71
6.3 Analisi dei carichi agenti.....	74
6.4 Metodologia .....	85
6.5 Risultati Mooring Analysis .....	87

6.6	Analisi a Fatica del sistema di ormeggio .....	94
6.7	Risultati Mooring Fatigue Life .....	103
<b>CAPITOLO 7</b>	.....	<b>107</b>
	<b>Risultati della ricerca.....</b>	<b>107</b>
7.1	Introduzione .....	107
7.3	Topside.....	109
<b>CAPITOLO 8</b>	.....	<b>115</b>
	<b>Conclusioni .....</b>	<b>115</b>
8.1	Premessa.....	115
8.2	Sintesi dell'elaborato.....	115
8.3	Conclusioni .....	116
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	.....	<b>117</b>

# Premessa

## Tematica della Ricerca

### Scopo del lavoro

Il lavoro svolto durante il corso di dottorato, ha riguardato il progetto di massima di una unità navale **Floating Production Storage and Offloading** da installare al largo delle coste dell'Africa Occidentale, ormeggiata con torretta esterna non disconnettibile.

Scelta la carena, si è proceduto con il dimensionamento strutturale, con la definizione dei volumi da dedicare al carico, alla stima dei pesi e alle criticità che questo particolare tipo di strutture riscontra in merito alla stabilità.

Nel lavoro di tesi è riportata la parte conclusiva del progetto, riguardante lo studio del sistema di ormeggio, da cui si sono ottenute indicazioni utili ai progettisti nelle fasi preliminari di un nuovo studio.

## **Legenda dei simboli ed acronimi**

Al fine di semplificare la comprensione al lettore, si riporta di seguito il significato dei simboli e degli acronimi utilizzati nel testo.

**ABS** - American Bureau of Shipping

**B** - Larghezza Nave

**C<sub>B</sub>** - Coefficiente di Blocco

**CS** - Classification Society

**D** - Altezza di costruzione

**DNV** - Det Norske Veritas

**FPI** - Floating Production Installation

**HS** - Altezza significativa d'onda

**L** - Lunghezza nave

**L<sub>BP</sub>** - Lunghezza tra perpendicolari

**L<sub>OA</sub>** - Lunghezza fuori tutto

**NPD** - Norwegian Petroleum Directorate

**QTF** - Quadratic Transfer Function

**RP** - Return Period

**SLF** - Single Line Failure

**SVR** - Steel Vessel Rules

**T<sub>P</sub>** - Periodo d'onda

**UPS** - Uninterruptible Power Supply

# Capitolo 1

## Generalità

### 1.1 Introduzione

La ricerca di risorse minerarie oceaniche risale alla seconda metà del XIX secolo. I primi brevetti di sistemi di trivellazione in mare risalgono al 1869 mentre le prime trivellazioni sottomarine si ebbero solo nel 1896, in California.

Attualmente è utilizzata una buona frazione delle potenziali risorse minerarie della piattaforma continentale ed una minore di quelle del bacino oceanico in quanto, quest'ultime, non sono adeguatamente valutate o il costo di esplorazione e sfruttamento di esse è ancora troppo elevato.

Dalla prima estrazione del 1947 nel Golfo del Messico, la produzione di idrocarburi offshore è andata progressivamente aumentando, estendendosi geograficamente al Golfo Persico, Mar del Nord, Alaska, Brasile, Africa e Oceania. Attualmente, il 50% della produzione globale di idrocarburi proviene da impianti *offshore*.

I progressi tecnologici permettono di migliorare le prestazioni degli strumenti di ricerca ed estrazione nei riguardi di un bene che diviene sempre più raro. Attualmente si assiste alla ricerca di giacimenti in acque profonde, con fondali superiori ai 4000 m.

### 1.2 Strutture *Offshore*

Una volta che i pozzi esplorativi confermano la presenza di serbatoi di gas naturale o di depositi di olio rilevanti, può essere opportuno realizzare un impianto di produzione *offshore*.

La scelta della struttura da utilizzare è funzione delle caratteristiche del contesto di installazione e della profondità del fondale.

Piattaforme fisse (figura 1.1-1) sono impiegate per profondità fino a 200 m e sono costituite da una struttura reticolare metallica immersa, *Jacket*, vincolata al suolo mediante la battitura di pali di fondazione, e da una parte emersa che permette di eseguire le operazioni di trivellazione e di produzione ospitando tutti gli impianti necessari. Per le ridotte capacità di stoccaggio, i prodotti dell'estrazione sono solitamente inviati a terra mediante condotte sottomarine.

Per condizioni meteo – oceanografiche difficili, fino a 350 m di profondità, si può valutare l'installazione di *Piattaforme a Gravità* (figura 1.1-2), strutture di grandi dimensioni costituite da una parte immersa adagiata sul fondo del mare, una parte emersa per ospitare gli impianti e da strutture di collegamento. Realizzate solitamente in calcestruzzo, rimangono ferme durante l'esercizio grazie al loro stesso peso, hanno bisogno di poca manutenzione e dispongono di grandi volumi per lo stoccaggio dei prodotti.

Per raggiungere profondità fino a 700 m contenendo i costi di investimento, si ricorre alle *Compliant tower* (figura 1.1-3), strutture reticolari fisse molto snelle e caratterizzate da sistemi complessi di stabilizzazione che rendono la struttura adeguatamente flessibile, in grado di resistere ai carichi ambientali e realizzare una frequenza naturale di oscillazione lontana da quella delle onde significative. La difficoltà ed i costi di installazione sono maggiori, si valuta il loro impiego solo in caso di giacimenti molto estesi.

Giacimenti in profondità di 1500 m circa possono essere sfruttati con l'impiego di *Tension Leg Platform* (figura 1.1-4), strutture galleggianti tenute in posizione verticale da tubi o cavi in tensione. L'assenza del collegamento rigido con il fondo le rende particolarmente resistenti agli uragani del golfo del Messico ma sono caratterizzate da limitate capacità di stoccaggio.

Le piattaforme *Spar* (fig. 1.1-5) riescono a coltivare giacimenti con altezza di fondale fino a 3000 m. Sono costituite da una parte cilindrica galleggiante su cui sono installati gli impianti di produzione, la struttura è vincolata al fondo con sistemi a catenaria che la rendono stabile anche in condizioni meteo impegnative.

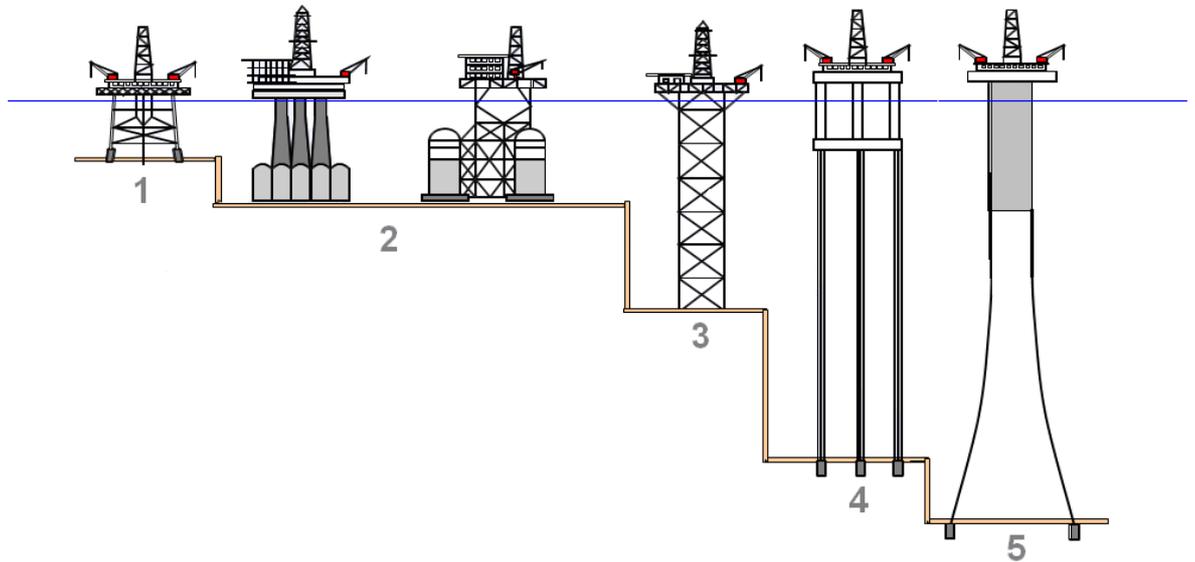


Figura 1.1 Strutture di produzione offshore

Per elevate profondità d'acqua, quando si necessita di numerosi impianti e di notevoli capacità di stoccaggio, la scelta può ricadere su un sistema *FPSO*, una struttura galleggiante dalla forma tipicamente navale, ormeggiata in corrispondenza delle teste pozzo. In seguito si riporta una descrizione dettagliata di tali mezzi in quanto oggetto del lavoro svolto.

## Capitolo 2

### Sistema *FPSO*

#### 2.1 Generalità

Una *FPSO* è una nave non convenzionale, il più delle volte sprovvista dell'apparato motore, che opera in condizione di ormeggio in prossimità di un giacimento di idrocarburi. A differenza delle strutture di produzione quali *jacket*, piattaforme a gravità, etc, rinunciando al collegamento rigido con il fondo del mare, permette lo sfruttamento di campi situati a profondità molto elevate, ad oggi, fino a circa 4000 m. Come suggerito dall'acronimo, una unità *Floating Production Storage and Offloading* è in grado di produrre gli idrocarburi, di stivarli nelle cisterne e trasferirlo periodicamente su navi petroliere o immetterlo in condotte sottomarine di collegamento con la terraferma.

Gli impianti di produzione e primo trattamento dei fluidi estratti, *Topside*, sono assemblati in blocchi modulari e collocati sul ponte principale. Alcuni moduli, come ad esempio quello dedicato al sistema di *offloading*, il modulo di separazione acqua, la fiaccola, il modulo di produzione di energia elettrica, sono indispensabili per le finalità di questo tipo di strutture e risultano essere quindi sempre presenti; altri moduli, sono invece installati solo se richiesti dalle necessità dello specifico sito di installazione.

Il procedimento prevede che il greggio arrivi alla *FPSO* dai *riser* di collegamento attraverso la torretta o mediante il *riser balcony*, sia trasferito al modulo di separazione e compressione, inviato alle casse di stoccaggio e trasferito a terra. L'acqua depurata può essere scaricata in mare o re-iniettata nel pozzo mentre i gas possono essere stoccati a parte, utilizzati per incrementare la pressione dei pozzi o come carburante per gli impianti di bordo o, se necessario, bruciati attraverso la fiaccola.

## 2.2 Scafo e Ormeggio

Nella progettazione di una simile struttura non vanno sottovalutate le condizioni ambientali della collocazione geografica, le caratteristiche del fondale, la qualità del prodotto da estrarre, la disponibilità dei materiali da costruzione, la distanza e la capacità dei cantieri da costruzione e la disponibilità di adeguati mezzi per l'installazione.

Per *FPSO new built* (Fig. 2-1), date le particolari caratteristiche, si possono considerare forme per lo scafo non tipicamente navali, ottimizzando la struttura per il giacimento da coltivare. Tuttavia, può anche essere conveniente convertire una nave cisterna in una unità *FPSO*, sostituendo l'allestimento originario con le opportune attrezzature di lavorazione e produzione, minimizzando le interferenze tecniche ed operative (Fig. 2-2). Una tale scelta comporta costi e tempi di realizzazione minori ma non rende ottimizzabili tutti gli spazi e bisogna comunque realizzare una serie di interventi atti a realizzare condizioni di sicurezza ed operabilità per le strutture estrattive, per gli impianti, ma soprattutto per gli alloggi e l'eliporto, un'adeguata tenuta al mare e locali di zavorra per consentire l'adeguato assetto in tutte le fasi di esercizio.



Figura 2-1 FPSO New Built con ormeggio tipo Spread





Figura 2-3 FPSO con ormeggio in torretta esterna

La torretta, soprattutto se installata esternamente allo scafo, concentra le reazioni di ancoraggio in una sola area, comportando un incremento degli sforzi locali ed una peggiore distribuzione del taglio e del momento flettente lungo la trave nave, inoltre, essendo l'unico punto fisso, può ospitare un limitato numero di *riser* provenienti dai pozzi, fino ad un massimo di venti. L'impiego di un ormeggio in *spread* consentirebbe sforzi meglio distribuiti, un numero più elevato di *riser* di produzione ma maggiori difficoltà con mare al traverso ed in fase di trasbordo dei prodotti in una petroliera che, se di grandi dimensioni, rischierebbe di tranciare le linee di ancoraggio.

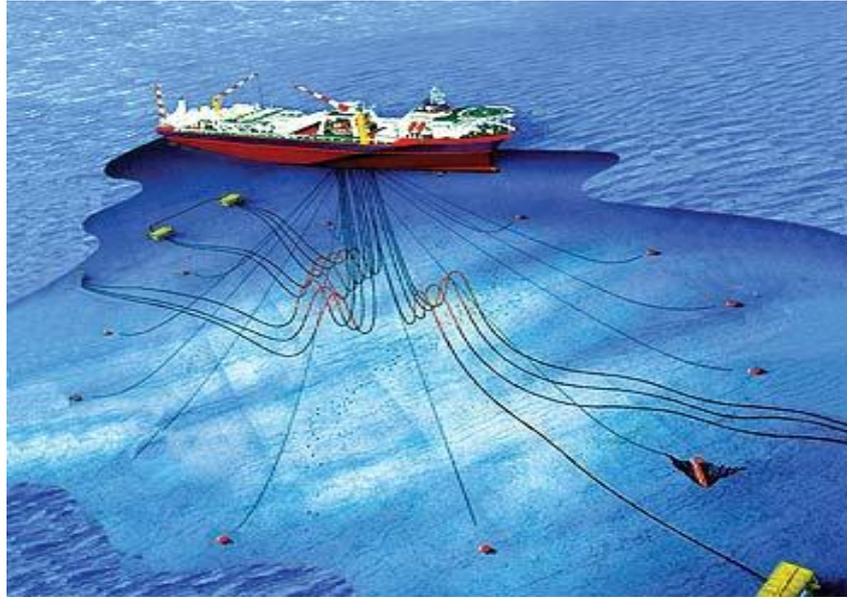


Figura 2-4. FPSO con ormeggio in torretta interna

Durante gli ultimi trenta anni le unità FPSO sono diventate la scelta primaria (Fig. 2-5) per lo sviluppo di pozzi in molte aree del mondo. Attualmente risultano essere operative più di 250 unità.

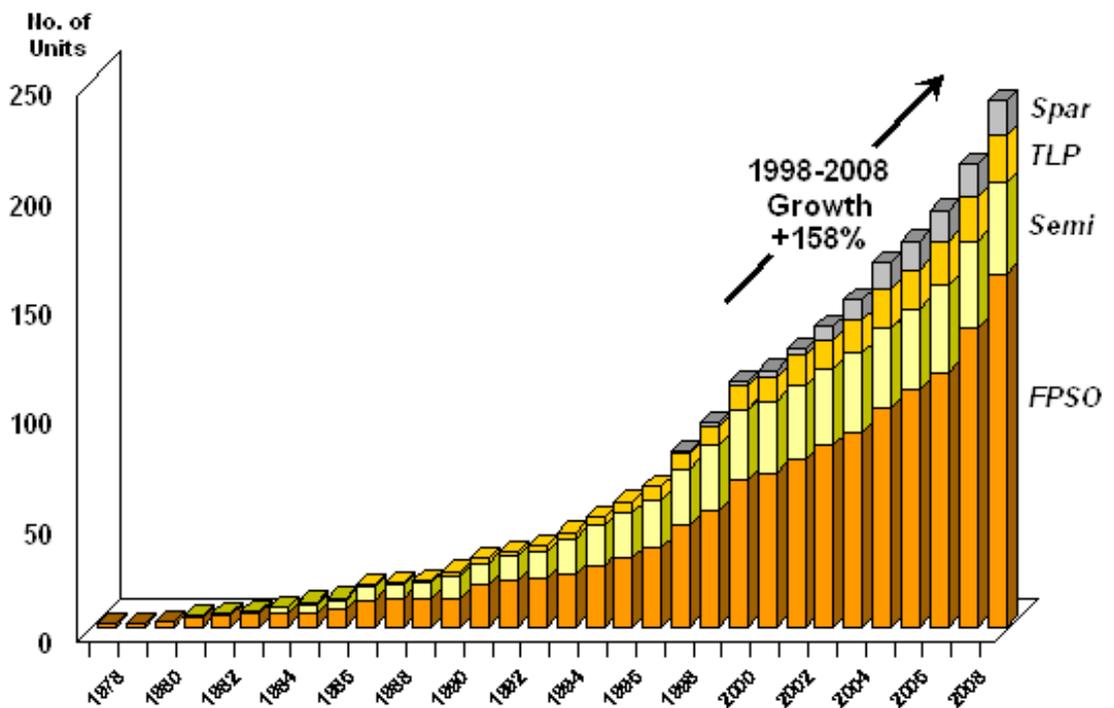


Figura 2-5. Numero di unità di produzione galleggianti operative nel corso degli anni

### **2.3 Topside**

Evidentemente, con il termine *Topside*, ci si riferisce a tutti gli impianti ed attrezzature installate sulla parte emersa delle strutture Offshore. Per accelerare la costruzione, ogni impianto è progettato e costruito separatamente sulla terraferma, alloggiato su una struttura modulare, trasferito ed integrato con la struttura principale.

È necessario che i moduli *Topside* eseguano un primo trattamento dei prodotti, garantiscano la costanza della produzione per l'intera coltivazione del giacimento, siano provvisti di adeguati alloggi e mezzi di protezione e di evacuazione per il personale di bordo.

Per tutte le strutture di produzione di idrocarburi, la presenza di una fiaccola è indispensabile sia in caso di emergenza che e all'avvio della produzione. Essa consente di bruciare in tempi brevissimi gli idrocarburi in eccesso, è adeguatamente progettata per evitare la creazione di atmosfere esplosive alla propria sommità ed è posizionata il più lontano possibile dagli alloggi e da altri impianti a rischio esplosione. Ha un'altezza prossima ai 100 m ed è sorretta da una struttura reticolare a sezione triangolare o quadrata. Per le sue dimensioni, viene solitamente costruita in cantiere separato e trasportata sul luogo dell'installazione in orizzontale su un'apposita *barge*.

Dato l'elevato costo di investimento e di esercizio, per le strutture di produzione *offshore*, è importante ridurre al minimo le operazioni da eseguire in piattaforma ma è indispensabile ridurre la corrosività degli idrocarburi prodotti al fine di garantire la regolarità del flusso verso la costa o il corretto funzionamento degli organi di movimentazione. Per questo motivo, sulla struttura hanno luogo solo trattamenti che riguardano la separazione, la deidratazione, riscaldamento e raffreddamento dei prodotti.

La separazione permette di separare gas e liquidi (*crude oil*, condensati, e acqua). Durante questo processo viene anche rimossa la parte solida solitamente contenuta (principalmente sabbia).

La deidratazione consente di rimuovere l'acqua contenuta evitando la formazione di idrati (solidi) che ostacolano il flusso verso la costa.

Impianti di pompaggio di inibitori di corrosione, provvedono all'iniezione nelle linee di Metanolo o altri additivi chimici, ad ogni avvio della produzione.

Il modulo di sollevamento e distribuzione dell'acqua di mare provvede alla raccolta di acqua a profondità dell'ordine delle decine di metri. L'acqua di mare è utilizzata come refrigerante degli scambiatori, per alimentare i desalinatori e durante le operazioni di trivellazione.

Turbine a gas o Motori Diesel sono utilizzati per la generazione dell'energia elettrica necessaria. Quando possibile, il modulo di *Power Generation* utilizza gli stessi gas prodotti dall'estrazione.

Generatori d'emergenza forniscono energia elettrica nel caso la fonte di produzione principale vada in *shut down* mentre il modulo *UPS*, consiste di una serie di batterie che soddisfano il bisogno minimo di energia nel caso sia il primo che il secondo sistema di produzione fallissero.

Un sistema di intercettazione individua principi di incendio e fughe di idrocarburi, provvede all'attivazione degli allarmi ed innesca l'azione dei sistemi attivi di protezione. Acqua di mare, schiuma, CO<sub>2</sub> e gas inerti sono opportunamente distribuiti in tutti gli ambienti della struttura.

I lavoratori, solitamente 100-150, risiedono in una specifica area che, ragionevolmente, è situata il più lontano possibile dalla fiaccola e dagli impianti di processo. Gli alloggi e le sale comuni, sono generalmente raggruppati insieme in un modulo speciale di diversi

livelli. Uffici, meeting room, infermeria, sala radio e telecomunicazioni, cucine, lavanderia, sala ricreativa, sala tv, sala palestra, sono tutte servite da area condizionata e sistema di ventilazione, tenute ad una pressione leggermente maggiore di quella atmosferica per prevenire l'ingresso di eventuali gas tossici.

Il sistema di evacuazione del personale, generalmente costituito da scialuppe e altri mezzi di salvataggio, consente l'evacuazione della struttura in tempi molto brevi.

Gli stessi impianti appena descritti, indispensabili per il corretto funzionamento della piattaforma, rappresentano allo stesso tempo una criticità per il progetto. Essendo situati quasi tutti al di sopra del baricentro dello scafo e del carico stivato, rischiano di compromettere la stabilità dell'*FPSO*. Particolare attenzione da parte dei progettisti deve essere dedicata alla stima dei pesi dei Topside sin dalle fasi preliminari del progetto, al fine di non dover imporre limiti inattesi durante il progetto di dettaglio o, peggio, durante la costruzione.

## Capitolo 3

### Definizione dei dati di Progetto

#### 3.1 Introduzione

Durante la progettazione di una qualsiasi nave, compito primario del progettista è quello di scegliere opportune dimensioni in modo da assicurare alla nave le prestazioni desiderate in termini di galleggiabilità, stabilità, capacità di stivaggio, il rispetto di eventuali vincoli imposti dall'armatore ed il contenimento dei costi di costruzione.

#### 3.2 Caratteristiche principali dell'unità

A valle dei primi studi sul *reservoir*, si stabilisce la portata lorda dell'unità, un ipotetico profilo di missione, le dimensioni principali e un primo layout dei piani generali.

Per motivi legati alla capacità di stivaggio, a requisiti di galleggiabilità e stabilità da soddisfare sia in condizione di pieno carico che a nave scarica (in zavorra), si è scelto di dotare l'unità di cinque paratie trasversali e di quattro longitudinali.

A differenza delle navi petroliere, le normative internazionali, impongono, per le *FPSO*, l'adozione del solo doppio fianco, conseguentemente alle ridotte probabilità di incaglio e al rischio concreto di collisioni con le navi cisterna che affiancano la nave per procedere al trasbordo del prodotto. Si è scelto di realizzare comunque parte del fondo con doppio scafo in modo da avere maggiori volumi da destinare alla zavorra.

L'unità in progetto, non essendo destinata a frequenti spostamenti, è sprovvista di un apparato di propulsione.

Si riportano di seguito le dimensioni principali dell'unità oggetto di studio.

## Dati Principali

Tabella 3-1 Dati Principali

Caratteristiche geometriche dello scafo		
L <sub>OA</sub> (m)	335	
L <sub>BP</sub> (m)	320	
B (m)	58	
D (m)	31.2	

Condizioni di carico			
Condizioni di carico		Ballast	Full Load
Immersione a centro nave (m)		9.0	21.7
Dislocamento (t)		134527	337843
LCG (m) da AP		183.1	175.2
TCG (m)		0	0
VCG (m) da K		20.6	19.1
2nd mass moment of vessel	I <sub>xx</sub> (Te.m <sup>2</sup> )	6.45E+07	8.59E+07
	I <sub>yy</sub> (Te.m <sup>2</sup> )	1.02E+09	1.85E+09
	I <sub>zz</sub> (Te.m <sup>2</sup> )	1.04E+09	1.89E+09
Radius of gyration of vessel	R <sub>xx</sub> (m)	21.9	15.9
	R <sub>yy</sub> (m)	87.1	73.9
	R <sub>zz</sub> (m)	87.7	74.8

Il dimensionamento strutturale dell'unità in progetto è stato eseguito nel rispetto dello *Steel Vessels Rules* e della parte 5A del *Floating Production Installation* dell'ABS. Le prescrizioni riportate si riferiscono ad installazioni galleggianti appartenenti alla categoria “*ship-type*” aventi lunghezza superiore ai 150 metri, escludendo i mezzi rientranti in una o più delle seguenti categorie:

- $L/B < 5$
- $B/D > 2.5$
- Lunghezza :  $L > 500$  m
- $C_b < 0.6$
- Grandi aperture al ponte
- Svasature accentuate
- Carico pericoloso

Per questi casi la Classification Society prevede una supervisione maggiore e l'adozione delle regole è subordinata alla propria approvazione. Nel caso in esame il rapporto L/B è pari a 5.52, quindi è necessario un maggior coinvolgimento del registro. Considerata la fase di progetto, molto preliminare, si è scelto di applicare comunque le norme di riferimento e di postporre a fasi successive il coinvolgimento dell'Ente di Classifica. Nella figura 3-1, si riporta la vista laterale dei piani generali dell'unità oggetto di studio.

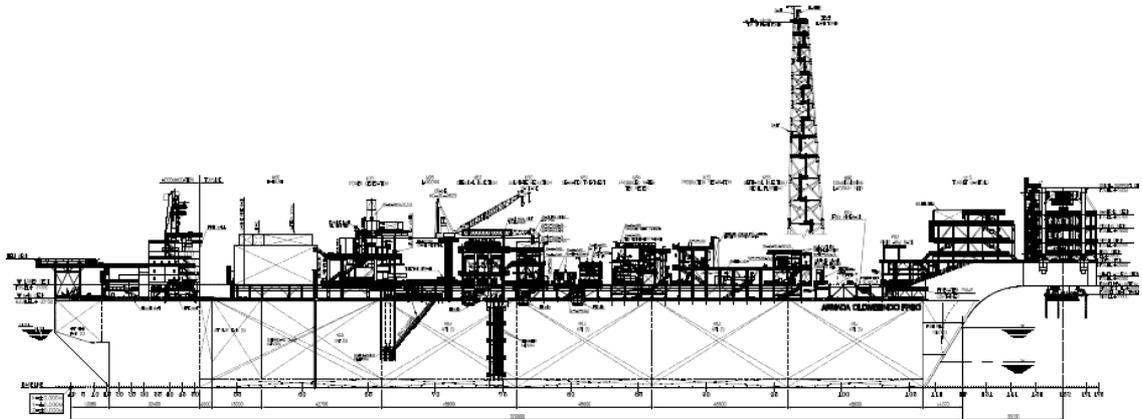


Figura 3-1 Piani Generali dell'unità

## Capitolo 4

### Heading Analysis

#### 4.1 Introduzione

Il contesto meteoceanografico delle coste dell’Africa Occidentale (Angola, Congo, Ghana, ecc.) è caratterizzato da un clima tendenzialmente mite, le cui tempeste presentano altezze significative circa il 40% più basse rispetto a quelle del mare del Nord, usate solitamente dalle CS come riferimento di partenza per la definizione delle normative internazionali.

Tale area geografica però, per l’assenza di terre emerse interposte, è investita da onde di *Swell* (onde lunghe di mare morto), generate dalle tempeste al largo delle coste dell’America meridionale. Per quanto le altezze significative non raggiungano valori rilevanti, risultano essere particolarmente pericolose se prese al traverso, in quanto caratterizzate da periodi d’onda confrontabili con i periodi di rollio delle navi, col rischio di innescare fenomeni di risonanza.

E’ intuibile che un mare di questo tipo non provenga sempre da un medesimo quadrante geografico inoltre, in caso di più fenomeni meteorologici concomitanti, è possibile che si verifichino stati di mare sovrapposti provenienti da direzioni differenti.

#### 4.2 Descrizione del sistema d’ormeggio

Per i motivi sopra descritti, si è scelto di procedere dotando l’FPSO di un sistema di ormeggio in torretta esterna, costituito da nove linee disposte in configurazione “3x3”.

I tre gruppi di linee, *Cluster*, sono distanziati di 120° mentre le singole linee dello stesso gruppo sono distanziate di 5°. Tutte le linee sono costituite da un primo tratto, collegato alla nave, composto da maglie di catena tipo “*Studless*”, un tratto centrale composto da

cavo e da un ultimo tratto, a contatto con il fondale e collegato all'ancora, composta da maglie di catena *Studless* (Fig. 4-1). Nella figure 4-2 e 4-3 è mostrata la configurazione del sistema d'ormeggio.

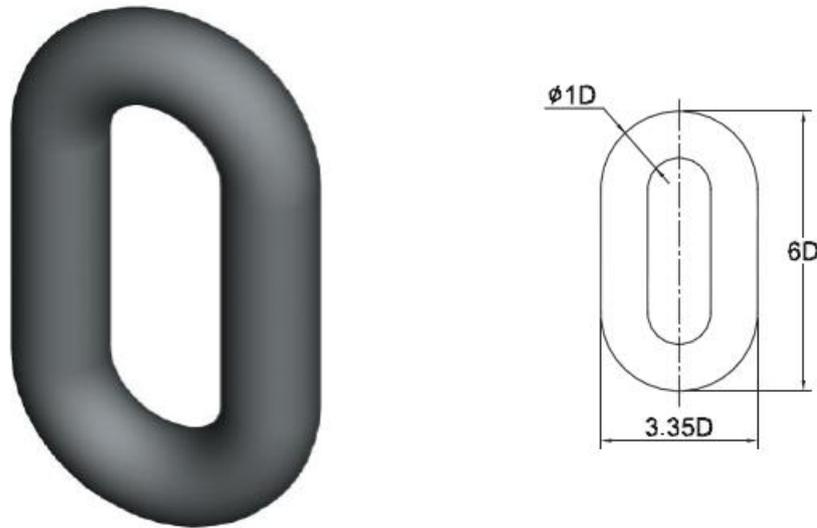


Figura 4-1 Maglia di catena tipo Studless

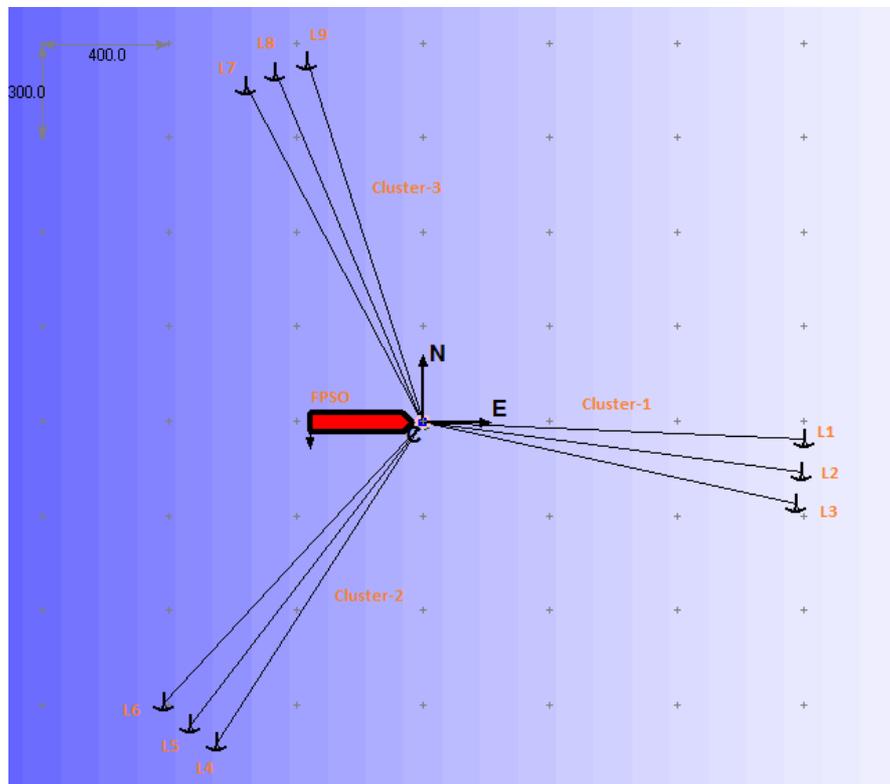


Figura 4-2 Configurazione sistema di Ormeggio

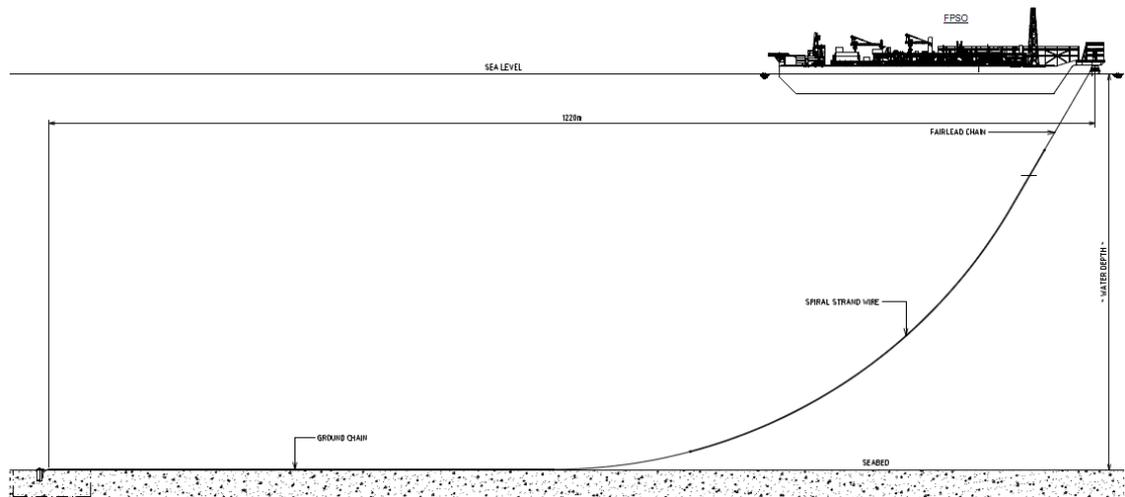


Figura 4-3 Configurazione sistema di Ormeggio

### 4.3 Modello dell'FPSO

Non essendo ancora dettagliatamente definite le forme di prua, per motivi pratici, si è scelto di modellare la carena ancora dotata di bulbo, considerandone trascurabile l'influenza sui risultati degli studi eseguiti.

La geometria della carena è stata modellata mediante la creazione di un reticolo, *mesh*, ad ogni condizione di carico. La superficie dello scafo è stata così approssimata da circa 6000 elementi planari.

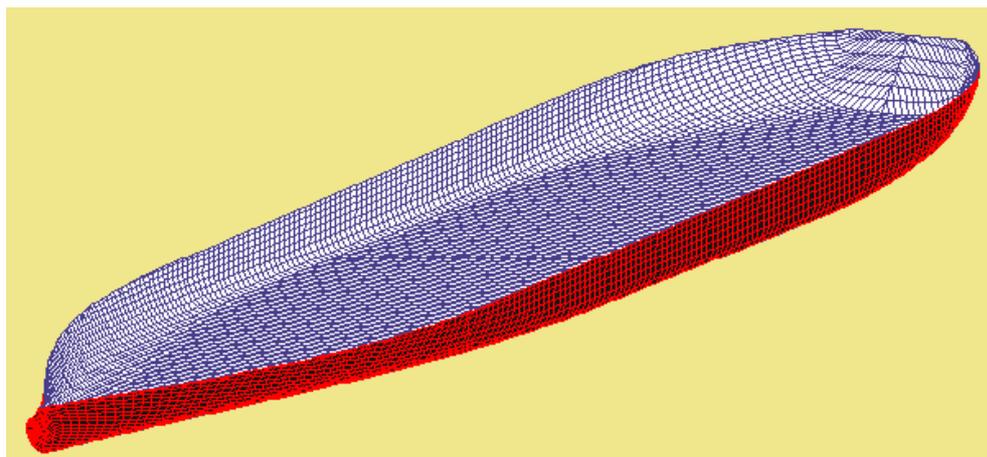


Figura 4-4 Mesh – Carico di Zavorra

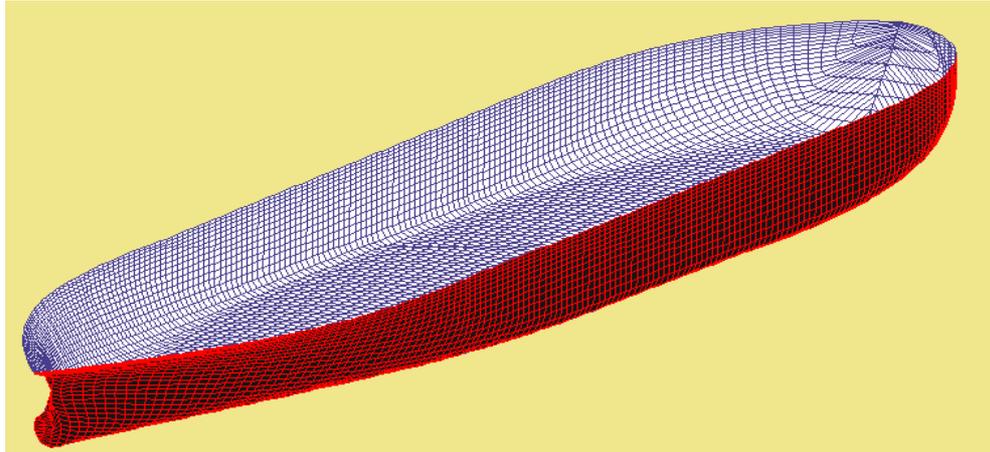


Figura 4-5 Mesh – Carico Intermedio

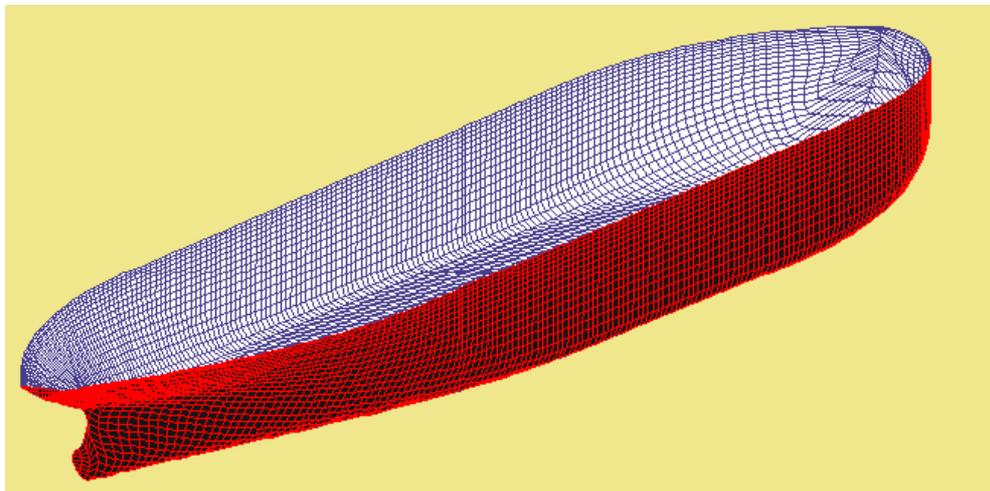


Figura 4-6 Mesh – Pieno Carico

Si riporta di seguito in tabella 4-1 la comparazione tra il dislocamento calcolato dalle carena dritte e quello risultante dalla discretizzazione.

Tabella 4-1 Comparazione Dislocamenti

Metodologia	...Dislocamento (t)		
	Ballast	Intermediate	Full Load
Software	133055	241828	334796
Calcoli Stabilità	134528	244865	337851
Differenza	1.10%	1.20%	0.90%

#### **4.4 Heading Analysis**

Per *Heading Analysis* si intende lo studio che consente di stimare la probabilità di occorrenza di un certo angolo di incidenza delle onde con l'asse longitudinale della nave.

Nel caso in esame, si è studiato:

- Probabilità di occorrenza di assegnati angoli di impatto della nave con la direzione prevalente del moto ondoso;
- Probabilità di occorrenza di assegnati angoli di impatto della nave con la direzione prevalente di vento e corrente;
- Probabilità di occorrenza di un certo angolo tra la posizione assunta dall'unità ed il Nord.

I risultati delle analisi sono necessari per definire valori massimi di ampiezza dei moti e delle accelerazioni in punti specifici della struttura.

### **Onde di Swell e Mare da vento**

L'Area Offshore dell'Africa Occidentale, risulta essere caratterizzata da onde di Swell provenienti dal Sud dell'Atlantico e da onde di modesta ampiezza generate localmente da vento. Data la diversa origine dei due stati di mare concomitanti, si ritiene che siano stocasticamente indipendenti. Per lo studio dell'*Heading* è quindi necessario procedere alla sovrapposizione dei due fenomeni meteomarini, di cui si riporta la conseguente combinazione nella tabella 4-2.

Tabella 4-2 Swell/Sea – Probabilità di occorrenza

Caso No.	Swell			Sea			Probabilità %
	Hs (m)	Tp (s)	Lambda	Hs (m)	Tp (s)	Lambda	
1	0.7	7.3	6	0.1	1.7	1	0.24%
2	0.7	7.3	6	0.4	3.1	1	0.04%
3	0.7	7.3	6	0.7	3.8	1	0.00%
4	0.7	11.4	10	0.1	1.7	1	0.19%
5	0.7	11.4	10	0.4	3.1	1	0.03%
6	0.7	11.4	10	0.7	3.8	1	0.00%
7	0.7	14.4	20	0.1	1.7	1	0.05%
8	0.7	14.4	20	0.4	3.1	1	0.01%
9	0.7	14.4	20	0.7	3.8	1	0.00%
10	0.9	6.0	6	0.1	1.7	1	0.46%
11	0.9	6.0	6	0.4	3.1	1	0.08%
12	0.9	6.0	6	0.7	3.8	1	0.00%
13	0.9	9.0	6	0.1	1.7	1	1.82%
14	0.9	9.0	6	0.4	3.1	1	0.32%
15	0.9	9.0	6	0.7	3.8	1	0.01%
16	0.9	12.6	10	0.1	1.7	1	1.82%
17	0.9	12.6	10	0.4	3.1	1	0.32%
18	0.9	12.6	10	0.7	3.8	1	0.01%
19	0.9	15.2	20	0.1	1.7	1	0.46%
20	0.9	15.2	20	0.4	3.1	1	0.08%
21	0.9	15.2	20	0.7	3.8	1	0.00%
22	1.1	7.0	6	0.1	1.7	1	1.38%
23	1.1	7.0	6	0.4	3.1	1	0.25%
24	1.1	7.0	6	0.7	3.8	1	0.01%
25	1.1	9.0	6	0.1	1.7	1	5.52%
26	1.1	9.0	6	0.4	3.1	1	0.98%
27	1.1	9.0	6	0.7	3.8	1	0.04%
28	1.1	12.3	6	0.1	1.7	1	5.52%
29	1.1	12.3	6	0.4	3.1	1	0.98%
30	1.1	12.3	6	0.7	3.8	1	0.03%
31	1.1	15.1	15	0.1	1.7	1	1.24%
32	1.1	15.1	15	0.4	3.1	1	0.22%
33	1.1	15.1	15	0.7	3.8	1	0.01%
34	1.1	18.2	40	0.1	1.7	1	0.14%
35	1.1	18.2	40	0.4	3.1	1	0.02%
36	1.1	18.2	40	0.7	3.8	1	0.00%
37	1.4	7.8	6	0.1	1.7	1	2.43%
38	1.4	7.8	6	0.4	3.1	1	0.43%
39	1.4	7.8	6	0.7	3.8	1	0.02%
40	1.4	19.0	6	0.1	1.7	1	9.70%
41	1.4	19.0	6	0.4	3.1	1	1.72%
42	1.4	19.0	6	0.7	3.8	1	0.07%
43	1.4	12.5	6	0.1	1.7	1	9.70%
44	1.4	12.5	6	0.4	3.1	1	1.72%
45	1.4	12.5	6	0.7	3.8	1	0.07%
46	1.4	15.2	15	0.1	1.7	1	2.18%
47	1.4	15.2	15	0.4	3.1	1	0.39%
48	1.4	15.2	15	0.7	3.8	1	0.02%
49	1.4	18.1	40	0.1	1.7	1	0.24%
50	1.4	18.1	40	0.4	3.1	1	0.04%
51	1.4	18.1	40	0.7	3.8	1	0.00%
52	1.6	8.1	6	0.1	1.7	1	2.17%
53	1.6	8.1	6	0.4	3.1	1	0.38%
54	1.6	8.1	6	0.7	3.8	1	0.02%
55	1.6	10.4	6	0.1	1.7	1	8.67%
56	1.6	10.4	6	0.4	3.1	1	1.54%
57	1.6	10.4	6	0.7	3.8	1	0.07%
58	1.6	12.7	6	0.1	1.7	1	8.67%
59	1.6	12.7	6	0.4	3.1	1	1.54%
60	1.6	12.7	6	0.7	3.8	1	0.07%
61	1.6	15.6	15	0.1	1.7	1	1.95%
62	1.6	15.6	15	0.4	3.1	1	0.35%
63	1.6	15.6	15	0.7	3.8	1	0.02%
64	1.6	18.8	40	0.1	1.7	1	0.22%
65	1.6	18.8	40	0.4	3.1	1	0.04%
66	1.6	18.8	40	0.7	3.8	1	0.00%
67	1.9	9.0	6	0.1	1.7	1	1.10%
68	1.9	9.0	6	0.4	3.1	1	0.19%
69	1.9	9.0	6	0.7	3.8	1	0.01%
70	1.9	11.1	6	0.1	1.7	1	4.39%
71	1.9	11.1	6	0.4	3.1	1	0.78%
72	1.9	11.1	6	0.7	3.8	1	0.03%
73	1.9	13.1	6	0.1	1.7	1	4.39%
74	1.9	13.1	6	0.4	3.1	1	0.78%
75	1.9	13.1	6	0.7	3.8	1	0.03%
76	1.9	16.2	15	0.1	1.7	1	0.99%
77	1.9	16.2	15	0.4	3.1	1	0.18%
78	1.9	16.2	15	0.7	3.8	1	0.01%
79	1.9	18.6	40	0.1	1.7	1	0.11%
80	1.9	18.6	40	0.4	3.1	1	0.02%
81	1.9	18.6	40	0.7	3.8	1	0.00%
82	2.1	9.6	6	0.1	1.7	1	0.45%
83	2.1	9.6	6	0.4	3.1	1	0.08%
84	2.1	9.6	6	0.7	3.8	1	0.00%
85	2.1	11.7	6	0.1	1.7	1	1.78%
86	2.1	11.7	6	0.4	3.1	1	0.32%
87	2.1	11.7	6	0.7	3.8	1	0.01%

Caso No.	Swell			Sea			Probabilità %
	Hs (m)	Tp (s)	Lambda	Hs (m)	Tp (s)	Lambda	
88	2.1	14.1	6	0.1	1.7	1	1.78%
89	2.1	14.1	6	0.4	3.1	1	0.32%
90	2.1	14.1	6	0.7	3.8	1	0.01%
91	2.1	16.4	6	0.1	1.7	1	0.40%
92	2.1	16.4	6	0.4	3.1	1	0.07%
93	2.1	16.4	6	0.7	3.8	1	0.00%
94	2.1	18.3	6	0.1	1.7	1	0.04%
95	2.1	18.3	6	0.4	3.1	1	0.01%
96	2.1	18.3	6	0.7	3.8	1	0.00%
97	2.4	9.9	6	0.1	1.7	1	0.24%
98	2.4	9.9	6	0.4	3.1	1	0.04%
99	2.4	9.9	6	0.7	3.8	1	0.00%
100	2.4	11.6	6	0.1	1.7	1	0.97%
101	2.4	11.6	6	0.4	3.1	1	0.17%
102	2.4	11.6	6	0.7	3.8	1	0.01%
103	2.4	14.2	6	0.1	1.7	1	0.97%
104	2.4	14.2	6	0.4	3.1	1	0.17%
105	2.4	14.2	6	0.7	3.8	1	0.01%
106	2.4	16.6	6	0.1	1.7	1	0.24%
107	2.4	16.6	6	0.4	3.1	1	0.04%
108	2.4	16.6	6	0.7	3.8	1	0.00%
109	2.6	11.5	6	0.1	1.7	1	0.24%
110	2.6	11.5	6	0.4	3.1	1	0.04%
111	2.6	11.5	6	0.7	3.8	1	0.00%
112	2.6	13.0	6	0.1	1.7	1	0.47%
113	2.6	13.0	6	0.4	3.1	1	0.08%
114	2.6	13.0	6	0.7	3.8	1	0.00%
115	2.6	15.8	6	0.1	1.7	1	0.24%
116	2.6	15.8	6	0.4	3.1	1	0.04%
117	2.6	15.8	6	0.7	3.8	1	0.00%
118	2.9	12.3	6	0.1	1.7	1	0.10%
119	2.9	12.3	6	0.4	3.1	1	0.02%
120	2.9	12.3	6	0.7	3.8	1	0.00%
121	2.9	14.2	6	0.1	1.7	1	0.19%
122	2.9	14.2	6	0.4	3.1	1	0.03%
123	2.9	14.2	6	0.7	3.8	1	0.00%
124	2.9	16.1	6	0.1	1.7	1	0.10%
125	2.9	16.1	6	0.4	3.1	1	0.02%
126	2.9	16.1	6	0.7	3.8	1	0.00%
127	3.1	12.8	6	0.1	1.7	1	0.14%
128	3.1	12.8	6	0.4	3.1	1	0.02%
129	3.1	12.8	6	0.7	3.8	1	0.00%
130	3.1	15.9	6	0.1	1.7	1	0.14%
131	3.1	15.9	6	0.4	3.1	1	0.02%
132	3.1	15.9	6	0.7	3.8	1	0.00%
133	3.4	14.1	6	0.1	1.7	1	0.02%
134	3.4	14.1	6	0.4	3.1	1	0.00%
135	3.4	14.1	6	0.7	3.8	1	0.00%
136	3.4	17.0	6	0.1	1.7	1	0.02%
137	3.4	17.0	6	0.4	3.1	1	0.00%
138	3.4	17.0	6	0.7	3.8	1	0.00%
139	3.7	14.0	6	0.1	1.7	1	0.05%
140	3.7	14.0	6	0.4	3.1	1	0.01%
141	3.7	14.0	6	0.7	3.8	1	0.00%
142	3.7	16.9	6	0.1	1.7	1	0.05%
143	3.7	16.9	6	0.4	3.1	1	0.01%
144	3.7	16.9	6	0.7	3.8	1	0.00%

## Vento

La probabilità di occorrenza di vento proveniente da un fissata direzione e l'altezza significativa di onda associata sono riportate nella tabella 4-3.

Tabella 4-3 Velocità del vento – Mare da vento - % di occorrenza

Ventp (m/s)	Mare da vento		Direzione di provenienza (In senso orario, 0 = Nord)					Totale
			22.5	90	180	270	337.5	
	Hs (m)	Tp (s)						
3	0.1	1	26.77%	13.09%	3.62%	8.62%	31.52%	83.61%
9	0.4	3	6.86%	0.90%	0.38%	0.98%	7.25%	16.38%
15	0.7	3	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.01%	0.02%
Total			33.63%	13.99%	4.01%	9.60%	38.78%	100.01%

## Corrente

La percentuale di occorrenza di profili di corrente, considerate uniformi nei primi 45 m di profondità è riportata nella tabella 4.4. Essendo lo studio limitato allo scafo, quindi a profondità inferiori ai 45 m, si ritiene che tale semplificazione risulti essere applicabile allo studio in corso.

Tabella 4-4 Corrente - % di occorrenza

Parametro	Direzione di provenienza (In senso orario, 0 = Nord)				
	22.5	90	180	270	337.5
Velocità (m/s)	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
Occorrenza (%)	5.8%	19.6%	36.5%	26.7%	11.4%

## Sovrapposizione degli effetti

Come già evidenziato, i fenomeni meteomarinari di onde, vento e corrente, risultano essere non correlati statisticamente. Si sono quindi considerate  $144 \times 5 \times 5 = 3600$  combinazioni di sollecitazione utilizzate per procedere con l'Heading Analysis. A titolo di esempio, si riportano nella tabella 4-5, 25 delle combinazioni di carico utilizzate.

L'analisi è stata eseguita considerando sia l'immersione di Zavorra che di Pieno Carico.

Tabella 4-5 Esempio: Sovrapposizione degli effetti

New Load case	Swell					Mare					Vento			Corrente (m/s)			Probabilità %	
	Dir	Hs (m)	Tp (s)	Lambda	Prob % (A)	Dir	Hs (m)	Tp (s)	Lambda	Prob % (B)	Dir	Speed (m/s)	Prob %	Dir	Speed (m/s)	Prob % ©	case-wise P (=A*B*C)	P
1	22.5	0.7	7.3	6	2.4E-01	22.5	0.1	1.7	1	3.2E-01	22.5	3	3.2E-01	22.5	0.14	5.8E-02	4.5E-03	0.242
2	22.5	0.7	7.3	6	2.4E-01	22.5	0.1	1.7	1	3.2E-01	22.5	3	3.2E-01	90.0	0.14	2.0E-01	1.5E-02	
3	22.5	0.7	7.3	6	2.4E-01	22.5	0.1	1.7	1	3.2E-01	22.5	3	3.2E-01	180.0	0.14	3.7E-01	2.8E-02	
4	22.5	0.7	7.3	6	2.4E-01	22.5	0.1	1.7	1	3.2E-01	22.5	3	3.2E-01	270.0	0.14	2.7E-01	2.1E-02	
5	22.5	0.7	7.3	6	2.4E-01	22.5	0.1	1.7	1	3.2E-01	22.5	3	3.2E-01	337.5	0.14	1.1E-01	8.8E-03	
6	22.5	0.7	7.3	6	2.4E-01	90.0	0.1	1.7	1	1.6E-01	90	3	1.6E-01	22.5	0.14	5.8E-02	2.2E-03	
7	22.5	0.7	7.3	6	2.4E-01	90.0	0.1	1.7	1	1.6E-01	90	3	1.6E-01	90.0	0.14	2.0E-01	7.4E-03	
8	22.5	0.7	7.3	6	2.4E-01	90.0	0.1	1.7	1	1.6E-01	90	3	1.6E-01	180.0	0.14	3.7E-01	1.4E-02	
9	22.5	0.7	7.3	6	2.4E-01	90.0	0.1	1.7	1	1.6E-01	90	3	1.6E-01	270.0	0.14	2.7E-01	1.0E-02	
10	22.5	0.7	7.3	6	2.4E-01	90.0	0.1	1.7	1	1.6E-01	90	3	1.6E-01	337.5	0.14	1.1E-01	4.3E-03	
11	22.5	0.7	7.3	6	2.4E-01	180.0	0.1	1.7	1	4.3E-02	180	3	4.3E-02	22.5	0.14	5.8E-02	6.0E-04	
12	22.5	0.7	7.3	6	2.4E-01	180.0	0.1	1.7	1	4.3E-02	180	3	4.3E-02	90.0	0.14	2.0E-01	2.1E-03	
13	22.5	0.7	7.3	6	2.4E-01	180.0	0.1	1.7	1	4.3E-02	180	3	4.3E-02	180.0	0.14	3.7E-01	3.8E-03	
14	22.5	0.7	7.3	6	2.4E-01	180.0	0.1	1.7	1	4.3E-02	180	3	4.3E-02	270.0	0.14	2.7E-01	2.8E-03	
15	22.5	0.7	7.3	6	2.4E-01	180.0	0.1	1.7	1	4.3E-02	180	3	4.3E-02	337.5	0.14	1.1E-01	1.2E-03	
16	22.5	0.7	7.3	6	2.4E-01	270	0.1	1.7	1	1.0E-01	270	3	1.0E-01	22.5	0.14	5.8E-02	1.4E-03	
17	22.5	0.7	7.3	6	2.4E-01	270	0.1	1.7	1	1.0E-01	270	3	1.0E-01	90.0	0.14	2.0E-01	4.9E-03	
18	22.5	0.7	7.3	6	2.4E-01	270	0.1	1.7	1	1.0E-01	270	3	1.0E-01	180.0	0.14	3.7E-01	9.1E-03	
19	22.5	0.7	7.3	6	2.4E-01	270	0.1	1.7	1	1.0E-01	270	3	1.0E-01	270.0	0.14	2.7E-01	6.7E-03	
20	22.5	0.7	7.3	6	2.4E-01	270	0.1	1.7	1	1.0E-01	270	3	1.0E-01	337.5	0.14	1.1E-01	2.8E-03	
21	22.5	0.7	7.3	6	2.4E-01	337.5	0.1	1.7	1	3.8E-01	337.5	3	3.8E-01	22.5	0.14	5.8E-02	5.3E-03	
22	22.5	0.7	7.3	6	2.4E-01	337.5	0.1	1.7	1	3.8E-01	337.5	3	3.8E-01	90.0	0.14	2.0E-01	1.8E-02	
23	22.5	0.7	7.3	6	2.4E-01	337.5	0.1	1.7	1	3.8E-01	337.5	3	3.8E-01	180.0	0.14	3.7E-01	3.3E-02	
24	22.5	0.7	7.3	6	2.4E-01	337.5	0.1	1.7	1	3.8E-01	337.5	3	3.8E-01	270.0	0.14	2.7E-01	2.4E-02	
25	22.5	0.7	7.3	6	2.4E-01	337.5	0.1	1.7	1	3.8E-01	337.5	3	3.8E-01	337.5	0.14	1.1E-01	1.0E-02	

## 4.5 Risultati

L'analisi è stata effettuata nel dominio del tempo, con l'ausilio di un software specialistico di calcolo, HydroD, fornito dal registro di classificazione norvegese *Det Norske Veritas*.

Le sollecitazioni ambientali sono state applicate al modello della carena per una durata della simulazione pari a tre ore. I risultati dell'analisi sono forniti dal software per ogni stato di mare, nel rispetto della convenzione dei segni mostrata in figura 4-7 dove ' $\mu_R$ ' rappresenta l'angolo relativo tra Heading della nave e direzione delle onde incidenti.

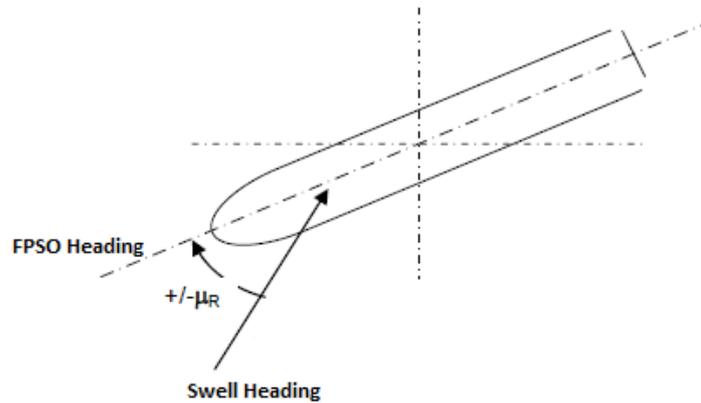


Figura 4-7 Relative heading

E' importante notare che l'orientazione della nave è nei risultati sempre mostrata rispetto alla direzione delle onde di Swell. Ciò è dovuto principalmente al fatto che i moti nave non sono significativamente influenzati dal mare da vento, in quanto i periodi d'onda sono molto inferiori rispetto ai periodi dei moti nave. Nei grafici delle figure 4-8 e 4-9 sono riportate le probabilità cumulative degli angoli di incidenza rispettivamente per la condizione di pieno carico e per la condizione di zavorra.

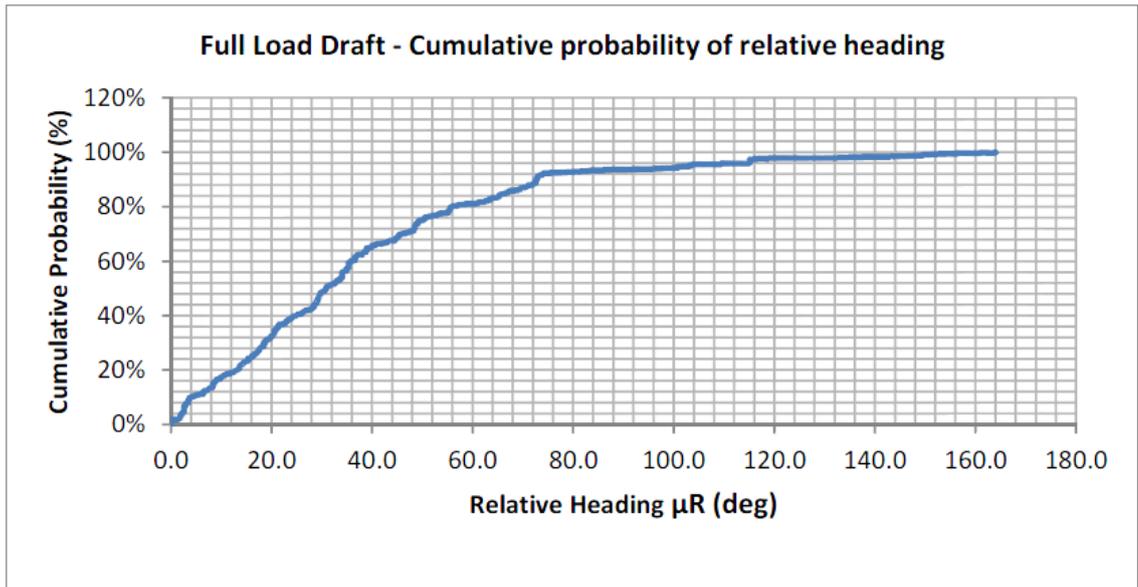


Figura 4-8 Probabilità cumulativa di  $\mu R$  – Immersione di pieno carico

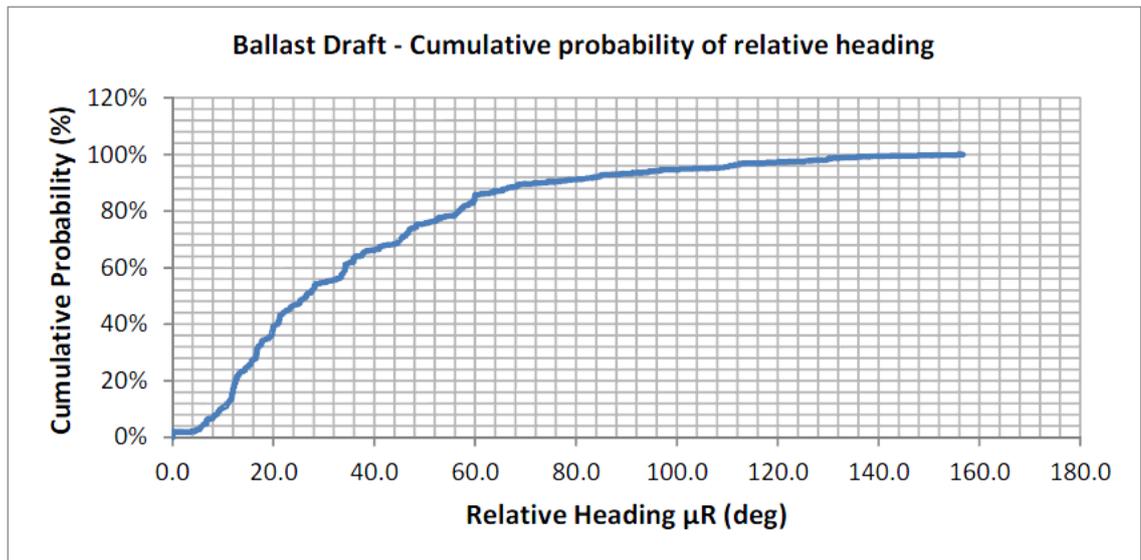


Figura 4-9 Probabilità cumulativa di  $\mu R$  – Immersione di Zavorra

Sulla base dei risultati mostrati, la probabilità di occorrenza di  $\mu R$  è stata calcolata e riportata nel grafico di figura 4-10, considerando la media tra la condizione di Pieno Carico e di Zavorra.

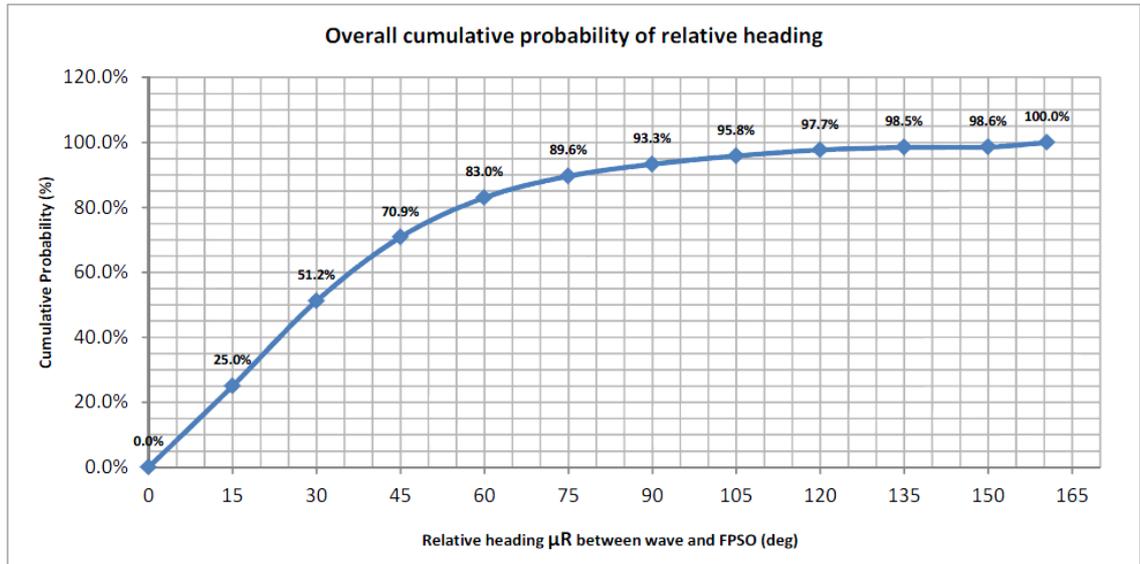


Figura 4-10 Probabilità cumulativa di  $\mu R$  – Overall

Sulla base dei grafici precedenti, la probabilità di occorrenza, raggruppata per range di  $15^\circ$  di  $\mu R$ , è riportata nella tabella 4-6.

Tabella 4-6  $\mu R$  Vs Probabilità

$\mu R$ (deg)	Probabilità (%)
0 to 15	25.1%
15 to 30	26.2%
30 to 45	19.7%
45 to 60	12.1%
60 to 75	6.6%
75 to 90	3.7%
90 to 105	2.5%
105 to 120	1.8%
120 to 135	0.8%
135 to 150	0.1%
150 to 160	1.3%

Come si può notare, la probabilità di avere un angolo di incidenza relativo maggiore di  $90^\circ$ , mare al traverso, è solo circa il 6.5% degli eventi possibili.

Considerato che, la risposta dell'*FPSO* a sollecitazioni provenienti dal quarto poppiere, non risulta essere molto differente da quelle provenienti dal quarto prodiero, si è proceduto con l'unione delle corrispondenti probabilità di occorrenza. Questo modo di procedere consente di ridurre il numero di casi da considerare nell'analisi dei moti a lungo termine.

I grafici e le tabelle così ottenuti sono riportati di seguito.

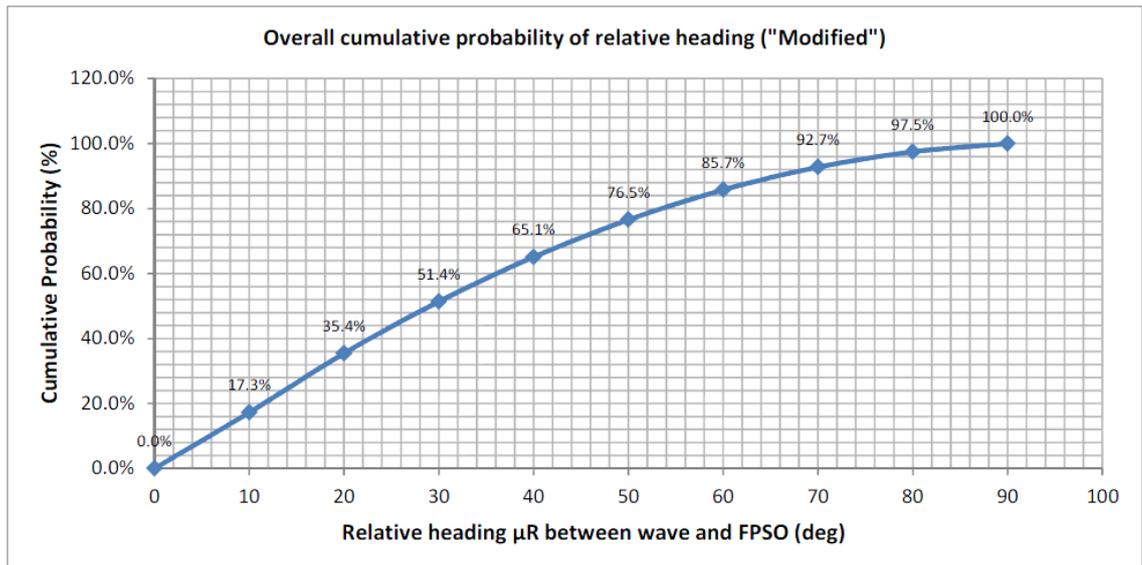


Figura 4-11 Probabilità cumulativa di  $\mu R$  – Overall (“Modified”)

Sulla base dei grafici precedenti, la probabilità di occorrenza, raggruppata per range di  $10^\circ$  di  $\mu R$ , è stata calcolata e riportata nella tabella 4.7.

Tabella 4-7  $\mu R$  Vs Probabilità (Modified)

$\mu R$ (deg)	Probabilità (%)
0 to 10	17.3%
10 to 20	18.2%
20 to 30	15.9%
30 to 40	13.7%
40 to 50	11.5%
50 to 60	9.2%
60 to 70	7.0%
70 to 80	4.7%
80 to 90	2.5%

Allo stesso modo, la probabilità di occorrenza di un dato angolo di incidenza relativa con la direzione di propagazione di vento e corrente è stata calcolata e riportata nella tabella 4-8.

Tabella 4-8  $\mu R$  Vs Probabilità (Corrente e vento)

$\mu R$ (deg)	Probabilità (%)	
	Corrent	Vento
0 to 10	8.9%	26.8%
10 to 20	10.0%	23.3%
20 to 30	10.5%	17.4%
30 to 40	10.5%	12.5%
40 to 50	10.4%	8.4%
50 to 60	10.5%	5.3%
60 to 70	11.2%	3.1%
70 to 80	12.7%	1.8%
80 to 90	15.5%	1.4%

I risultati relativi all'angolo di incidenza con swell, vento e corrente sono riportati in forma grafica in figura 4-12.

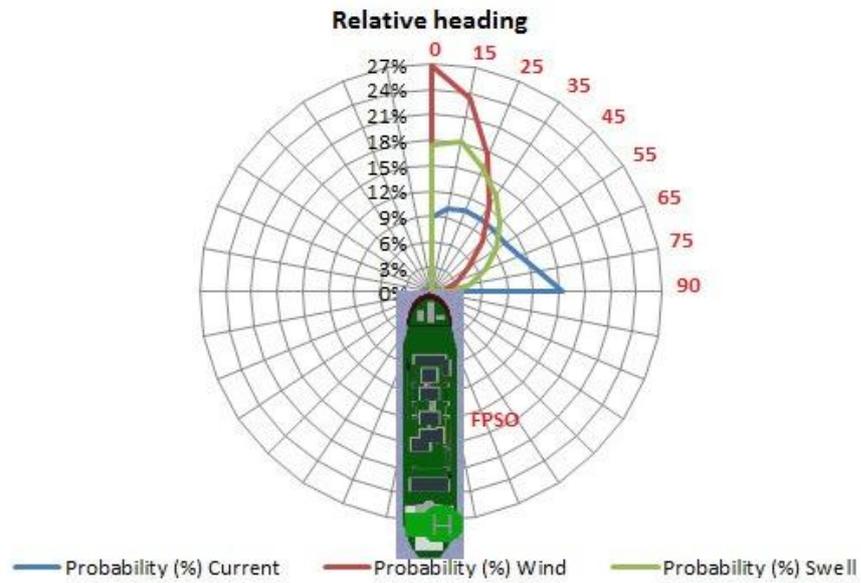


Figura 4-12  $\mu R$  Vs Probabilità (Corrente e Vento)

### Probabilità di occorrenza di Heading vs $H_s$

Si riporta di seguito (tab. 4-9) la probabilità di occorrenza di un dato stato di mare ( $H_s$ ) con assegnata direzione di incidenza prevalente:

Tabella 4-9  $\mu R$  Vs  $H_s$

Hs (m)	Probabilità angoli incidenza relativa		
	0 to 30 deg	30 to 60 deg	60 to 90 deg
0.7	0.2%	0.2%	0.1%
0.9	2.2%	2.3%	0.9%
1.1	8.8%	5.8%	1.7%
1.4	10.5%	11.3%	6.8%
1.6	15.8%	7.6%	2.3%
1.9	8.2%	3.4%	1.4%
2.1	2.8%	2.0%	0.5%
2.4	1.7%	1.0%	0.2%
2.6	0.7%	0.3%	0.1%
2.9	0.2%	0.2%	0.0%
3.1	0.2%	0.1%	0.0%
3.4	0.1%	0.0%	0.0%
3.7	0.0%	0.1%	0.0%
Total	51.4%	34.4%	14.2%

## Heading rispetto al Nord

FPSO Heading Vs Probability with respect to grid north

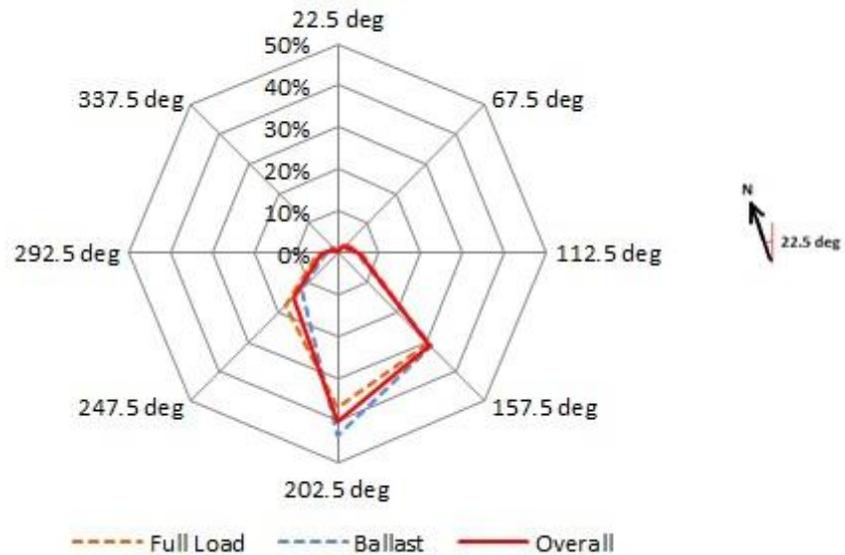


Figura 4.13 Probabilità di Occorrenza – Heading rispetto al Nord

Si riportano i medesimi risultati in forma tabulare:

Tabella 4-10 Heading Vs probabilità

Heading (deg)	Probabilità rispetto al Nord		
	Full Load	Ballast	Overall
22.5	0%	1%	1%
67.5	3%	2%	2%
112.5	6%	5%	5%
157.5	30%	32%	31%
202.5	37%	44%	40%
247.5	18%	12%	15%
292.5	5%	3%	4%
337.5	1%	2%	1%
Total	100%	100%	100%

\*0 deg indica la direzione North. Gli angoli sono misurati in senso orario.

I risultati mostrano che la probabilità di avere la nave disposta verso sud, +/- 22.5, è pari al 71%, conseguenza della direzione di provenienza dello swell, dal quadrante S – SW.

La probabilità di occorrenza di determinati angoli di incontro con le onde incidenti è riportata nella tabella 4-11.

Tabella 4-11  $\mu R$  Vs Probabilità

$\mu R$ (deg)	Probabilità (%)
0 to 10	17.3%
10 to 20	18.2%
20 to 30	15.9%
30 to 40	13.7%
40 to 50	11.5%
50 to 60	9.2%
60 to 70	7.0%
70 to 80	4.7%
80 to 90	2.5%

La probabilità che si verificano angoli di impatto inferiori a  $30^\circ$  è il 51.4%. Con probabilità intorno al 41.4% si verificano angoli compresi tra  $30^\circ$  e  $70^\circ$ . Angoli compresi tra  $70^\circ$  e  $90^\circ$  si verificano con il 7.2% di probabilità.

# Capitolo 5

## Moti Nave

### 5.1 Funzioni di Trasferimento - RAO

Lo scopo dell'analisi idrodinamica è quello di valutare le caratteristiche idrodinamiche dello scafo quando investito dalle onde.

I RAO (*Response Amplitude Operator*), sono stati calcolati in corrispondenza del centro di gravità dell'*FPSO* con l'ausilio del software *HydroD*, fornito dal registro di classificazione norvegese DNV. Il processo di analisi può essere sintetizzato mediante lo schema seguente:

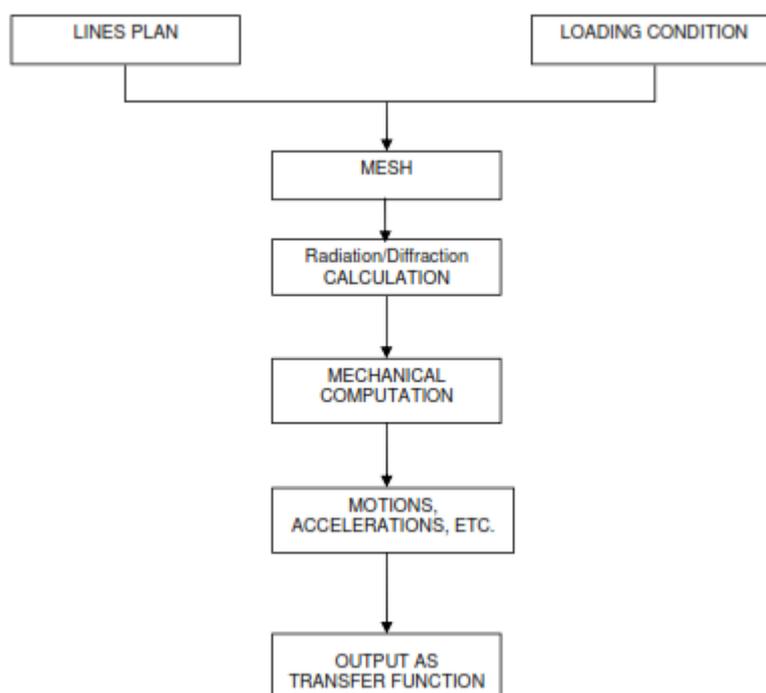


Figura 5-1 Metodologia dell'analisi

Con alla base la teoria dei potenziali, il software simula il flusso tridimensionale intorno ad oggetti fissi o galleggianti, sia in acque profonde che con altezze di fondale limitate. L'analisi dei carichi idrodinamici e dei moti nave è stata condotta analizzando il modello della carena nel dominio delle frequenze.

Le analisi sono state ripetute per un gran numero di frequenze, da 0.050 a 1.8 rad/s con intervalli di ampiezza 0.025. Per le frequenze vicine alla risonanza, l'intervallo di indagine è stato ristretto ulteriormente utilizzando 0.005 rad/s. Sono state analizzate onde provenienti da 360° con step da 15°.

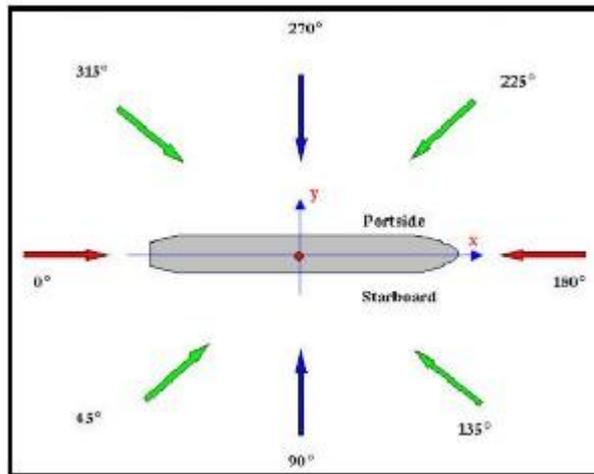


Figura 5-2 Convenzione direzioni di provenienza

Il risultato delle analisi idrodinamiche consiste nell'individuazione delle funzioni di trasferimento dei moti primo ordine e del secondo ordine a basse frequenze, al fine di consentire il calcolo di:

- Moti al centro di gravità
- Massa aggiunta/radiation damping
- Funzioni Quadratiche di trasferimento (QTF)

Le principali caratteristiche dell'unità e le condizioni di carico considerate sono riassunte nelle tabelle 5-1 e 5-2:

Tabella 5-1 Dati principali dello scafo

Dati Principali Scafo	
LOA (m)	335.0
LBP (m)	320.0
B (m)	58.0
D (m)	31.2

Tabella 5-2 Condizioni di carico

Condizioni di Carico Rilevanti				
Condizioni di Carico		Ballast	Intermediate	Full Load
Immersione (m)		9	16.1	21.7
Dislocamento (t)		134527	244865	337843
LCG (m) da AP		183.1	178.8	175.2
TCG (m)		0	0	0
VCG (m) da K		20.6	19.4	19.1
2nd mass moment of vessel	l <sub>xx</sub> (Te.m <sup>2</sup> )	6.45E+07	5.52E+07	8.59E+07
	l <sub>yy</sub> (Te.m <sup>2</sup> )	1.02E+09	1.34E+09	1.85E+09
	l <sub>zz</sub> (Te.m <sup>2</sup> )	1.04E+09	1.36E+09	1.89E+09
Radius of gyration of vessel	R <sub>xx</sub> (m)	21.9	15	15.9
	R <sub>yy</sub> (m)	87.1	74.1	73.9
	R <sub>zz</sub> (m)	87.7	74.4	74.8

Nella trattazione si è considerata la scomposizione del roll damping come di seguito esplicitato:

$$B_T = B_F + B_E + B_L + B_W + B_{BKN} + B_{BKH} + B_{BKW} + B_{SK}$$

dove:

- $B_F$  è lo smorzamento dovuto alla forza d'attrito generata dall'acqua sullo scafo durante il moto di rollio;
- $B_E$  è lo smorzamento dovuto alla generazione di vortici in corrispondenza della poppa e della curvatura del ginocchio nel corpo cilindrico;
- $B_L$  è lo smorzamento dovuto ai fenomeni di portanza che si verificano sullo scafo durante il moto di rollio quando la nave è dotata di velocità di avanzo non nulla;
- $B_W$  è lo smorzamento dovuto alla generazione di moto ondoso da parte dei moti nave;
- $B_{BKN}$  è la forza normale all' aletta anti rollio;

- $B_{BKH}$  è la componente dovuta alla variazione dei profili di pressione sullo scafo per la presenza dell'aletta anti rollio;
- $B_{BKW}$  è lo smorzamento dovuto alla generazione di moto ondoso da parte dell'aletta anti rollio;
- $B_{SK}$  è la forza normale che si genera in corrispondenza della poppa.

I risultati delle analisi per le componenti lineari e quadratiche del roll damping sono riportate nella tabella 5-3.

Tabella 5-3 Roll Damping

Item	Full Load	Inter	Ballast	Transit
Linear damp (Nms/rad)	2.91E+08	3.08E+08	3.16E+08	3.02E+08
Quadratic damp (Nms <sup>2</sup> /rad <sup>2</sup> )	1.12E+11	1.09E+11	1.06E+11	0.71E+11

### Massa Aggiunta

Si riporta in tabella 5-4 la massa aggiunta calcolata al variare delle condizioni di carico.

Tabella 5-4 Massa aggiunta

Degree of freedom	Massa aggiunta		
	Full Load	Intermediate	Ballast
Surge (t)	22334	13884	5286
Sway (t)	281712	161875	56625
Yaw (t.m)	1.45E+09	8.40E+08	2.97E+08

### Periodo Naturale

Si riporta in tabella 5-5 il periodo naturale per i moti di Rollio, beccheggio e sussulto, al variare delle condizioni di carico.

Tabella 5-5- Periodi Naturali

Degree of Freedom	Natural Period (s)		
	Full Load	Intermediate	Ballast
Rollio	17.1	16.1	15
Beccheggio	12.3	11.4	11.2
Sussulto	12.9	12.1	11.4

## RAO's and Drift Loads

### Condizione di Pieno Carico

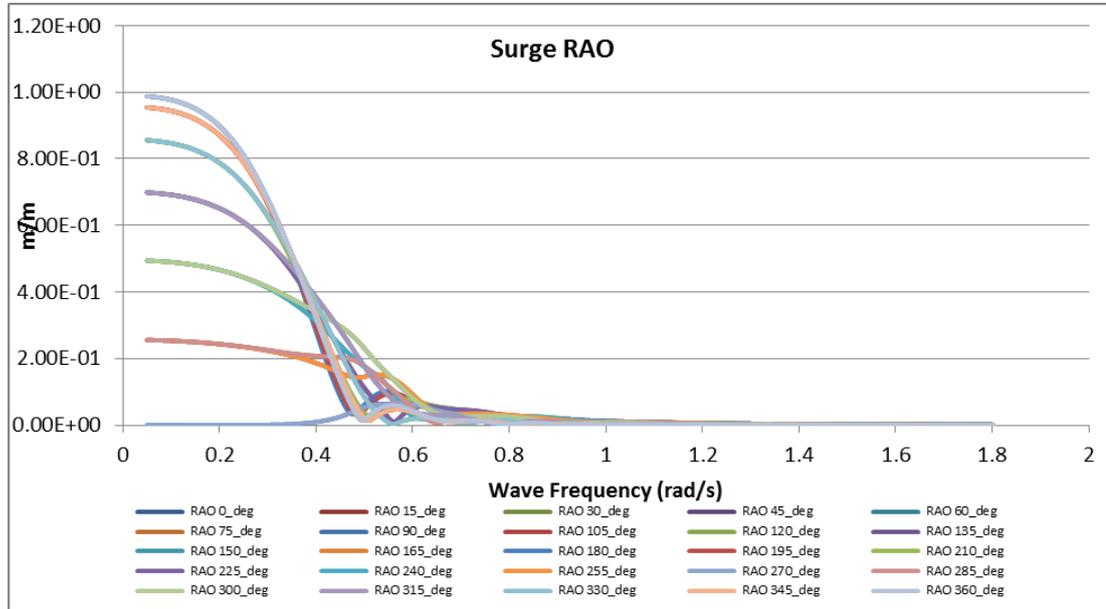


Figura 5-3 FL-Surge RAO

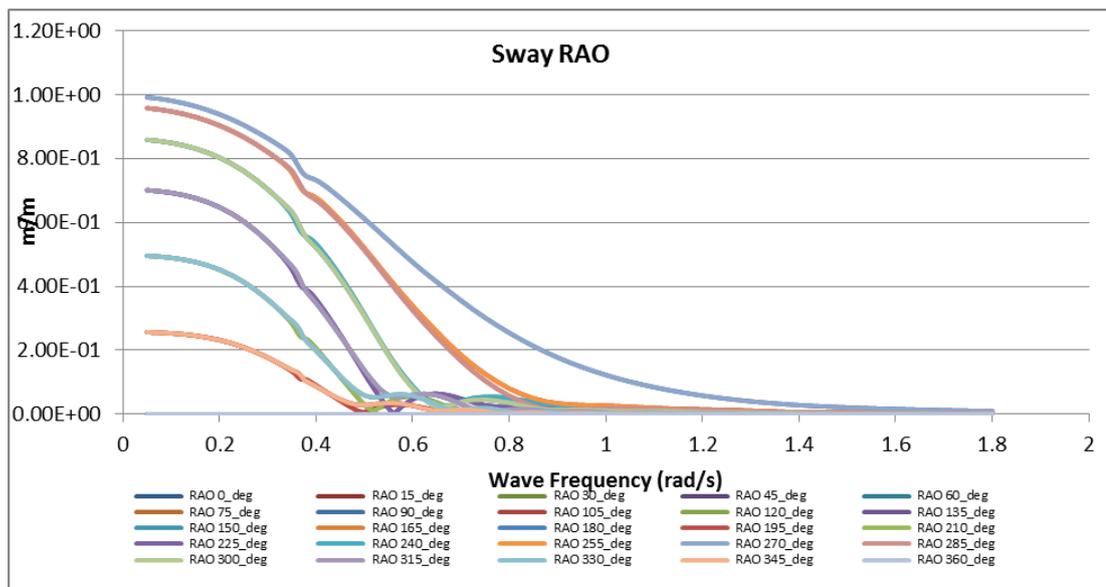


Figura 5-4 FL-Sway RAO

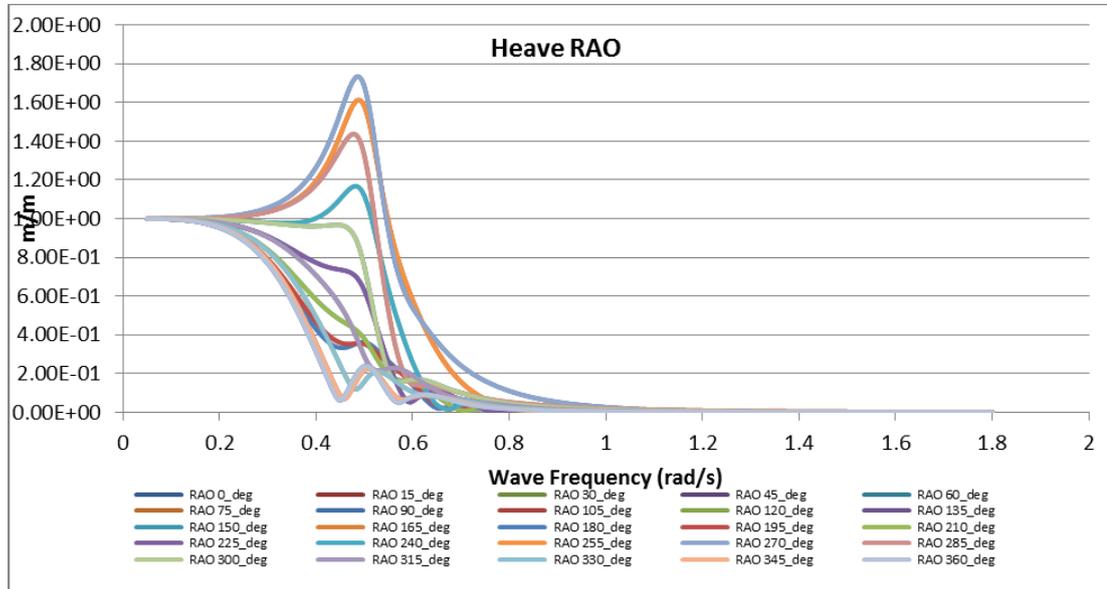


Figura 5-5 FL-Heave RAO

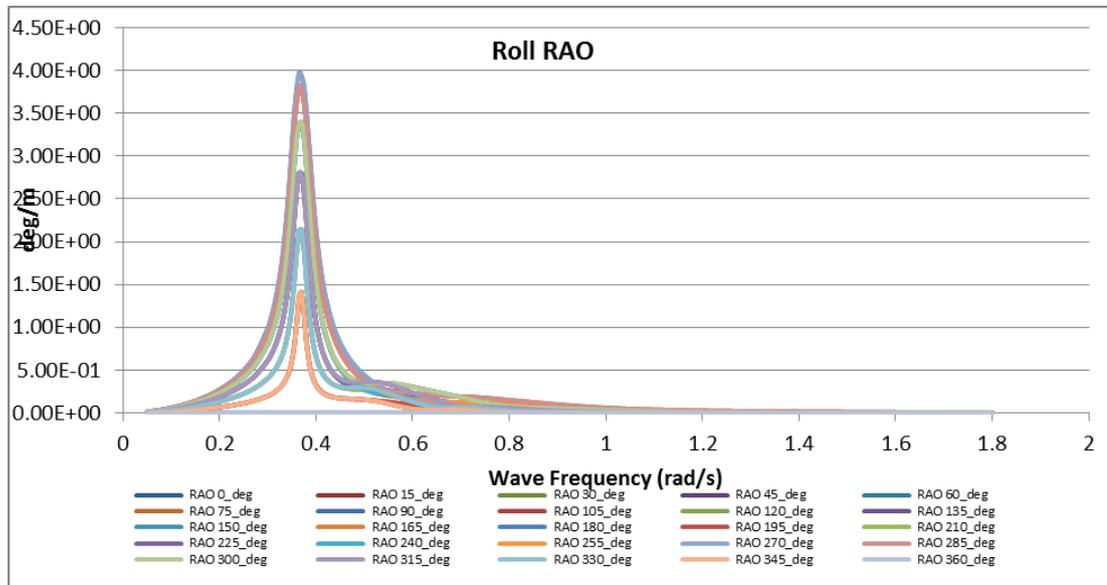


Figura 5-6 FL-Roll RAO

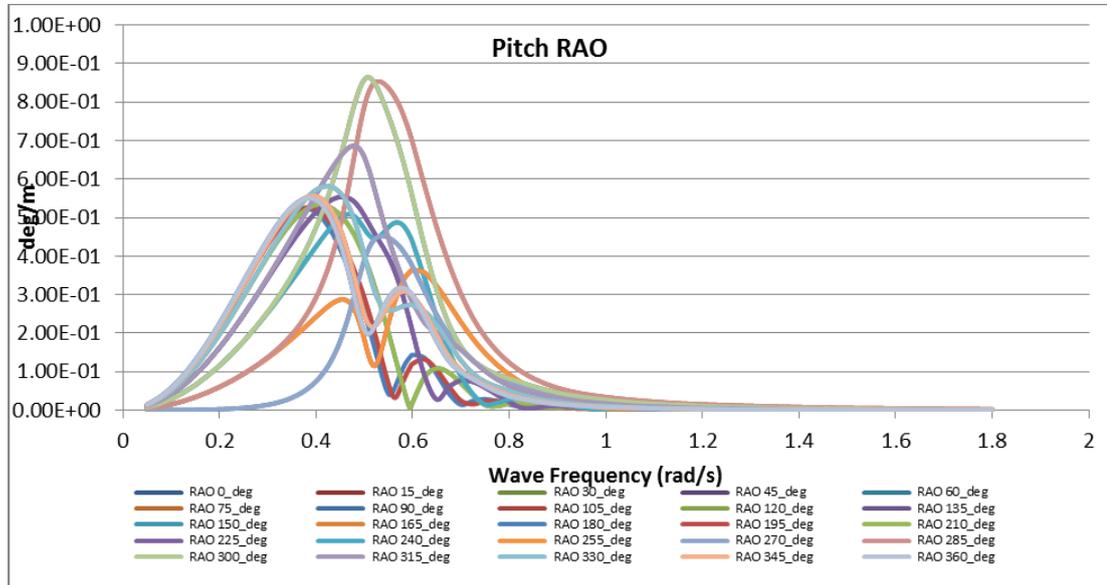


Figura 5-7 FL-Pitch RAO

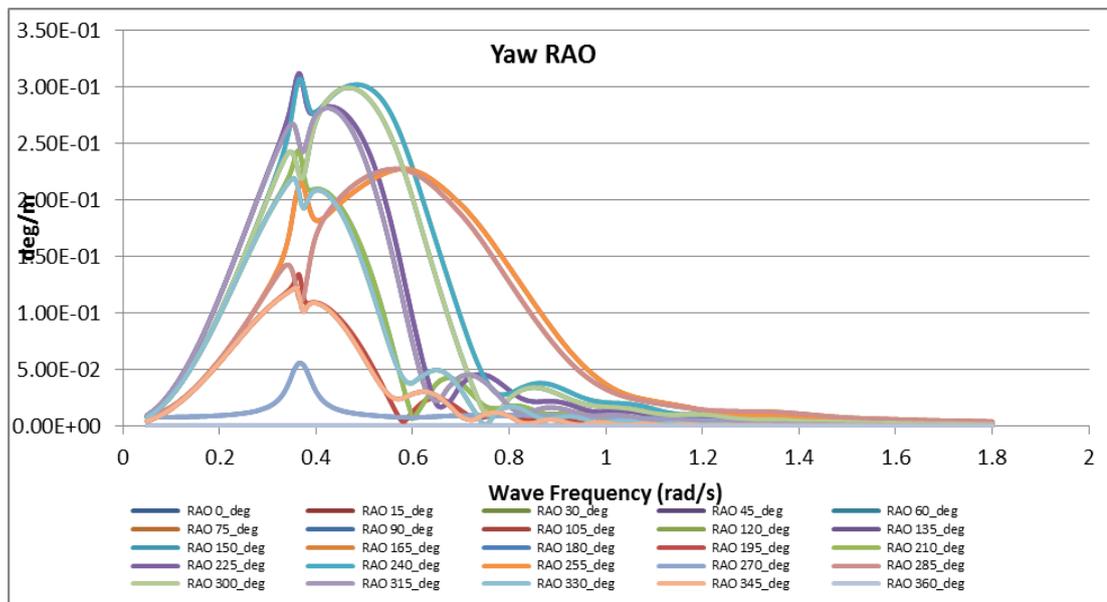


Figura 5-8 FL-Yaw RAO

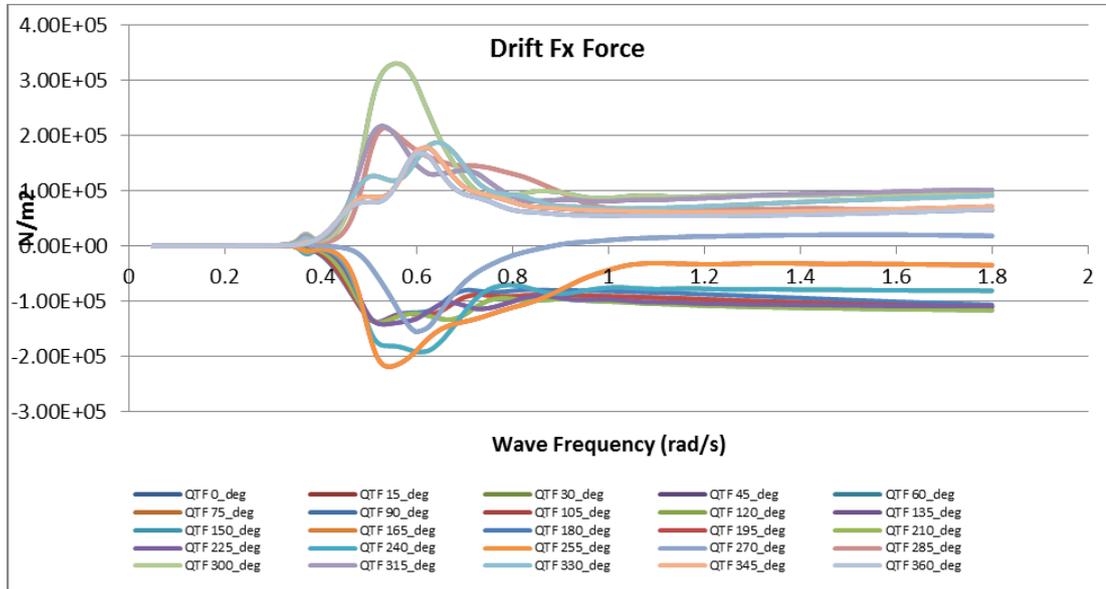


Figura 5-9 Fx Drift Force

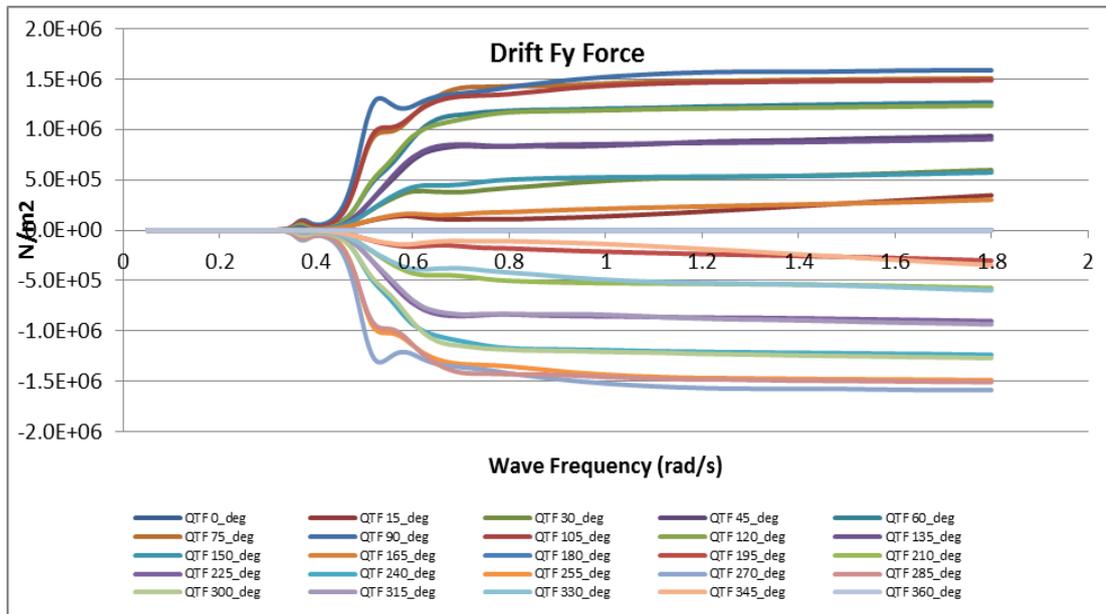


Figura 5-10 Fy Drift Force

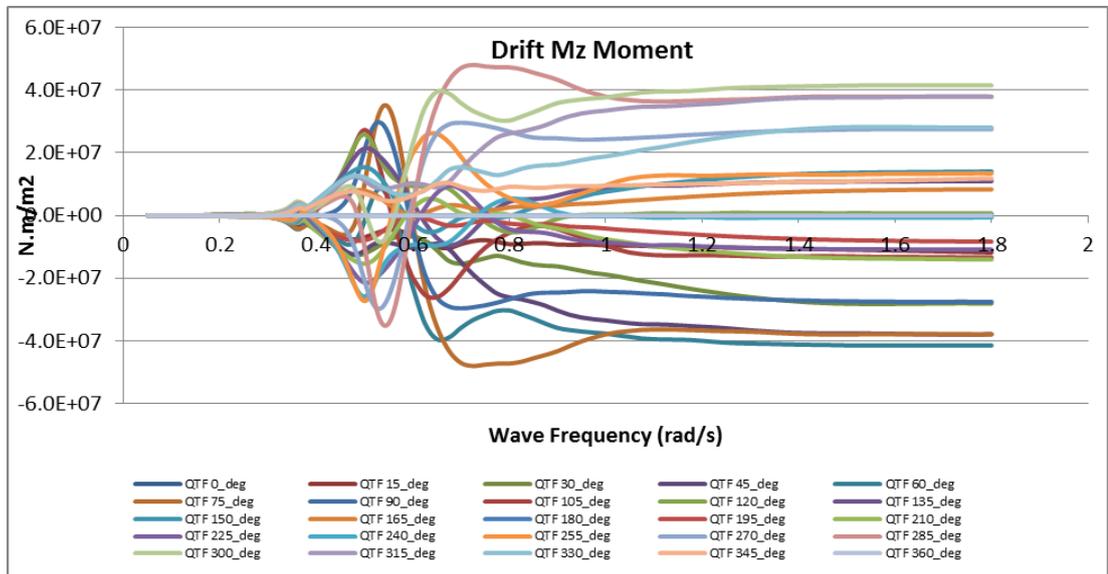


Figura 5-11 Mz Drift Moment

## Condizione di Carico Intermedia

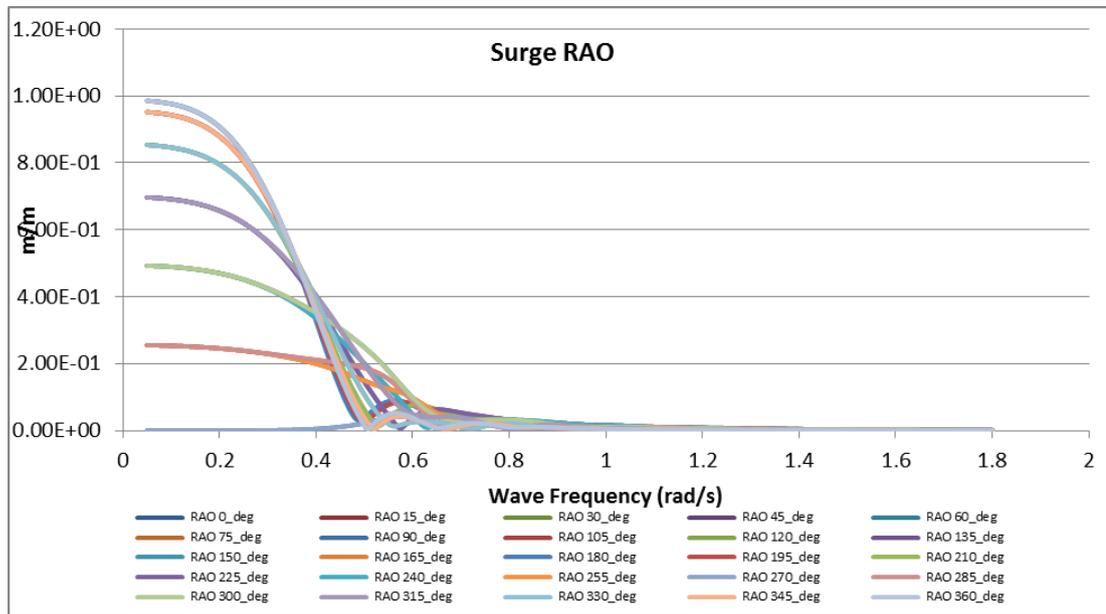


Figura 5-12 IL-Surge RAO

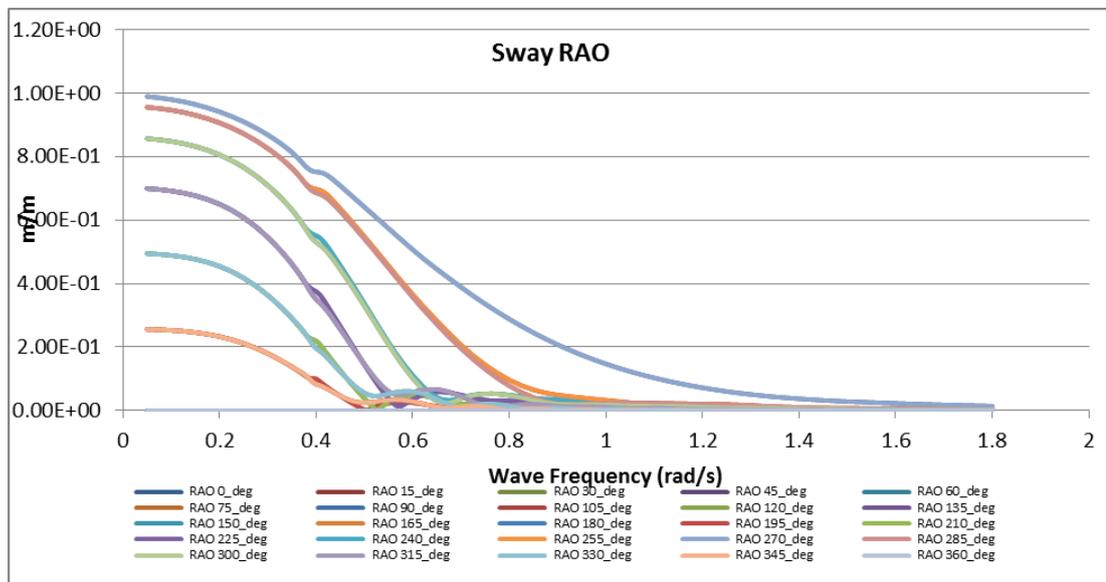


Figura 5-13 IL-Sway RAO

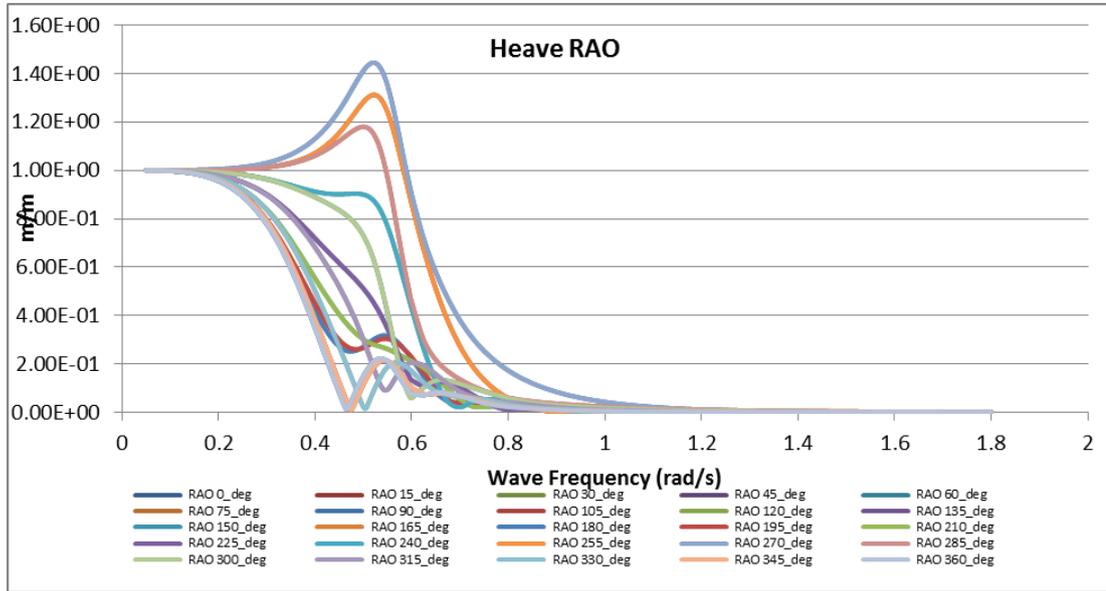


Figura 5-14 IL-Heave RAO

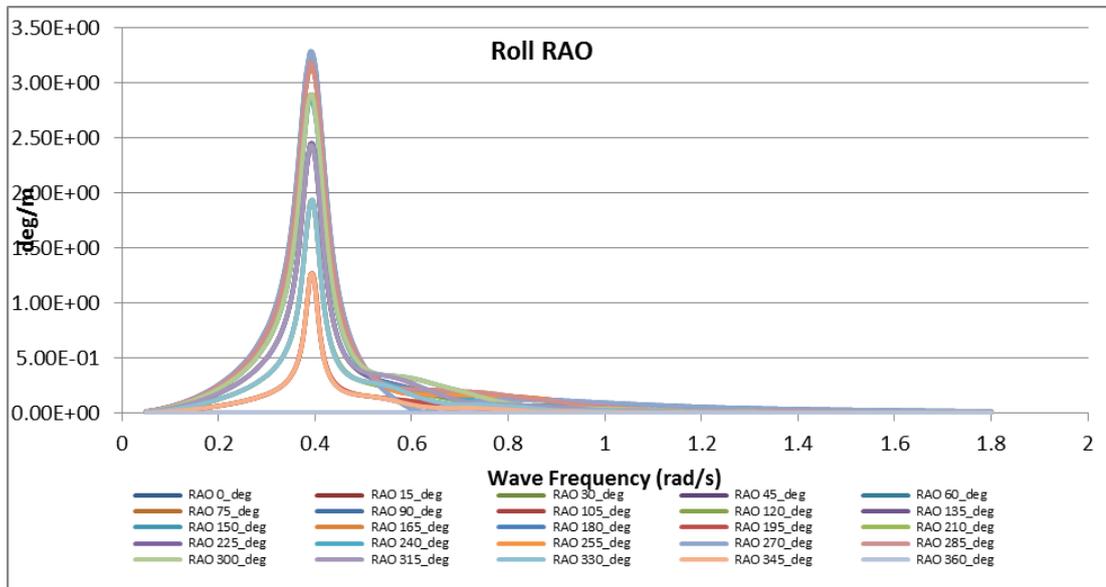


Figura 5-15 IL-Roll RAO

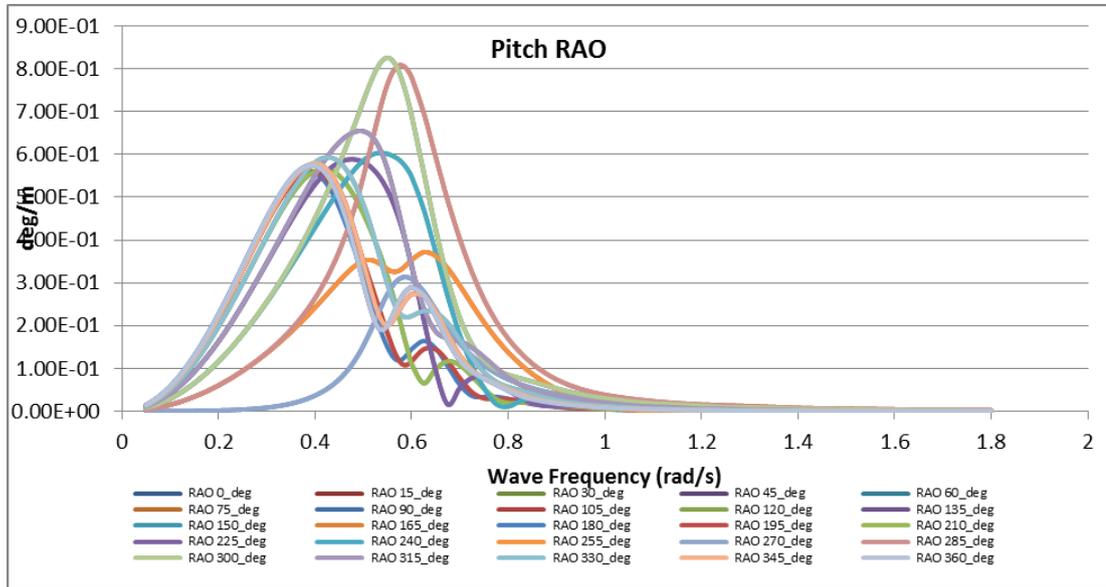


Figura 5-16 IL-Pitch RAO

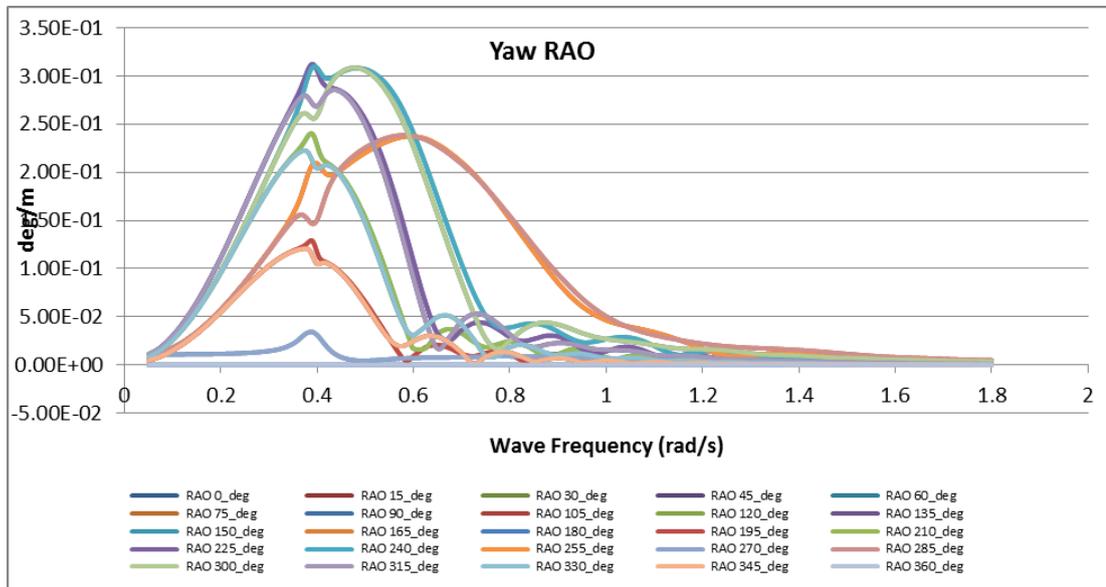


Figura 5-17 IL-Yaw RAO

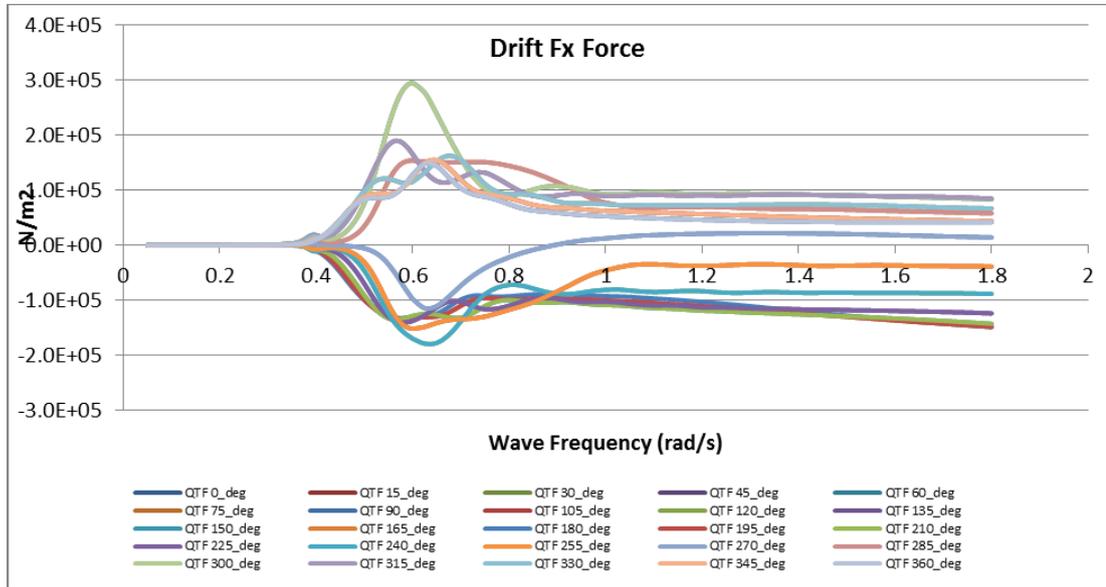


Figura 5-18 Fx Drift Force

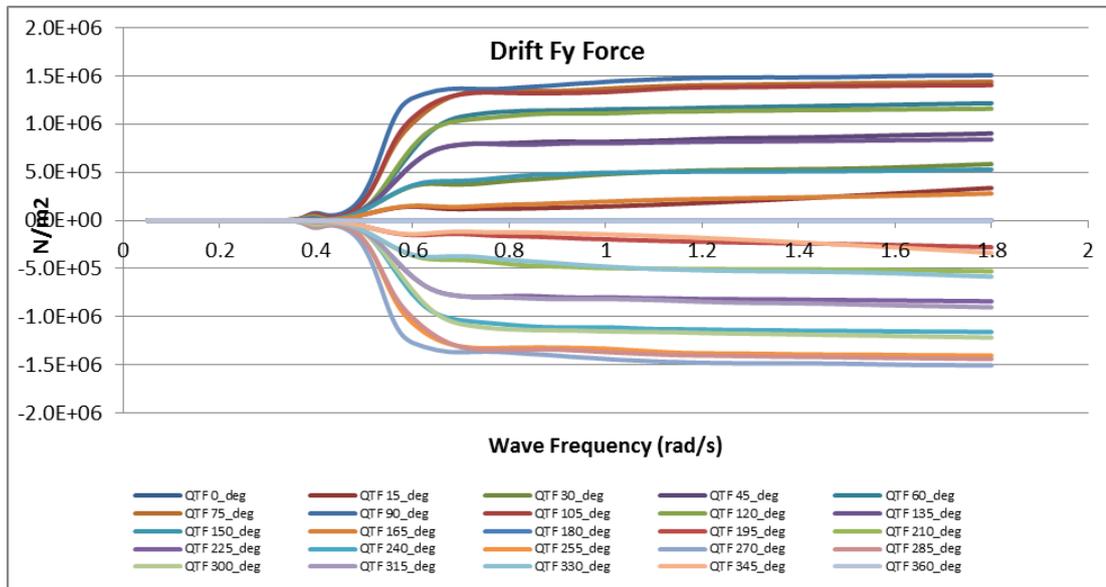


Figura 5-19 Fy Drift Force

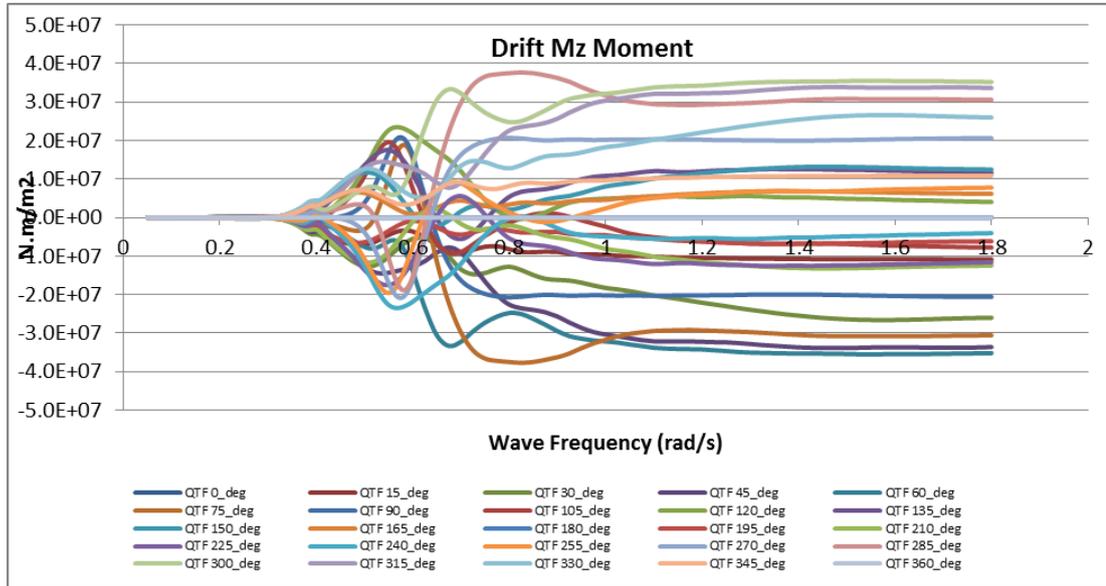


Figura 5-20 Mz Drift Moment

## Condizione di Carico di zavorra

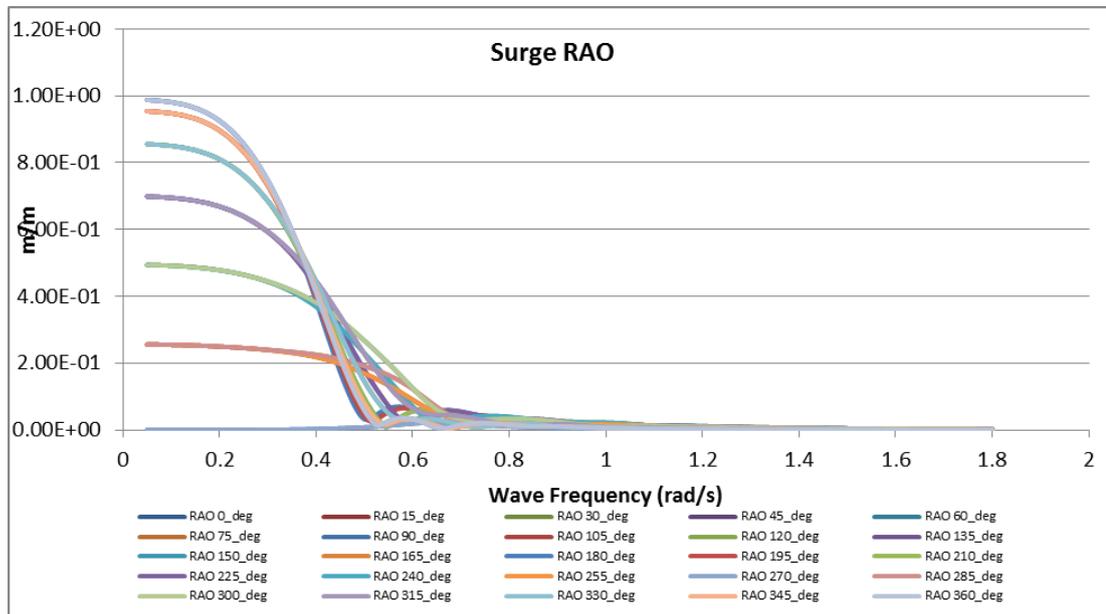


Figura 5-21 BL-Surge RAO

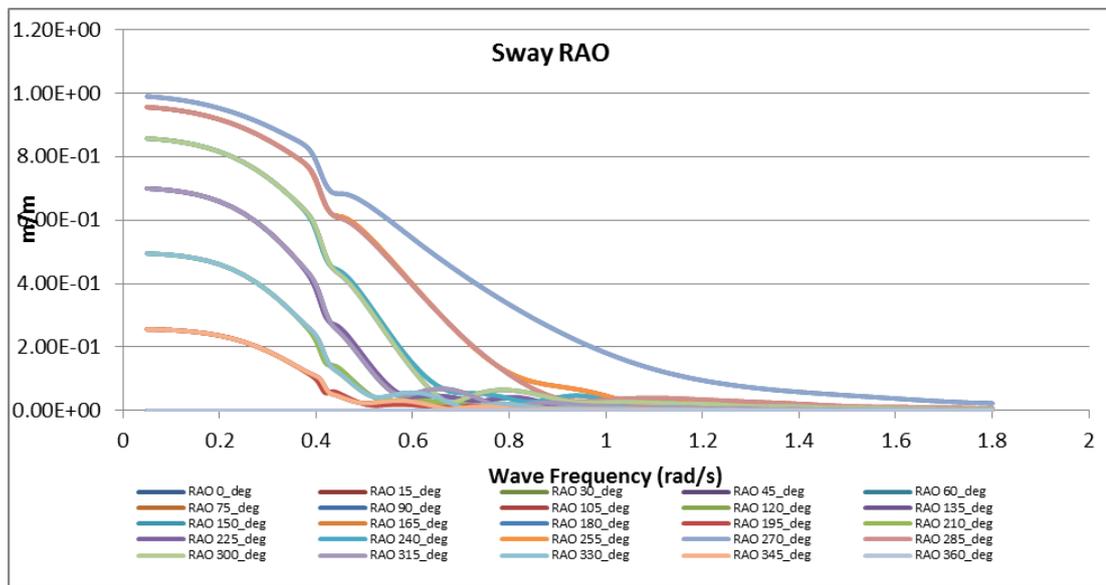


Figura 5-22 BL-Sway RAO

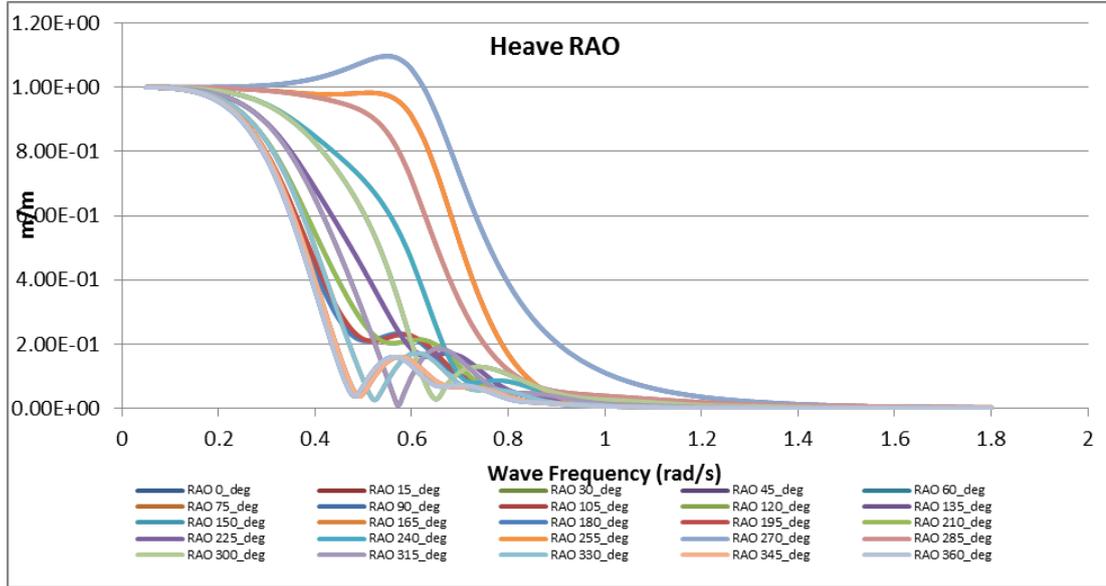


Figura 5-23 BL-Heave RAO

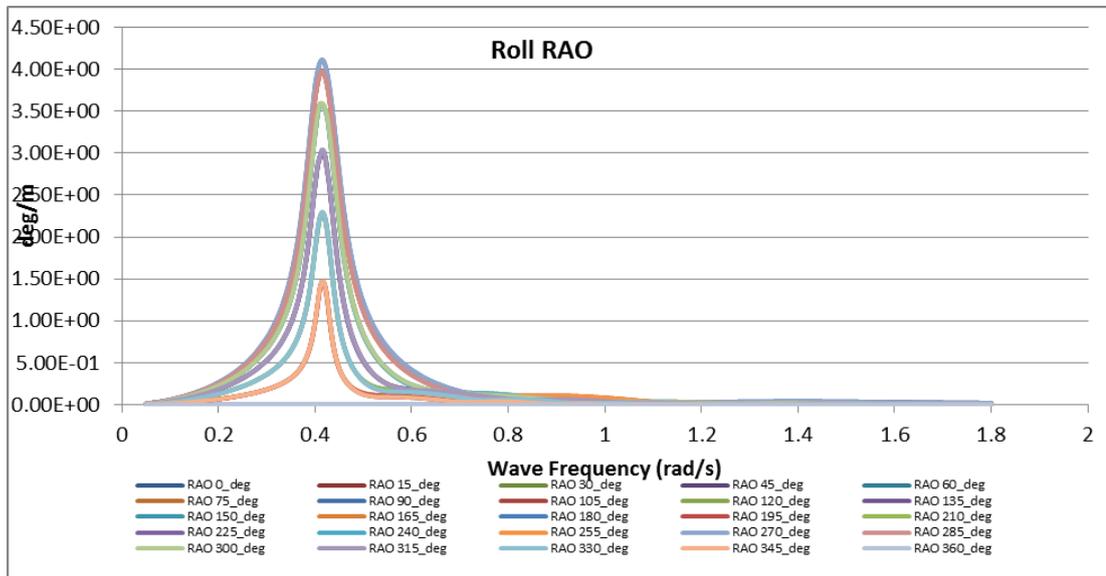


Figura 5-24 BL-Roll RAO

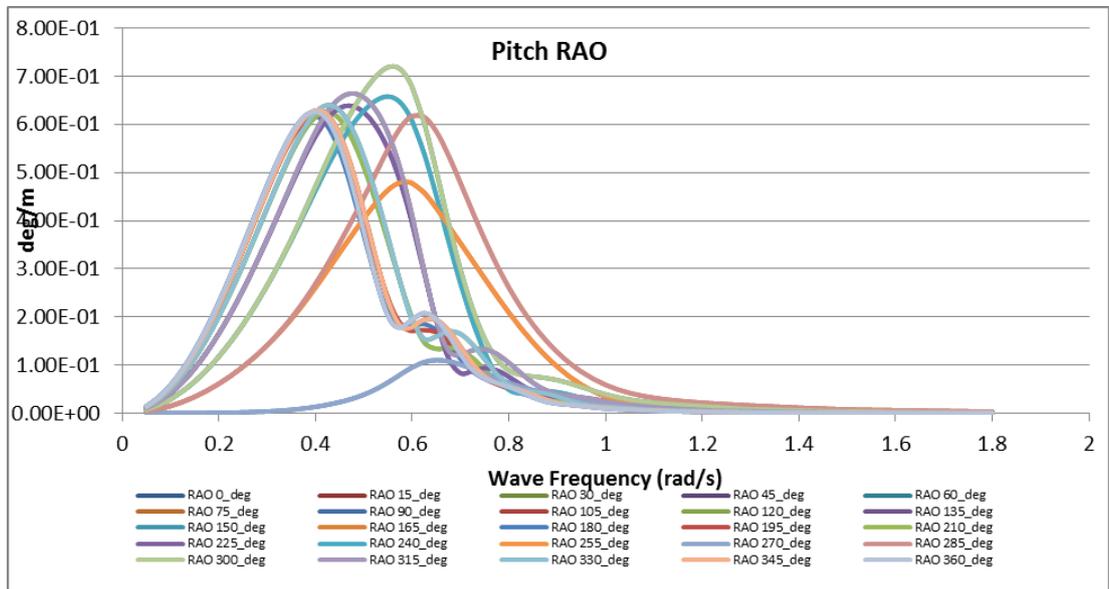


Figura 5-25 BL-Pitch RAO

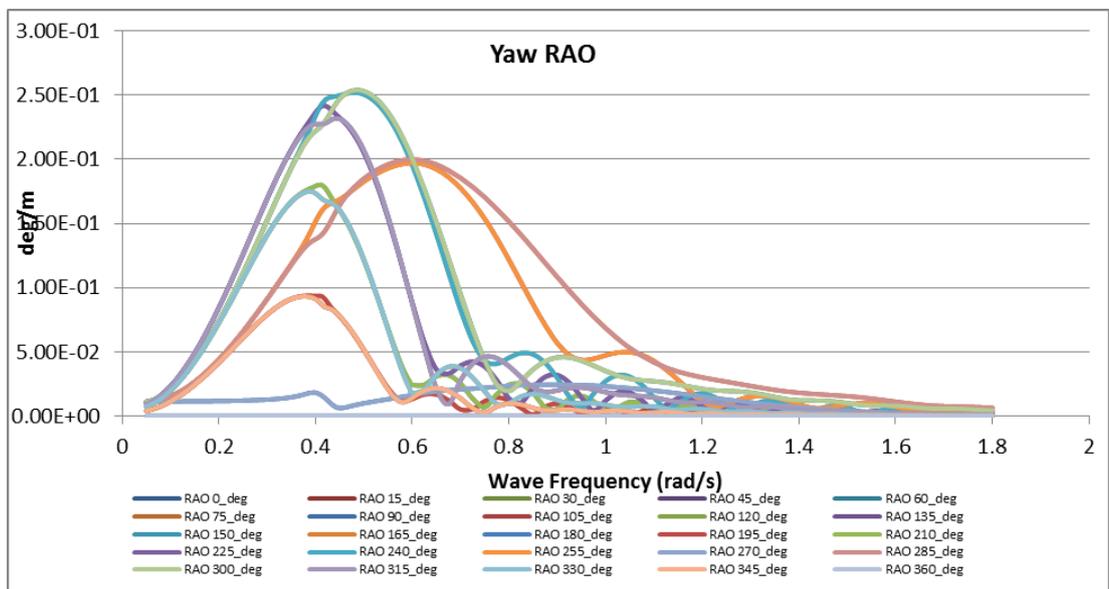


Figura 5-26 FL-Yaw RAO

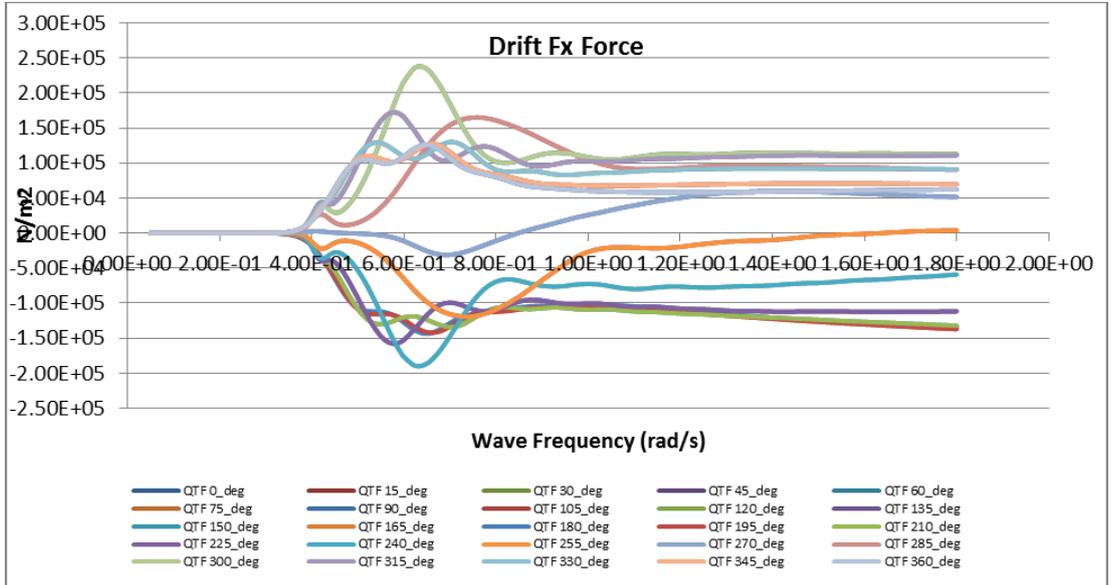


Figura 5-27 Fx Drift Force

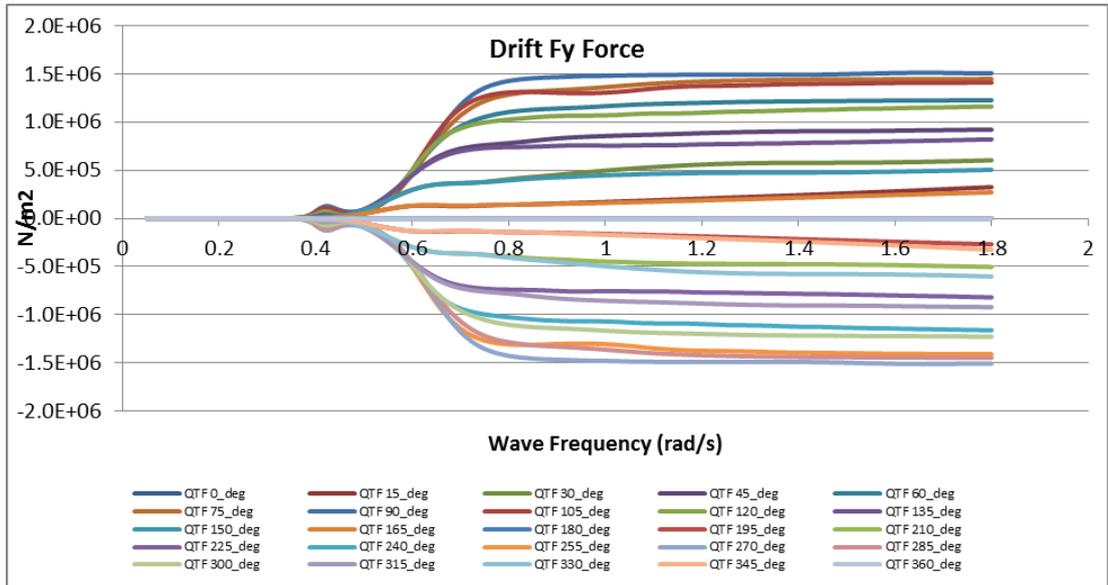


Figura 5-28 Fy Drift Force

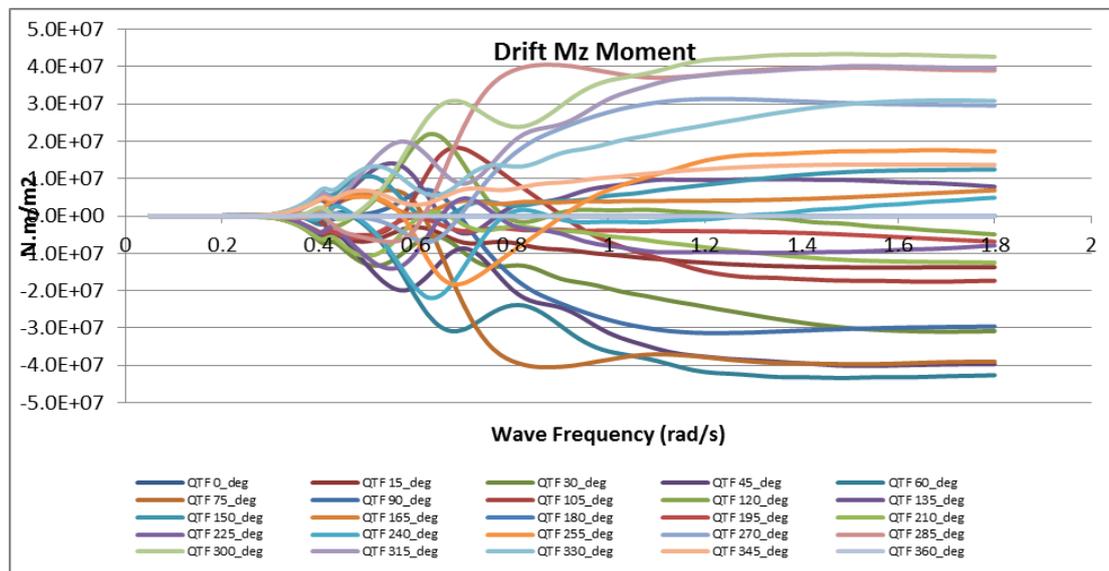


Figura 5-29 Mz Drift Moment

## 5.2 Moti Nave ed Accelerazioni

Nelle medesime condizioni di carico considerate per l'individuazione delle caratteristiche idrodinamiche dello scafo, si è proceduto con l'analisi dei moti nave soggetta alle sollecitazioni specifiche del sito di installazione. L'Analisi dinamica è stata eseguita a breve e lungo termine, considerando le condizioni di carico di Zavorra, Intermedia e Pieno carico.

Lo scopo dell'analisi è stato:

- Prescrivere i massimi spostamenti in corrispondenza del centro di gravità;
- Prescrivere le accelerazioni massime per periodi di ritorno di 1 anno, 10 anni, 100 anni;
- Prescrivere il range delle accelerazioni vs numero di cicli usando l'analisi dei moti a lungo termine.

- Fornire moti ed accelerazioni necessarie per il dimensionamento di dettaglio dell'FPSO (Strutture Topside, Mooring, Carichi inerziali in genere).

La metodologia seguita è riportata in figura 5-30.

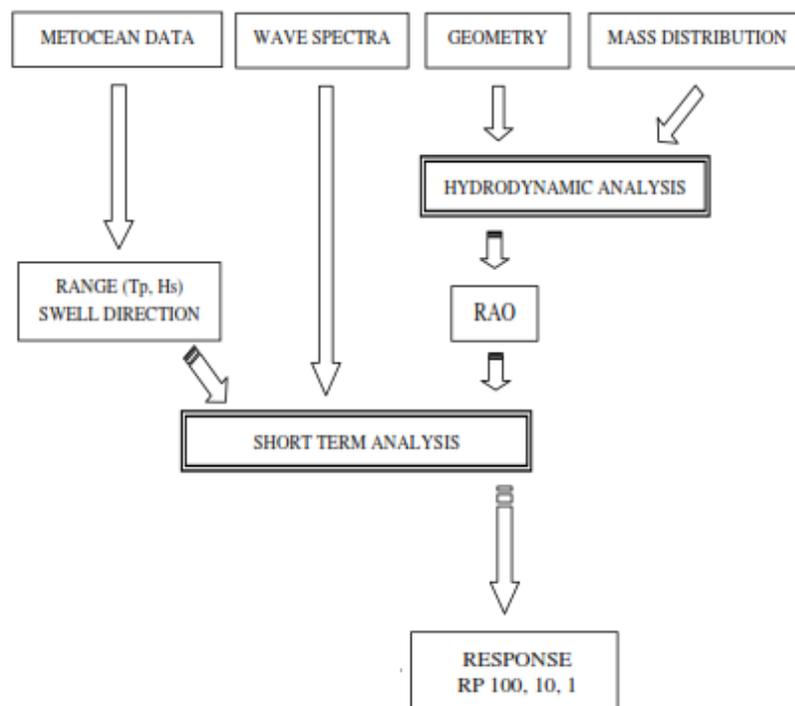


Figura 5-30. Metodologia: Analisi a breve termine

### ***Risposta a Breve Termine***

Per la risposta a breve termine sono state considerate le condizioni di mare e vento (swell e squall) tipiche dell'area geografica, caratterizzate da periodo di ritorno pari a 1, 10 e 100 anni.

Nell'analisi sono state considerate le condizioni estreme di moto ondoso e moto ondoso associato alle correnti superficiali.

Per condizioni di onde predominanti, si sono analizzati angoli relativi fino a 60°. Nel caso di squall predominante si sono considerati angoli relativi fino a 90°. Tale approccio, diversificato in base alla condizione di carico, è stato considerato in quanto

lo squall è statisticamente indipendente da altre sollecitazioni ambientali e in quanto preso al traverso, influenza sensibilmente l'Heading della struttura ormeggiata.

Le analisi sono state eseguite considerando lo spettro di Ochi-Hubble. Le condizioni ambientali considerate sono riportate nella tabella 5-6.

Tabella 5-6 Condizioni Meteomarine

Type	Return Period	Direction (deg)*	Swell			Wind sea		
			Hs (m)	Tp (s)	Lambda	Hs (m)	Tp (s)	Lambda
Wave Extremes	1-Year	0,10,20,30,40,50,60	3.1	12.2,14.8,18.1	6	0.2	1.8	1
	10-Year		3.8	13.6,16.0,18.5				
	100-Year		4.5	14.9,17.0,18.8				
Wind/River plumes Extremes	1-Year	0,15,30,45,60,90	2.3	11.3,13.3,15.6		0.8	3.0	1
	10-Year					1.1	3.4	
	100-Year					1.4	3.8	

\*0 deg : mare di prora , 90 deg : mare al traverso

Le condizioni estreme di corrente sono meno gravose rispetto ai carichi d'onda e i carichi da vento. Per questo motivo non sono state considerate nell'analisi.

### Analisi a lungo termine

A partire dalla tabella 4-2, le 144 condizioni di carico sono state ridotte considerando un'unica condizione di mare da vento, con  $H_s = 0.2$  m e  $T_p = 1.8$  s e il 95% di probabilità di non essere superato

Le condioni ambientali, riportate nella tabella 5-7, sono state ridotte quindi a  $144/3 = 48$ .

Tabella 5-7 Combinazioni carichi ambientali per l'analisi a lungo termine

Caso	Swell			Mare da vento			Probabilità %
	Hs (m)	Tp (s)	Lambda	Hs (m)	Tp (s)	Lambda	
1	0.7	7.3	6	0.2	1.8	1	0.287
2	0.7	11.4	10	0.2	1.8	1	0.230
3	0.7	14.4	20	0.2	1.8	1	0.058
4	0.9	6.0	6	0.2	1.8	1	0.541
5	0.9	9.0	6	0.2	1.8	1	2.162
6	0.9	12.6	10	0.2	1.8	1	2.162
7	0.9	15.2	20	0.2	1.8	1	0.541
8	1.1	7.0	6	0.2	1.8	1	1.640
9	1.1	9.0	6	0.2	1.8	1	6.541
10	1.1	12.3	6	0.2	1.8	1	6.524
11	1.1	15.1	15	0.2	1.8	1	1.472
12	1.1	18.2	40	0.2	1.8	1	0.164
13	1.4	7.8	6	0.2	1.8	1	2.875
14	1.4	19.0	6	0.2	1.8	1	11.500
15	1.4	12.5	6	0.2	1.8	1	11.500
16	1.4	15.2	15	0.2	1.8	1	2.588
17	1.4	18.1	40	0.2	1.8	1	0.288
18	1.6	8.1	6	0.2	1.8	1	2.568
19	1.6	10.4	6	0.2	1.8	1	10.274
20	1.6	12.7	6	0.2	1.8	1	10.274
21	1.6	15.6	15	0.2	1.8	1	2.312
22	1.6	18.8	40	0.2	1.8	1	0.257
23	1.9	9.0	6	0.2	1.8	1	1.301
24	1.9	11.1	6	0.2	1.8	1	5.205
25	1.9	13.1	6	0.2	1.8	1	5.205
26	1.9	16.2	15	0.2	1.8	1	1.171
27	1.9	18.6	40	0.2	1.8	1	0.130
28	2.1	9.6	6	0.2	1.8	1	0.528
29	2.1	11.7	6	0.2	1.8	1	2.113
30	2.1	14.1	6	0.2	1.8	1	2.113
31	2.1	16.4	6	0.2	1.8	1	0.475
32	2.1	18.3	6	0.2	1.8	1	0.053
33	2.4	9.9	6	0.2	1.8	1	0.287
34	2.4	11.6	6	0.2	1.8	1	1.150
35	2.4	14.2	6	0.2	1.8	1	1.150
36	2.4	16.6	6	0.2	1.8	1	0.287
37	2.6	11.5	6	0.2	1.8	1	0.281
38	2.6	13.0	6	0.2	1.8	1	0.561
39	2.6	15.8	6	0.2	1.8	1	0.281
40	2.9	12.3	6	0.2	1.8	1	0.113
41	2.9	14.2	6	0.2	1.8	1	0.226
42	2.9	16.1	6	0.2	1.8	1	0.113
43	3.1	12.8	6	0.2	1.8	1	0.164
44	3.1	15.9	6	0.2	1.8	1	0.164
45	3.4	14.1	6	0.2	1.8	1	0.027
46	3.4	17.0	6	0.2	1.8	1	0.027
47	3.7	14.0	6	0.2	1.8	1	0.055
48	3.7	16.9	6	0.2	1.8	1	0.055

La tabella 5-7 rappresenta gli stati di mare osservati nell'area geografica, considerati indipendentemente dall'angolo di impatto con la struttura. Per procedere con l'analisi è stato necessario considerare i risultati dell'analisi di Heading riportati nella tabella 5-8.

Tabella 5-8 Risultati dell'Heading analysis

$\mu R$ (deg)	Probability
0 to 10	17.3%
10 to 20	18.2%
20 to 30	15.9%
30 to 40	13.7%
40 to 50	11.5%
50 to 60	9.2%
60 to 70	7.0%
70 to 80	4.7%
80 to 90	2.5%

*\*0 deg indica la direzione North. Gli angoli sono misurati in senso orario.*

### Accelerazioni e Moti Nave – Analisi a breve Termine

Le accelerazioni massime lungo gli assi X, Y e Z, considerando le tre immersioni a pieno carico, zavorra ed intermedia, sono riportate nella tabella 5-9.

Tabella 5-9 Risultati - Accelerazioni

No.	Points	1 Year RP			10 Year RP			100 Year RP		
		Max Ax (m/s <sup>2</sup> )	Max Ay (m/s <sup>2</sup> )	Max Az (m/s <sup>2</sup> )	Max Ax (m/s <sup>2</sup> )	Max Ay (m/s <sup>2</sup> )	Max Az (m/s <sup>2</sup> )	Max Ax (m/s <sup>2</sup> )	Max Ay (m/s <sup>2</sup> )	Max Az (m/s <sup>2</sup> )
1	COG	0.33	1.48	0.78	0.36	1.72	0.83	0.38	2.17	0.88
2	Chaintable	0.44	2.08	1.89	0.46	2.42	1.88	0.49	3.03	1.78

### Moti Nave

Tabella 5-10 Risultati Moti

Moti	Valori		
	1-Yr RP	10-Yr RP	100-Yr RP
Surge (m)	1.4	1.8	2.2
Sway (m)	2.9	3.8	4.6
Heave (m)	3.2	3.7	4.5
Roll (deg)	7.3	9.0	10.7
Pitch (deg)	1.8	2.2	2.5
Yaw (deg)	0.9	1.1	1.3

## Risultati a Lungo Termine

Tabella 5-11 Risultati Lungo Termine

X-Accelerations				Y-Accelerations				Z-Accelerations			
LTP1_Ship COG		LTP2_Chaintable		LTP1_Ship COG		LTP2_Chaintable		LTP1_Ship COG		LTP2_Chaintable	
Range	No. of										
(m/s <sup>2</sup> )	cycles										
0.00E+00	5.47E+07	0.00E+00	5.45E+07	0.00E+00	4.47E+07	0.00E+00	4.47E+07	0.00E+00	5.33E+07	0.00E+00	5.36E+07
3.92E-03	5.42E+07	5.11E-03	5.39E+07	2.08E-02	3.57E+07	2.60E-02	3.92E+07	1.23E-02	4.85E+07	1.92E-02	5.22E+07
7.83E-03	5.29E+07	1.02E-02	5.25E+07	4.16E-02	2.77E+07	5.20E-02	3.11E+07	2.46E-02	4.27E+07	3.84E-02	5.00E+07
1.18E-02	5.12E+07	1.53E-02	5.05E+07	6.25E-02	2.17E+07	7.80E-02	2.48E+07	3.69E-02	3.75E+07	5.76E-02	4.76E+07
1.57E-02	4.91E+07	2.04E-02	4.84E+07	8.33E-02	1.74E+07	1.04E-01	2.02E+07	4.92E-02	3.28E+07	7.69E-02	4.50E+07
1.96E-02	4.69E+07	2.55E-02	4.60E+07	1.04E-01	1.42E+07	1.30E-01	1.68E+07	6.15E-02	2.84E+07	9.61E-02	4.23E+07
2.35E-02	4.45E+07	3.06E-02	4.35E+07	1.25E-01	1.18E+07	1.56E-01	1.41E+07	7.38E-02	2.43E+07	1.15E-01	3.98E+07
2.74E-02	4.21E+07	3.57E-02	4.11E+07	1.46E-01	9.93E+06	1.82E-01	1.20E+07	8.61E-02	2.06E+07	1.35E-01	3.73E+07
3.13E-02	3.97E+07	4.08E-02	3.86E+07	1.67E-01	8.47E+06	2.08E-01	1.02E+07	9.84E-02	1.74E+07	1.54E-01	3.49E+07
3.53E-02	3.74E+07	4.59E-02	3.62E+07	1.87E-01	7.29E+06	2.34E-01	8.76E+06	1.11E-01	1.47E+07	1.73E-01	3.26E+07
3.92E-02	3.51E+07	5.11E-02	3.39E+07	2.08E-01	6.31E+06	2.60E-01	7.55E+06	1.23E-01	1.24E+07	1.92E-01	3.04E+07
4.31E-02	3.28E+07	5.62E-02	3.16E+07	2.29E-01	5.49E+06	2.86E-01	6.54E+06	1.35E-01	1.05E+07	2.11E-01	2.84E+07
4.70E-02	3.07E+07	6.13E-02	2.95E+07	2.50E-01	4.80E+06	3.12E-01	5.67E+06	1.48E-01	8.98E+06	2.31E-01	2.64E+07
5.09E-02	2.87E+07	6.64E-02	2.75E+07	2.71E-01	4.20E+06	3.38E-01	4.93E+06	1.60E-01	7.73E+06	2.50E-01	2.45E+07
5.48E-02	2.68E+07	7.15E-02	2.56E+07	2.92E-01	3.69E+06	3.64E-01	4.30E+06	1.72E-01	6.72E+06	2.69E-01	2.27E+07
5.88E-02	2.50E+07	7.66E-02	2.39E+07	3.12E-01	3.25E+06	3.90E-01	3.76E+06	1.85E-01	5.88E+06	2.88E-01	2.10E+07
6.27E-02	2.33E+07	8.17E-02	2.22E+07	3.33E-01	2.87E+06	4.16E-01	3.29E+06	1.97E-01	5.19E+06	3.07E-01	1.94E+07
6.66E-02	2.17E+07	8.68E-02	2.06E+07	3.54E-01	2.54E+06	4.42E-01	2.89E+06	2.09E-01	4.61E+06	3.27E-01	1.79E+07
7.05E-02	2.02E+07	9.19E-02	1.91E+07	3.75E-01	2.25E+06	4.68E-01	2.54E+06	2.21E-01	4.11E+06	3.46E-01	1.65E+07
7.44E-02	1.87E+07	9.70E-02	1.77E+07	3.96E-01	2.00E+06	4.94E-01	2.24E+06	2.34E-01	3.69E+06	3.65E-01	1.52E+07
7.83E-02	1.74E+07	1.02E-01	1.64E+07	4.16E-01	1.78E+06	5.20E-01	1.98E+06	2.46E-01	3.32E+06	3.84E-01	1.40E+07
8.23E-02	1.61E+07	1.07E-01	1.52E+07	4.37E-01	1.59E+06	5.46E-01	1.76E+06	2.58E-01	2.99E+06	4.03E-01	1.28E+07
8.62E-02	1.50E+07	1.12E-01	1.40E+07	4.58E-01	1.42E+06	5.72E-01	1.56E+06	2.71E-01	2.71E+06	4.23E-01	1.18E+07
9.01E-02	1.38E+07	1.17E-01	1.29E+07	4.79E-01	1.27E+06	5.98E-01	1.39E+06	2.83E-01	2.46E+06	4.42E-01	1.08E+07
9.40E-02	1.28E+07	1.23E-01	1.19E+07	5.00E-01	1.14E+06	6.24E-01	1.24E+06	2.95E-01	2.23E+06	4.61E-01	9.94E+06
9.79E-02	1.18E+07	1.28E-01	1.10E+07	5.21E-01	1.03E+06	6.50E-01	1.11E+06	3.08E-01	2.03E+06	4.80E-01	9.13E+06
1.02E-01	1.09E+07	1.33E-01	1.01E+07	5.41E-01	9.25E+05	6.76E-01	9.98E+05	3.20E-01	1.84E+06	5.00E-01	8.37E+06
1.06E-01	1.01E+07	1.38E-01	9.32E+06	5.62E-01	8.35E+05	7.02E-01	8.97E+05	3.32E-01	1.68E+06	5.19E-01	7.68E+06
1.10E-01	9.27E+06	1.43E-01	8.57E+06	5.83E-01	7.54E+05	7.28E-01	8.09E+05	3.44E-01	1.53E+06	5.38E-01	7.04E+06
1.14E-01	8.53E+06	1.48E-01	7.87E+06	6.04E-01	6.82E+05	7.54E-01	7.30E+05	3.57E-01	1.39E+06	5.57E-01	6.45E+06
1.18E-01	7.85E+06	1.53E-01	7.23E+06	6.25E-01	6.18E+05	7.80E-01	6.61E+05	3.69E-01	1.27E+06	5.76E-01	5.90E+06

1.21E-01	7.21E+06	1.58E-01	6.63E+06	6.45E-01	5.60E+05	8.05E-01	5.99E+05	3.81E-01	1.16E+06	5.96E-01	5.40E+06
1.25E-01	6.62E+06	1.63E-01	6.08E+06	6.66E-01	5.09E+05	8.31E-01	5.43E+05	3.94E-01	1.06E+06	6.15E-01	4.95E+06
1.29E-01	6.08E+06	1.68E-01	5.57E+06	6.87E-01	4.62E+05	8.57E-01	4.94E+05	4.06E-01	9.62E+05	6.34E-01	4.52E+06
1.33E-01	5.57E+06	1.74E-01	5.10E+06	7.08E-01	4.20E+05	8.83E-01	4.49E+05	4.18E-01	8.76E+05	6.53E-01	4.14E+06
1.37E-01	5.11E+06	1.79E-01	4.67E+06	7.29E-01	3.82E+05	9.09E-01	4.09E+05	4.31E-01	7.99E+05	6.72E-01	3.78E+06
1.41E-01	4.68E+06	1.84E-01	4.27E+06	7.50E-01	3.48E+05	9.35E-01	3.73E+05	4.43E-01	7.28E+05	6.92E-01	3.45E+06
1.45E-01	4.28E+06	1.89E-01	3.91E+06	7.70E-01	3.17E+05	9.61E-01	3.40E+05	4.55E-01	6.63E+05	7.11E-01	3.15E+06
1.49E-01	3.91E+06	1.94E-01	3.57E+06	7.91E-01	2.88E+05	9.87E-01	3.10E+05	4.68E-01	6.04E+05	7.30E-01	2.88E+06
1.53E-01	3.58E+06	1.99E-01	3.26E+06	8.12E-01	2.63E+05	1.01E+00	2.83E+05	4.80E-01	5.50E+05	7.49E-01	2.63E+06
1.57E-01	3.27E+06	2.04E-01	2.98E+06	8.33E-01	2.39E+05	1.04E+00	2.59E+05	4.92E-01	5.01E+05	7.69E-01	2.39E+06
1.61E-01	2.99E+06	2.09E-01	2.72E+06	8.54E-01	2.18E+05	1.07E+00	2.36E+05	5.04E-01	4.56E+05	7.88E-01	2.18E+06
1.65E-01	2.73E+06	2.14E-01	2.48E+06	8.74E-01	1.99E+05	1.09E+00	2.16E+05	5.17E-01	4.15E+05	8.07E-01	1.99E+06
1.68E-01	2.49E+06	2.20E-01	2.27E+06	8.95E-01	1.81E+05	1.12E+00	1.97E+05	5.29E-01	3.77E+05	8.26E-01	1.81E+06
1.72E-01	2.27E+06	2.25E-01	2.07E+06	9.16E-01	1.65E+05	1.14E+00	1.80E+05	5.41E-01	3.43E+05	8.45E-01	1.65E+06
1.76E-01	2.07E+06	2.30E-01	1.88E+06	9.37E-01	1.51E+05	1.17E+00	1.65E+05	5.54E-01	3.12E+05	8.65E-01	1.50E+06
1.80E-01	1.89E+06	2.35E-01	1.72E+06	9.58E-01	1.37E+05	1.20E+00	1.51E+05	5.66E-01	2.84E+05	8.84E-01	1.37E+06
1.84E-01	1.72E+06	2.40E-01	1.57E+06	9.79E-01	1.25E+05	1.22E+00	1.38E+05	5.78E-01	2.58E+05	9.03E-01	1.25E+06
1.88E-01	1.57E+06	2.45E-01	1.43E+06	9.99E-01	1.14E+05	1.25E+00	1.26E+05	5.91E-01	2.35E+05	9.22E-01	1.13E+06
1.92E-01	1.43E+06	2.50E-01	1.30E+06	1.02E+00	1.04E+05	1.27E+00	1.15E+05	6.03E-01	2.13E+05	9.41E-01	1.03E+06
1.96E-01	1.30E+06	2.55E-01	1.18E+06	1.04E+00	9.49E+04	1.30E+00	1.05E+05	6.15E-01	1.94E+05	9.61E-01	9.37E+05
2.00E-01	1.18E+06	2.60E-01	1.08E+06	1.06E+00	8.66E+04	1.33E+00	9.60E+04	6.27E-01	1.76E+05	9.80E-01	8.52E+05
2.04E-01	1.08E+06	2.65E-01	9.80E+05	1.08E+00	7.89E+04	1.35E+00	8.77E+04	6.40E-01	1.60E+05	9.99E-01	7.75E+05
2.08E-01	9.80E+05	2.71E-01	8.92E+05	1.10E+00	7.19E+04	1.38E+00	8.01E+04	6.52E-01	1.45E+05	1.02E+00	7.04E+05
2.12E-01	8.92E+05	2.76E-01	8.11E+05	1.12E+00	6.56E+04	1.40E+00	7.32E+04	6.64E-01	1.32E+05	1.04E+00	6.40E+05
2.15E-01	8.12E+05	2.81E-01	7.38E+05	1.15E+00	5.98E+04	1.43E+00	6.69E+04	6.77E-01	1.20E+05	1.06E+00	5.81E+05
2.19E-01	7.38E+05	2.86E-01	6.71E+05	1.17E+00	5.45E+04	1.46E+00	6.11E+04	6.89E-01	1.09E+05	1.08E+00	5.28E+05
2.23E-01	6.71E+05	2.91E-01	6.11E+05	1.19E+00	4.97E+04	1.48E+00	5.58E+04	7.01E-01	9.89E+04	1.10E+00	4.80E+05
2.27E-01	6.10E+05	2.96E-01	5.55E+05	1.21E+00	4.53E+04	1.51E+00	5.10E+04	7.14E-01	8.99E+04	1.11E+00	4.36E+05
2.31E-01	5.55E+05	3.01E-01	5.05E+05	1.23E+00	4.13E+04	1.53E+00	4.66E+04	7.26E-01	8.16E+04	1.13E+00	3.96E+05
2.35E-01	5.05E+05	3.06E-01	4.59E+05	1.25E+00	3.77E+04	1.56E+00	4.26E+04	7.38E-01	7.41E+04	1.15E+00	3.59E+05
2.39E-01	4.59E+05	3.11E-01	4.17E+05	1.27E+00	3.43E+04	1.59E+00	3.89E+04	7.50E-01	6.73E+04	1.17E+00	3.26E+05
2.43E-01	4.17E+05	3.17E-01	3.80E+05	1.29E+00	3.13E+04	1.61E+00	3.56E+04	7.63E-01	6.12E+04	1.19E+00	2.96E+05
2.47E-01	3.79E+05	3.22E-01	3.45E+05	1.31E+00	2.86E+04	1.64E+00	3.25E+04	7.75E-01	5.56E+04	1.21E+00	2.69E+05
2.51E-01	3.45E+05	3.27E-01	3.14E+05	1.33E+00	2.61E+04	1.66E+00	2.97E+04	7.87E-01	5.05E+04	1.23E+00	2.44E+05
2.55E-01	3.13E+05	3.32E-01	2.85E+05	1.35E+00	2.38E+04	1.69E+00	2.71E+04	8.00E-01	4.59E+04	1.25E+00	2.22E+05
2.59E-01	2.85E+05	3.37E-01	2.59E+05	1.37E+00	2.17E+04	1.72E+00	2.48E+04	8.12E-01	4.17E+04	1.27E+00	2.02E+05

2.62E-01	2.59E+05	3.42E-01	2.36E+05	1.40E+00	1.98E+04	1.74E+00	2.27E+04	8.24E-01	3.79E+04	1.29E+00	1.83E+05
2.66E-01	2.36E+05	3.47E-01	2.14E+05	1.42E+00	1.81E+04	1.77E+00	2.07E+04	8.37E-01	3.44E+04	1.31E+00	1.66E+05
2.70E-01	2.14E+05	3.52E-01	1.95E+05	1.44E+00	1.65E+04	1.79E+00	1.90E+04	8.49E-01	3.13E+04	1.33E+00	1.51E+05
2.74E-01	1.95E+05	3.57E-01	1.77E+05	1.46E+00	1.51E+04	1.82E+00	1.73E+04	8.61E-01	2.85E+04	1.35E+00	1.37E+05
2.78E-01	1.77E+05	3.62E-01	1.61E+05	1.48E+00	1.38E+04	1.85E+00	1.59E+04	8.73E-01	2.59E+04	1.36E+00	1.25E+05
2.82E-01	1.61E+05	3.68E-01	1.47E+05	1.50E+00	1.26E+04	1.87E+00	1.45E+04	8.86E-01	2.35E+04	1.38E+00	1.13E+05
2.86E-01	1.46E+05	3.73E-01	1.33E+05	1.52E+00	1.15E+04	1.90E+00	1.33E+04	8.98E-01	2.14E+04	1.40E+00	1.03E+05
2.90E-01	1.33E+05	3.78E-01	1.21E+05	1.54E+00	1.05E+04	1.92E+00	1.22E+04	9.10E-01	1.95E+04	1.42E+00	9.34E+04
2.94E-01	1.21E+05	3.83E-01	1.10E+05	1.56E+00	9.59E+03	1.95E+00	1.11E+04	9.23E-01	1.77E+04	1.44E+00	8.49E+04
2.98E-01	1.10E+05	3.88E-01	1.00E+05	1.58E+00	8.77E+03	1.98E+00	1.02E+04	9.35E-01	1.61E+04	1.46E+00	7.72E+04
3.02E-01	1.00E+05	3.93E-01	9.13E+04	1.60E+00	8.02E+03	2.00E+00	9.32E+03	9.47E-01	1.47E+04	1.48E+00	7.02E+04
3.06E-01	9.12E+04	3.98E-01	8.31E+04	1.62E+00	7.33E+03	2.03E+00	8.54E+03	9.60E-01	1.34E+04	1.50E+00	6.38E+04
3.09E-01	8.30E+04	4.03E-01	7.56E+04	1.65E+00	6.71E+03	2.05E+00	7.82E+03	9.72E-01	1.22E+04	1.52E+00	5.80E+04
3.13E-01	7.55E+04	4.08E-01	6.88E+04	1.67E+00	6.14E+03	2.08E+00	7.17E+03	9.84E-01	1.11E+04	1.54E+00	5.28E+04
3.17E-01	6.87E+04	4.14E-01	6.27E+04	1.69E+00	5.62E+03	2.11E+00	6.57E+03	9.96E-01	1.01E+04	1.56E+00	4.80E+04
3.21E-01	6.26E+04	4.19E-01	5.70E+04	1.71E+00	5.14E+03	2.13E+00	6.02E+03	1.01E+00	9.19E+03	1.58E+00	4.37E+04
3.25E-01	5.70E+04	4.24E-01	5.19E+04	1.73E+00	4.71E+03	2.16E+00	5.52E+03	1.02E+00	8.37E+03	1.60E+00	3.97E+04
3.29E-01	5.19E+04	4.29E-01	4.73E+04	1.75E+00	4.31E+03	2.18E+00	5.06E+03	1.03E+00	7.63E+03	1.61E+00	3.61E+04
3.33E-01	4.72E+04	4.34E-01	4.31E+04	1.77E+00	3.95E+03	2.21E+00	4.64E+03	1.05E+00	6.95E+03	1.63E+00	3.29E+04
3.37E-01	4.30E+04	4.39E-01	3.92E+04	1.79E+00	3.62E+03	2.23E+00	4.26E+03	1.06E+00	6.33E+03	1.65E+00	2.99E+04
3.41E-01	3.92E+04	4.44E-01	3.57E+04	1.81E+00	3.32E+03	2.26E+00	3.91E+03	1.07E+00	5.77E+03	1.67E+00	2.73E+04
3.45E-01	3.57E+04	4.49E-01	3.25E+04	1.83E+00	3.04E+03	2.29E+00	3.58E+03	1.08E+00	5.26E+03	1.69E+00	2.48E+04
3.49E-01	3.25E+04	4.54E-01	2.96E+04	1.85E+00	2.79E+03	2.31E+00	3.29E+03	1.10E+00	4.80E+03	1.71E+00	2.26E+04
3.53E-01	2.96E+04	4.59E-01	2.70E+04	1.87E+00	2.55E+03	2.34E+00	3.02E+03	1.11E+00	4.37E+03	1.73E+00	2.06E+04
3.56E-01	2.70E+04	4.65E-01	2.46E+04	1.90E+00	2.34E+03	2.36E+00	2.77E+03	1.12E+00	3.99E+03	1.75E+00	1.87E+04
3.60E-01	2.46E+04	4.70E-01	2.24E+04	1.92E+00	2.15E+03	2.39E+00	2.54E+03	1.13E+00	3.64E+03	1.77E+00	1.71E+04
3.64E-01	2.24E+04	4.75E-01	2.04E+04	1.94E+00	1.97E+03	2.42E+00	2.34E+03	1.14E+00	3.31E+03	1.79E+00	1.56E+04
3.68E-01	2.04E+04	4.80E-01	1.86E+04	1.96E+00	1.81E+03	2.44E+00	2.14E+03	1.16E+00	3.02E+03	1.81E+00	1.42E+04
3.72E-01	1.86E+04	4.85E-01	1.70E+04	1.98E+00	1.66E+03	2.47E+00	1.97E+03	1.17E+00	2.76E+03	1.83E+00	1.29E+04
3.76E-01	1.69E+04	4.90E-01	1.55E+04	2.00E+00	1.52E+03	2.49E+00	1.81E+03	1.18E+00	2.51E+03	1.84E+00	1.18E+04
3.80E-01	1.54E+04	4.95E-01	1.41E+04	2.02E+00	1.40E+03	2.52E+00	1.66E+03	1.19E+00	2.29E+03	1.86E+00	1.07E+04
3.84E-01	1.41E+04	5.00E-01	1.28E+04	2.04E+00	1.28E+03	2.55E+00	1.53E+03	1.21E+00	2.09E+03	1.88E+00	9.77E+03
3.88E-01	1.28E+04	5.05E-01	1.17E+04	2.06E+00	1.17E+03	2.57E+00	1.40E+03	1.22E+00	1.91E+03	1.90E+00	8.90E+03
3.92E-01	1.17E+04	5.11E-01	1.07E+04	2.08E+00	1.08E+03	2.60E+00	1.29E+03	1.23E+00	1.74E+03	1.92E+00	8.11E+03
3.96E-01	1.07E+04	5.16E-01	9.72E+03	2.10E+00	9.88E+02	2.62E+00	1.18E+03	1.24E+00	1.59E+03	1.94E+00	7.39E+03
4.00E-01	9.70E+03	5.21E-01	8.86E+03	2.12E+00	9.07E+02	2.65E+00	1.09E+03	1.26E+00	1.45E+03	1.96E+00	6.74E+03

4.03E-01	8.84E+03	5.26E-01	8.07E+03	2.14E+00	8.32E+02	2.68E+00	9.97E+02	1.27E+00	1.32E+03	1.98E+00	6.14E+03
4.07E-01	8.06E+03	5.31E-01	7.36E+03	2.17E+00	7.64E+02	2.70E+00	9.15E+02	1.28E+00	1.21E+03	2.00E+00	5.60E+03
4.11E-01	7.35E+03	5.36E-01	6.70E+03	2.19E+00	7.01E+02	2.73E+00	8.41E+02	1.29E+00	1.10E+03	2.02E+00	5.10E+03
4.15E-01	6.70E+03	5.41E-01	6.11E+03	2.21E+00	6.43E+02	2.75E+00	7.72E+02	1.30E+00	1.00E+03	2.04E+00	4.65E+03
4.19E-01	6.10E+03	5.46E-01	5.57E+03	2.23E+00	5.90E+02	2.78E+00	7.09E+02	1.32E+00	9.14E+02	2.06E+00	4.24E+03
4.23E-01	5.56E+03	5.51E-01	5.07E+03	2.25E+00	5.41E+02	2.81E+00	6.51E+02	1.33E+00	8.34E+02	2.08E+00	3.87E+03
4.27E-01	5.07E+03	5.56E-01	4.62E+03	2.27E+00	4.96E+02	2.83E+00	5.98E+02	1.34E+00	7.60E+02	2.09E+00	3.52E+03
4.31E-01	4.62E+03	5.62E-01	4.21E+03	2.29E+00	4.55E+02	2.86E+00	5.49E+02	1.35E+00	6.93E+02	2.11E+00	3.21E+03
4.35E-01	4.21E+03	5.67E-01	3.84E+03	2.31E+00	4.17E+02	2.88E+00	5.04E+02	1.37E+00	6.32E+02	2.13E+00	2.93E+03
4.39E-01	3.83E+03	5.72E-01	3.50E+03	2.33E+00	3.83E+02	2.91E+00	4.62E+02	1.38E+00	5.76E+02	2.15E+00	2.67E+03
4.43E-01	3.49E+03	5.77E-01	3.19E+03	2.35E+00	3.51E+02	2.94E+00	4.24E+02	1.39E+00	5.25E+02	2.17E+00	2.43E+03
4.47E-01	3.18E+03	5.82E-01	2.90E+03	2.37E+00	3.22E+02	2.96E+00	3.89E+02	1.40E+00	4.79E+02	2.19E+00	2.22E+03
4.50E-01	2.90E+03	5.87E-01	2.64E+03	2.39E+00	2.95E+02	2.99E+00	3.57E+02	1.42E+00	4.36E+02	2.21E+00	2.02E+03
4.54E-01	2.64E+03	5.92E-01	2.41E+03	2.42E+00	2.70E+02	3.01E+00	3.28E+02	1.43E+00	3.98E+02	2.23E+00	1.84E+03
4.58E-01	2.41E+03	5.97E-01	2.19E+03	2.44E+00	2.48E+02	3.04E+00	3.01E+02	1.44E+00	3.62E+02	2.25E+00	1.68E+03
4.62E-01	2.19E+03	6.02E-01	2.00E+03	2.46E+00	2.27E+02	3.07E+00	2.76E+02	1.45E+00	3.30E+02	2.27E+00	1.53E+03
4.66E-01	1.99E+03	6.07E-01	1.82E+03	2.48E+00	2.08E+02	3.09E+00	2.53E+02	1.46E+00	3.01E+02	2.29E+00	1.39E+03
4.70E-01	1.82E+03	6.13E-01	1.65E+03	2.50E+00	1.90E+02	3.12E+00	2.32E+02	1.48E+00	2.74E+02	2.31E+00	1.27E+03
4.74E-01	1.65E+03	6.18E-01	1.51E+03	2.52E+00	1.74E+02	3.14E+00	2.12E+02	1.49E+00	2.49E+02	2.33E+00	1.15E+03
4.78E-01	1.51E+03	6.23E-01	1.37E+03	2.54E+00	1.59E+02	3.17E+00	1.95E+02	1.50E+00	2.27E+02	2.34E+00	1.05E+03
4.82E-01	1.37E+03	6.28E-01	1.25E+03	2.56E+00	1.46E+02	3.20E+00	1.78E+02	1.51E+00	2.07E+02	2.36E+00	9.56E+02
4.86E-01	1.25E+03	6.33E-01	1.13E+03	2.58E+00	1.33E+02	3.22E+00	1.63E+02	1.53E+00	1.88E+02	2.38E+00	8.70E+02
4.90E-01	1.13E+03	6.38E-01	1.03E+03	2.60E+00	1.22E+02	3.25E+00	1.50E+02	1.54E+00	1.71E+02	2.40E+00	7.92E+02
4.94E-01	1.03E+03	6.43E-01	9.38E+02	2.62E+00	1.12E+02	3.27E+00	1.37E+02	1.55E+00	1.56E+02	2.42E+00	7.21E+02
4.97E-01	9.38E+02	6.48E-01	8.52E+02	2.64E+00	1.02E+02	3.30E+00	1.25E+02	1.56E+00	1.42E+02	2.44E+00	6.56E+02
5.01E-01	8.53E+02	6.53E-01	7.75E+02	2.67E+00	9.33E+01	3.33E+00	1.15E+02	1.58E+00	1.29E+02	2.46E+00	5.97E+02
5.05E-01	7.76E+02	6.59E-01	7.04E+02	2.69E+00	8.52E+01	3.35E+00	1.05E+02	1.59E+00	1.17E+02	2.48E+00	5.43E+02
5.09E-01	7.05E+02	6.64E-01	6.40E+02	2.71E+00	7.79E+01	3.38E+00	9.59E+01	1.60E+00	1.07E+02	2.50E+00	4.94E+02
5.13E-01	6.41E+02	6.69E-01	5.82E+02	2.73E+00	7.11E+01	3.40E+00	8.77E+01	1.61E+00	9.68E+01	2.52E+00	4.49E+02
5.17E-01	5.82E+02	6.74E-01	5.28E+02	2.75E+00	6.49E+01	3.43E+00	8.01E+01	1.62E+00	8.80E+01	2.54E+00	4.08E+02
5.21E-01	5.29E+02	6.79E-01	4.80E+02	2.77E+00	5.93E+01	3.46E+00	7.32E+01	1.64E+00	8.00E+01	2.56E+00	3.71E+02
5.25E-01	4.81E+02	6.84E-01	4.36E+02	2.79E+00	5.41E+01	3.48E+00	6.69E+01	1.65E+00	7.26E+01	2.57E+00	3.37E+02
5.29E-01	4.37E+02	6.89E-01	3.96E+02	2.81E+00	4.94E+01	3.51E+00	6.11E+01	1.66E+00	6.60E+01	2.59E+00	3.06E+02
5.33E-01	3.96E+02	6.94E-01	3.59E+02	2.83E+00	4.50E+01	3.53E+00	5.58E+01	1.67E+00	5.99E+01	2.61E+00	2.78E+02
5.37E-01	3.60E+02	6.99E-01	3.26E+02	2.85E+00	4.11E+01	3.56E+00	5.09E+01	1.69E+00	5.44E+01	2.63E+00	2.53E+02
5.41E-01	3.27E+02	7.04E-01	2.96E+02	2.87E+00	3.74E+01	3.59E+00	4.65E+01	1.70E+00	4.94E+01	2.65E+00	2.30E+02

5.44E-01	2.96E+02	7.10E-01	2.68E+02	2.89E+00	3.41E+01	3.61E+00	4.24E+01	1.71E+00	4.48E+01	2.67E+00	2.08E+02
5.48E-01	2.69E+02	7.15E-01	2.43E+02	2.92E+00	3.11E+01	3.64E+00	3.87E+01	1.72E+00	4.07E+01	2.69E+00	1.89E+02
5.52E-01	2.44E+02	7.20E-01	2.20E+02	2.94E+00	2.83E+01	3.66E+00	3.53E+01	1.74E+00	3.69E+01	2.71E+00	1.72E+02
5.56E-01	2.21E+02	7.25E-01	2.00E+02	2.96E+00	2.58E+01	3.69E+00	3.22E+01	1.75E+00	3.35E+01	2.73E+00	1.56E+02
5.60E-01	2.00E+02	7.30E-01	1.81E+02	2.98E+00	2.34E+01	3.72E+00	2.93E+01	1.76E+00	3.03E+01	2.75E+00	1.41E+02
5.64E-01	1.82E+02	7.35E-01	1.64E+02	3.00E+00	2.13E+01	3.74E+00	2.67E+01	1.77E+00	2.75E+01	2.77E+00	1.28E+02
5.68E-01	1.65E+02	7.40E-01	1.49E+02	3.02E+00	1.94E+01	3.77E+00	2.43E+01	1.78E+00	2.49E+01	2.79E+00	1.16E+02
5.72E-01	1.49E+02	7.45E-01	1.35E+02	3.04E+00	1.76E+01	3.79E+00	2.21E+01	1.80E+00	2.26E+01	2.81E+00	1.05E+02
5.76E-01	1.35E+02	7.50E-01	1.22E+02	3.06E+00	1.60E+01	3.82E+00	2.01E+01	1.81E+00	2.05E+01	2.82E+00	9.54E+01
5.80E-01	1.22E+02	7.56E-01	1.10E+02	3.08E+00	1.46E+01	3.85E+00	1.83E+01	1.82E+00	1.85E+01	2.84E+00	8.64E+01
5.84E-01	1.11E+02	7.61E-01	9.96E+01	3.10E+00	1.32E+01	3.87E+00	1.67E+01	1.83E+00	1.68E+01	2.86E+00	7.83E+01
5.88E-01	1.00E+02	7.66E-01	9.01E+01	3.12E+00	1.20E+01	3.90E+00	1.52E+01	1.85E+00	1.52E+01	2.88E+00	7.09E+01
5.91E-01	9.05E+01	7.71E-01	8.15E+01	3.14E+00	1.09E+01	3.92E+00	1.38E+01	1.86E+00	1.37E+01	2.90E+00	6.42E+01
5.95E-01	8.19E+01	7.76E-01	7.37E+01	3.17E+00	9.91E+00	3.95E+00	1.25E+01	1.87E+00	1.24E+01	2.92E+00	5.81E+01
5.99E-01	7.40E+01	7.81E-01	6.66E+01	3.19E+00	8.99E+00	3.98E+00	1.14E+01	1.88E+00	1.12E+01	2.94E+00	5.26E+01
6.03E-01	6.69E+01	7.86E-01	6.01E+01	3.21E+00	8.15E+00	4.00E+00	1.03E+01	1.89E+00	1.02E+01	2.96E+00	4.75E+01
6.07E-01	6.05E+01	7.91E-01	5.43E+01	3.23E+00	7.39E+00	4.03E+00	9.37E+00	1.91E+00	9.18E+00	2.98E+00	4.30E+01
6.11E-01	5.46E+01	7.96E-01	4.90E+01	3.25E+00	6.70E+00	4.05E+00	8.50E+00	1.92E+00	8.29E+00	3.00E+00	3.89E+01
6.15E-01	4.93E+01	8.01E-01	4.42E+01	3.27E+00	6.07E+00	4.08E+00	7.71E+00	1.93E+00	7.49E+00	3.02E+00	3.51E+01
6.19E-01	4.45E+01	8.07E-01	3.99E+01	3.29E+00	5.50E+00	4.11E+00	7.00E+00	1.94E+00	6.77E+00	3.04E+00	3.17E+01
6.23E-01	4.02E+01	8.12E-01	3.60E+01	3.31E+00	4.98E+00	4.13E+00	6.34E+00	1.96E+00	6.11E+00	3.06E+00	2.87E+01
6.27E-01	3.62E+01	8.17E-01	3.25E+01	3.33E+00	4.51E+00	4.16E+00	5.75E+00	1.97E+00	5.52E+00	3.07E+00	2.59E+01
6.31E-01	3.27E+01	8.22E-01	2.93E+01	3.35E+00	4.08E+00	4.18E+00	5.21E+00	1.98E+00	4.98E+00	3.09E+00	2.34E+01
6.35E-01	2.95E+01	8.27E-01	2.64E+01	3.37E+00	3.69E+00	4.21E+00	4.72E+00	1.99E+00	4.49E+00	3.11E+00	2.11E+01
6.38E-01	2.65E+01	8.32E-01	2.38E+01	3.39E+00	3.34E+00	4.24E+00	4.27E+00	2.01E+00	4.05E+00	3.13E+00	1.90E+01
6.42E-01	2.39E+01	8.37E-01	2.14E+01	3.42E+00	3.02E+00	4.26E+00	3.87E+00	2.02E+00	3.65E+00	3.15E+00	1.72E+01
6.46E-01	2.15E+01	8.42E-01	1.93E+01	3.44E+00	2.73E+00	4.29E+00	3.50E+00	2.03E+00	3.29E+00	3.17E+00	1.55E+01
6.50E-01	1.94E+01	8.47E-01	1.73E+01	3.46E+00	2.46E+00	4.31E+00	3.16E+00	2.04E+00	2.96E+00	3.19E+00	1.39E+01
6.54E-01	1.75E+01	8.53E-01	1.56E+01	3.48E+00	2.22E+00	4.34E+00	2.86E+00	2.05E+00	2.67E+00	3.21E+00	1.26E+01
6.58E-01	1.57E+01	8.58E-01	1.40E+01	3.50E+00	2.01E+00	4.37E+00	2.59E+00	2.07E+00	2.40E+00	3.23E+00	1.13E+01
6.62E-01	1.41E+01	8.63E-01	1.26E+01	3.52E+00	1.81E+00	4.39E+00	2.34E+00	2.08E+00	2.16E+00	3.25E+00	1.02E+01
6.66E-01	1.27E+01	8.68E-01	1.13E+01	3.54E+00	1.63E+00	4.42E+00	2.11E+00	2.09E+00	1.95E+00	3.27E+00	9.16E+00
6.70E-01	1.14E+01	8.73E-01	1.02E+01	3.56E+00	1.47E+00	4.44E+00	1.91E+00	2.10E+00	1.75E+00	3.29E+00	8.24E+00
6.74E-01	1.03E+01	8.78E-01	9.13E+00	3.58E+00	1.33E+00	4.47E+00	1.72E+00	2.12E+00	1.57E+00	3.30E+00	7.41E+00
6.78E-01	9.20E+00	8.83E-01	8.20E+00	3.60E+00	1.20E+00	4.50E+00	1.55E+00	2.13E+00	1.42E+00	3.32E+00	6.67E+00
6.82E-01	8.26E+00	8.88E-01	7.36E+00	3.62E+00	1.08E+00	4.52E+00	1.40E+00	2.14E+00	1.27E+00	3.34E+00	5.99E+00

6.85E-01	7.41E+00	8.93E-01	6.60E+00	3.64E+00	9.71E-01	4.55E+00	1.26E+00	2.15E+00	1.14E+00	3.36E+00	5.38E+00
6.89E-01	6.65E+00	8.98E-01	5.92E+00	3.66E+00	8.74E-01	4.57E+00	1.14E+00	2.17E+00	1.03E+00	3.38E+00	4.83E+00
6.93E-01	5.96E+00	9.04E-01	5.30E+00	3.69E+00	7.86E-01	4.60E+00	1.03E+00	2.18E+00	9.20E-01	3.40E+00	4.34E+00
6.97E-01	5.34E+00	9.09E-01	4.75E+00	3.71E+00	7.07E-01	4.63E+00	9.23E-01	2.19E+00	8.26E-01	3.42E+00	3.90E+00
7.01E-01	4.79E+00	9.14E-01	4.26E+00	3.73E+00	6.36E-01	4.65E+00	8.31E-01	2.20E+00	7.41E-01	3.44E+00	3.49E+00
7.05E-01	4.29E+00	9.19E-01	3.81E+00	3.75E+00	5.72E-01	4.68E+00	7.48E-01	2.21E+00	6.64E-01	3.46E+00	3.13E+00
7.09E-01	3.84E+00	9.24E-01	3.41E+00	3.77E+00	5.14E-01	4.70E+00	6.73E-01	2.23E+00	5.95E-01	3.48E+00	2.81E+00
7.13E-01	3.44E+00	9.29E-01	3.05E+00	3.79E+00	4.62E-01	4.73E+00	6.05E-01	2.24E+00	5.33E-01	3.50E+00	2.52E+00
7.17E-01	3.07E+00	9.34E-01	2.73E+00	3.81E+00	4.15E-01	4.76E+00	5.44E-01	2.25E+00	4.78E-01	3.52E+00	2.26E+00
7.21E-01	2.75E+00	9.39E-01	2.44E+00	3.83E+00	3.72E-01	4.78E+00	4.89E-01	2.26E+00	4.28E-01	3.54E+00	2.02E+00
7.25E-01	2.46E+00	9.44E-01	2.18E+00	3.85E+00	3.34E-01	4.81E+00	4.40E-01	2.28E+00	3.83E-01	3.55E+00	1.81E+00
7.29E-01	2.20E+00	9.49E-01	1.95E+00	3.87E+00	3.00E-01	4.83E+00	3.95E-01	2.29E+00	3.43E-01	3.57E+00	1.62E+00
7.32E-01	1.96E+00	9.55E-01	1.74E+00	3.89E+00	2.69E-01	4.86E+00	3.55E-01	2.30E+00	3.06E-01	3.59E+00	1.45E+00
7.36E-01	1.75E+00	9.60E-01	1.55E+00	3.91E+00	2.41E-01	4.89E+00	3.18E-01	2.31E+00	2.74E-01	3.61E+00	1.29E+00
7.40E-01	1.56E+00	9.65E-01	1.38E+00	3.94E+00	2.16E-01	4.91E+00	2.86E-01	2.33E+00	2.45E-01	3.63E+00	1.16E+00
7.44E-01	1.39E+00	9.70E-01	1.23E+00	3.96E+00	1.93E-01	4.94E+00	2.56E-01	2.34E+00	2.19E-01	3.65E+00	1.03E+00
7.48E-01	1.24E+00	9.75E-01	1.10E+00	3.98E+00	1.73E-01	4.96E+00	2.30E-01	2.35E+00	1.95E-01	3.67E+00	9.21E-01
7.52E-01	1.11E+00	9.80E-01	9.79E-01	4.00E+00	1.55E-01	4.99E+00	2.06E-01	2.36E+00	1.74E-01	3.69E+00	8.22E-01
7.56E-01	9.86E-01	9.85E-01	8.72E-01	4.02E+00	1.39E-01	5.02E+00	1.84E-01	2.37E+00	1.56E-01	3.71E+00	7.34E-01
7.60E-01	8.78E-01	9.90E-01	7.76E-01	4.04E+00	1.24E-01	5.04E+00	1.65E-01	2.39E+00	1.39E-01	3.73E+00	6.54E-01
7.64E-01	7.81E-01	9.95E-01	6.90E-01	4.06E+00	1.11E-01	5.07E+00	1.48E-01	2.40E+00	1.24E-01	3.75E+00	5.83E-01
7.68E-01	6.95E-01	1.00E+00	6.14E-01	4.08E+00	9.90E-02	5.09E+00	1.32E-01	2.41E+00	1.10E-01	3.77E+00	5.20E-01
7.72E-01	6.18E-01	1.01E+00	5.46E-01	4.10E+00	8.85E-02	5.12E+00	1.18E-01	2.42E+00	9.81E-02	3.79E+00	4.63E-01
7.76E-01	5.49E-01	1.01E+00	4.85E-01	4.12E+00	7.90E-02	5.14E+00	1.06E-01	2.44E+00	8.74E-02	3.80E+00	4.12E-01
7.79E-01	4.88E-01	1.02E+00	4.31E-01	4.14E+00	7.06E-02	5.17E+00	9.46E-02	2.45E+00	7.78E-02	3.82E+00	3.67E-01
7.83E-01	4.34E-01	1.02E+00	3.83E-01	4.16E+00	6.30E-02	5.20E+00	8.45E-02	2.46E+00	6.92E-02	3.84E+00	3.26E-01
7.87E-01	3.85E-01	1.03E+00	3.39E-01	4.19E+00	5.62E-02	5.22E+00	7.55E-02	2.47E+00	6.15E-02	3.86E+00	2.90E-01
7.91E-01	3.41E-01	1.03E+00	3.01E-01	4.21E+00	5.01E-02	5.25E+00	6.74E-02	2.49E+00	5.47E-02	3.88E+00	2.58E-01
7.95E-01	3.03E-01	1.04E+00	2.67E-01	4.23E+00	4.47E-02	5.27E+00	6.02E-02	2.50E+00	4.86E-02	3.90E+00	2.29E-01
7.99E-01	2.69E-01	1.04E+00	2.37E-01	4.25E+00	3.98E-02	5.30E+00	5.37E-02	2.51E+00	4.32E-02	3.92E+00	2.03E-01
8.03E-01	2.38E-01	1.05E+00	2.10E-01	4.27E+00	3.55E-02	5.33E+00	4.79E-02	2.52E+00	3.83E-02	3.94E+00	1.81E-01
8.07E-01	2.11E-01	1.05E+00	1.86E-01	4.29E+00	3.16E-02	5.35E+00	4.27E-02	2.53E+00	3.40E-02	3.96E+00	1.60E-01
8.11E-01	1.87E-01	1.06E+00	1.64E-01	4.31E+00	2.81E-02	5.38E+00	3.80E-02	2.55E+00	3.02E-02	3.98E+00	1.42E-01
8.15E-01	1.65E-01	1.06E+00	1.45E-01	4.33E+00	2.50E-02	5.40E+00	3.39E-02	2.56E+00	2.68E-02	4.00E+00	1.26E-01
8.19E-01	1.46E-01	1.07E+00	1.29E-01	4.35E+00	2.22E-02	5.43E+00	3.02E-02	2.57E+00	2.37E-02	4.02E+00	1.12E-01
8.23E-01	1.29E-01	1.07E+00	1.14E-01	4.37E+00	1.98E-02	5.46E+00	2.69E-02	2.58E+00	2.10E-02	4.03E+00	9.88E-02

8.26E-01	1.14E-01	1.08E+00	1.00E-01	4.39E+00	1.76E-02	5.48E+00	2.39E-02	2.60E+00	1.86E-02	4.05E+00	8.75E-02
8.30E-01	1.01E-01	1.08E+00	8.86E-02	4.41E+00	1.56E-02	5.51E+00	2.13E-02	2.61E+00	1.65E-02	4.07E+00	7.74E-02
8.34E-01	8.90E-02	1.09E+00	7.82E-02	4.44E+00	1.39E-02	5.53E+00	1.89E-02	2.62E+00	1.46E-02	4.09E+00	6.84E-02
8.38E-01	7.85E-02	1.09E+00	6.90E-02	4.46E+00	1.23E-02	5.56E+00	1.68E-02	2.63E+00	1.29E-02	4.11E+00	6.05E-02
8.42E-01	6.93E-02	1.10E+00	6.09E-02	4.48E+00	1.09E-02	5.59E+00	1.49E-02	2.65E+00	1.14E-02	4.13E+00	5.35E-02
8.46E-01	6.11E-02	1.10E+00	5.37E-02	4.50E+00	9.69E-03	5.61E+00	1.33E-02	2.66E+00	1.01E-02	4.15E+00	4.72E-02
8.50E-01	5.38E-02	1.11E+00	4.73E-02	4.52E+00	8.59E-03	5.64E+00	1.18E-02	2.67E+00	8.90E-03	4.17E+00	4.17E-02
8.54E-01	4.74E-02	1.11E+00	4.16E-02	4.54E+00	7.61E-03	5.66E+00	1.04E-02	2.68E+00	7.86E-03	4.19E+00	3.68E-02
8.58E-01	4.17E-02	1.12E+00	3.67E-02	4.56E+00	6.74E-03	5.69E+00	9.26E-03	2.69E+00	6.94E-03	4.21E+00	3.25E-02
8.62E-01	3.67E-02	1.12E+00	3.23E-02	4.58E+00	5.97E-03	5.72E+00	8.21E-03	2.71E+00	6.12E-03	4.23E+00	2.86E-02
8.66E-01	3.23E-02	1.13E+00	2.84E-02	4.60E+00	5.29E-03	5.74E+00	7.27E-03	2.72E+00	5.40E-03	4.25E+00	2.52E-02
8.70E-01	2.84E-02	1.13E+00	2.49E-02	4.62E+00	4.68E-03	5.77E+00	6.44E-03	2.73E+00	4.76E-03	4.27E+00	2.22E-02
8.73E-01	2.50E-02	1.14E+00	2.19E-02	4.64E+00	4.14E-03	5.79E+00	5.71E-03	2.74E+00	4.19E-03	4.28E+00	1.96E-02
8.77E-01	2.19E-02	1.14E+00	1.92E-02	4.66E+00	3.66E-03	5.82E+00	5.05E-03	2.76E+00	3.69E-03	4.30E+00	1.72E-02
8.81E-01	1.93E-02	1.15E+00	1.69E-02	4.69E+00	3.23E-03	5.85E+00	4.47E-03	2.77E+00	3.25E-03	4.32E+00	1.51E-02
8.85E-01	1.69E-02	1.15E+00	1.48E-02	4.71E+00	2.86E-03	5.87E+00	3.95E-03	2.78E+00	2.86E-03	4.34E+00	1.33E-02
8.89E-01	1.48E-02	1.16E+00	1.30E-02	4.73E+00	2.52E-03	5.90E+00	3.50E-03	2.79E+00	2.51E-03	4.36E+00	1.17E-02
8.93E-01	1.30E-02	1.16E+00	1.14E-02	4.75E+00	2.23E-03	5.92E+00	3.09E-03	2.81E+00	2.21E-03	4.38E+00	1.03E-02
8.97E-01	1.14E-02	1.17E+00	9.98E-03	4.77E+00	1.97E-03	5.95E+00	2.73E-03	2.82E+00	1.94E-03	4.40E+00	9.03E-03
9.01E-01	9.98E-03	1.17E+00	8.74E-03	4.79E+00	1.73E-03	5.98E+00	2.41E-03	2.83E+00	1.70E-03	4.42E+00	7.92E-03
9.05E-01	8.74E-03	1.18E+00	7.65E-03	4.81E+00	1.53E-03	6.00E+00	2.13E-03	2.84E+00	1.50E-03	4.44E+00	6.95E-03
9.09E-01	7.65E-03	1.18E+00	6.69E-03	4.83E+00	1.35E-03	6.03E+00	1.88E-03	2.85E+00	1.31E-03	4.46E+00	6.09E-03
9.13E-01	6.69E-03	1.19E+00	5.85E-03	4.85E+00	1.19E-03	6.05E+00	1.65E-03	2.87E+00	1.15E-03	4.48E+00	5.34E-03
9.17E-01	5.85E-03	1.19E+00	5.12E-03	4.87E+00	1.05E-03	6.08E+00	1.46E-03	2.88E+00	1.01E-03	4.50E+00	4.68E-03
9.20E-01	5.11E-03	1.20E+00	4.47E-03	4.89E+00	9.20E-04	6.11E+00	1.29E-03	2.89E+00	8.84E-04	4.52E+00	4.10E-03
9.24E-01	4.46E-03	1.21E+00	3.90E-03	4.91E+00	8.09E-04	6.13E+00	1.13E-03	2.90E+00	7.75E-04	4.53E+00	3.59E-03
9.28E-01	3.90E-03	1.21E+00	3.41E-03	4.93E+00	7.12E-04	6.16E+00	9.96E-04	2.92E+00	6.78E-04	4.55E+00	3.14E-03
9.32E-01	3.40E-03	1.22E+00	2.97E-03	4.96E+00	6.26E-04	6.18E+00	8.77E-04	2.93E+00	5.93E-04	4.57E+00	2.74E-03
9.36E-01	2.97E-03	1.22E+00	2.59E-03	4.98E+00	5.50E-04	6.21E+00	7.71E-04	2.94E+00	5.19E-04	4.59E+00	2.40E-03
9.40E-01	2.59E-03	1.23E+00	2.26E-03	5.00E+00	4.83E-04	6.24E+00	6.78E-04	2.95E+00	4.54E-04	4.61E+00	2.09E-03
9.44E-01	2.25E-03	1.23E+00	1.97E-03	5.02E+00	4.24E-04	6.26E+00	5.96E-04	2.97E+00	3.96E-04	4.63E+00	1.83E-03
9.48E-01	1.96E-03	1.24E+00	1.72E-03	5.04E+00	3.72E-04	6.29E+00	5.23E-04	2.98E+00	3.46E-04	4.65E+00	1.60E-03
9.52E-01	1.71E-03	1.24E+00	1.49E-03	5.06E+00	3.27E-04	6.31E+00	4.60E-04	2.99E+00	3.02E-04	4.67E+00	1.39E-03
9.56E-01	1.49E-03	1.25E+00	1.30E-03	5.08E+00	2.86E-04	6.34E+00	4.03E-04	3.00E+00	2.64E-04	4.69E+00	1.21E-03
9.60E-01	1.29E-03	1.25E+00	1.13E-03	5.10E+00	2.51E-04	6.37E+00	3.54E-04	3.01E+00	2.30E-04	4.71E+00	1.06E-03
9.64E-01	1.12E-03	1.26E+00	9.81E-04	5.12E+00	2.20E-04	6.39E+00	3.10E-04	3.03E+00	2.01E-04	4.73E+00	9.22E-04

9.67E-01	9.77E-04	1.26E+00	8.53E-04	5.14E+00	1.93E-04	6.42E+00	2.72E-04	3.04E+00	1.75E-04	4.75E+00	8.03E-04
9.71E-01	8.49E-04	1.27E+00	7.40E-04	5.16E+00	1.69E-04	6.44E+00	2.38E-04	3.05E+00	1.52E-04	4.77E+00	6.98E-04
9.75E-01	7.37E-04	1.27E+00	6.43E-04	5.18E+00	1.47E-04	6.47E+00	2.09E-04	3.06E+00	1.32E-04	4.78E+00	6.08E-04
9.79E-01	6.39E-04	1.28E+00	5.58E-04	5.21E+00	1.29E-04	6.50E+00	1.83E-04	3.08E+00	1.15E-04	4.80E+00	5.28E-04
9.83E-01	5.54E-04	1.28E+00	4.83E-04	5.23E+00	1.13E-04	6.52E+00	1.60E-04	3.09E+00	1.00E-04	4.82E+00	4.59E-04
9.87E-01	4.81E-04	1.29E+00	4.19E-04	5.25E+00	9.85E-05	6.55E+00	1.40E-04	3.10E+00	8.71E-05	4.84E+00	3.99E-04
9.91E-01	4.17E-04	1.29E+00	3.63E-04	5.27E+00	8.60E-05	6.57E+00	1.22E-04	3.11E+00	7.57E-05	4.86E+00	3.46E-04
9.95E-01	3.61E-04	1.30E+00	3.14E-04	5.29E+00	7.51E-05	6.60E+00	1.07E-04	3.13E+00	6.57E-05	4.88E+00	3.01E-04
9.99E-01	3.12E-04	1.30E+00	2.72E-04	5.31E+00	6.55E-05	6.63E+00	9.33E-05	3.14E+00	5.71E-05	4.90E+00	2.61E-04
1.00E+00	2.70E-04	1.31E+00	2.35E-04	5.33E+00	5.72E-05	6.65E+00	8.15E-05	3.15E+00	4.95E-05	4.92E+00	2.26E-04
1.01E+00	2.34E-04	1.31E+00	2.04E-04	5.35E+00	4.98E-05	6.68E+00	7.11E-05	3.16E+00	4.29E-05	4.94E+00	1.96E-04
1.01E+00	2.02E-04	1.32E+00	1.76E-04	5.37E+00	4.34E-05	6.70E+00	6.20E-05	3.17E+00	3.72E-05	4.96E+00	1.70E-04
1.01E+00	1.75E-04	1.32E+00	1.52E-04	5.39E+00	3.78E-05	6.73E+00	5.41E-05	3.19E+00	3.23E-05	4.98E+00	1.47E-04
1.02E+00	1.51E-04	1.33E+00	1.31E-04	5.41E+00	3.29E-05	6.76E+00	4.71E-05	3.20E+00	2.79E-05	5.00E+00	1.27E-04
1.02E+00	1.30E-04	1.33E+00	1.13E-04	5.43E+00	2.87E-05	6.78E+00	4.11E-05	3.21E+00	2.42E-05	5.01E+00	1.10E-04
1.03E+00	1.12E-04	1.34E+00	9.77E-05	5.46E+00	2.49E-05	6.81E+00	3.57E-05	3.22E+00	2.09E-05	5.03E+00	9.51E-05
1.03E+00	9.68E-05	1.34E+00	8.42E-05	5.48E+00	2.17E-05	6.83E+00	3.11E-05	3.24E+00	1.81E-05	5.05E+00	8.22E-05
1.03E+00	8.35E-05	1.35E+00	7.26E-05	5.50E+00	1.88E-05	6.86E+00	2.71E-05	3.25E+00	1.56E-05	5.07E+00	7.10E-05
1.04E+00	7.19E-05	1.35E+00	6.25E-05	5.52E+00	1.64E-05	6.89E+00	2.35E-05	3.26E+00	1.35E-05	5.09E+00	6.13E-05
1.04E+00	6.19E-05	1.36E+00	5.38E-05	5.54E+00	1.42E-05	6.91E+00	2.05E-05	3.27E+00	1.17E-05	5.11E+00	5.29E-05
1.05E+00	5.33E-05	1.36E+00	4.63E-05	5.56E+00	1.23E-05	6.94E+00	1.78E-05	3.28E+00	1.01E-05	5.13E+00	4.56E-05
1.05E+00	4.59E-05	1.37E+00	3.99E-05	5.58E+00	1.07E-05	6.96E+00	1.54E-05	3.30E+00	8.68E-06	5.15E+00	3.93E-05
1.05E+00	3.94E-05	1.37E+00	3.43E-05	5.60E+00	9.28E-06	6.99E+00	1.34E-05	3.31E+00	7.49E-06	5.17E+00	3.39E-05
1.06E+00	3.39E-05	1.38E+00	2.95E-05	5.62E+00	8.04E-06	7.02E+00	1.16E-05	3.32E+00	6.45E-06	5.19E+00	2.92E-05
1.06E+00	2.91E-05	1.38E+00	2.53E-05	5.64E+00	6.96E-06	7.04E+00	1.01E-05	3.33E+00	5.56E-06	5.21E+00	2.51E-05
1.07E+00	2.50E-05	1.39E+00	2.17E-05	5.66E+00	6.03E-06	7.07E+00	8.73E-06	3.35E+00	4.78E-06	5.23E+00	2.16E-05
1.07E+00	2.15E-05	1.39E+00	1.87E-05	5.68E+00	5.22E-06	7.09E+00	7.56E-06	3.36E+00	4.12E-06	5.25E+00	1.86E-05
1.07E+00	1.84E-05	1.40E+00	1.60E-05	5.71E+00	4.51E-06	7.12E+00	6.55E-06	3.37E+00	3.54E-06	5.26E+00	1.60E-05
1.08E+00	1.58E-05	1.40E+00	1.37E-05	5.73E+00	3.90E-06	7.15E+00	5.67E-06	3.38E+00	3.05E-06	5.28E+00	1.37E-05
1.08E+00	1.35E-05	1.41E+00	1.18E-05	5.75E+00	3.37E-06	7.17E+00	4.90E-06	3.40E+00	2.62E-06	5.30E+00	1.18E-05
1.09E+00	1.16E-05	1.41E+00	1.01E-05	5.77E+00	2.91E-06	7.20E+00	4.24E-06	3.41E+00	2.25E-06	5.32E+00	1.01E-05
1.09E+00	9.93E-06	1.42E+00	8.62E-06	5.79E+00	2.52E-06	7.22E+00	3.67E-06	3.42E+00	1.93E-06	5.34E+00	8.69E-06
1.09E+00	8.50E-06	1.42E+00	7.38E-06	5.81E+00	2.17E-06	7.25E+00	3.17E-06	3.43E+00	1.66E-06	5.36E+00	7.46E-06
1.10E+00	7.27E-06	1.43E+00	6.31E-06	5.83E+00	1.87E-06	7.28E+00	2.73E-06	3.44E+00	1.42E-06	5.38E+00	6.39E-06
1.10E+00	6.22E-06	1.43E+00	5.40E-06	5.85E+00	1.62E-06	7.30E+00	2.36E-06	3.46E+00	1.22E-06	5.40E+00	5.48E-06
1.10E+00	5.32E-06	1.44E+00	4.61E-06	5.87E+00	1.39E-06	7.33E+00	2.04E-06	3.47E+00	1.04E-06	5.42E+00	4.69E-06
1.11E+00	4.54E-06	1.45E+00	3.94E-06	5.89E+00	1.20E-06	7.35E+00	1.76E-06	3.48E+00	8.93E-07	5.44E+00	4.02E-06
1.11E+00	3.88E-06	1.45E+00	3.36E-06	5.91E+00	1.03E-06	7.38E+00	1.51E-06	3.49E+00	7.64E-07	5.46E+00	3.44E-06
1.12E+00	3.31E-06	1.46E+00	2.87E-06	5.93E+00	8.88E-07	7.41E+00	1.30E-06	3.51E+00	6.54E-07	5.48E+00	2.94E-06
1.12E+00	2.82E-06	1.46E+00	2.45E-06	5.96E+00	7.64E-07	7.43E+00	1.12E-06	3.52E+00	5.59E-07	5.50E+00	2.51E-06
1.12E+00	2.41E-06	1.47E+00	2.09E-06	5.98E+00	6.57E-07	7.46E+00	9.66E-07	3.53E+00	4.78E-07	5.51E+00	2.15E-06
1.13E+00	2.05E-06	1.47E+00	1.78E-06	6.00E+00	5.65E-07	7.48E+00	8.31E-07	3.54E+00	4.08E-07	5.53E+00	1.83E-06
1.13E+00	1.75E-06	1.48E+00	1.52E-06	6.02E+00	4.85E-07	7.51E+00	7.15E-07	3.56E+00	3.49E-07	5.55E+00	1.56E-06
1.14E+00	1.49E-06	1.48E+00	1.29E-06	6.04E+00	4.16E-07	7.54E+00	6.14E-07	3.57E+00	2.97E-07	5.57E+00	1.33E-06

## Capitolo 6

# Mooring Strength and Fatigue Analysis

### 6.1 Introduzione

A valle dell'Heading Analysis e dell'individuazione dei moti eseguita nei paragrafi precedenti, si è proceduto con la verifica del sistema di Mooring.

Sulla base dell'esperienza e dall'osservazione di soluzioni simili adottate per progetti con le stesse caratteristiche significative (area geografica, altezza di fondale), si è scelta la configurazione e le dimensioni dei componenti del mooring system. Con l'ausilio del software OrcaFlex, è stata eseguita una verifica del modello in condizioni estreme, considerando 100 anni come periodo di ritorno, nel rispetto delle normative API-RP-2SK.

Nell'esecuzione della simulazione, sono state considerate due condizioni di carico, Pieno carico e Zavorra, in configurazione di sistema intatto e di sistema con una linea di ormeggio danneggiata (SLF, *Single Line Failure*).

Gli obiettivi della Mooring Strength Analysis possono essere così sintetizzati:

- individuare la massima tensione di esercizio per il sistema di mooring in corrispondenza dei *fairlead*, punto di connessione con l'unità, dove vengono trasferiti alla struttura tutti gli sforzi della singola linea;
- individuare la massima tensione di esercizio per il sistema di mooring in prossimità delle ancore;
- individuare la minima lunghezza di catena a contatto con il fondale per la linea maggiormente caricata;
- individuare la massima escursione della torretta;
- prescrivere la minima distanza tra *wire rope* e fondale;
- controllare che tutte le prescrizioni normative siano rispettate.

Il software utilizzato, OrcaFlex, esegue un'analisi non-lineare ad elementi finiti, nel dominio del tempo. Permette di modellare in maniera versatile ed accurata ogni parte del sistema e di individuare interferenze geometriche tra le linee o linee non adeguatamente tese in ogni fase dell'analisi. I dati di input necessari all'esecuzione delle verifiche includono le caratteristiche dei moti nave ed i parametri necessari per la definizione di moto ondoso, vento e corrente. I risultati e gli output includono una simulazione dinamica video animata, grafici e tabelle.

Il sistema di riferimento GXYZ considerato dal software è mostrato nella figura 6-1, l'origine degli assi della nave coincide con l'intersezione della perpendicolare addietro e la linea di base.

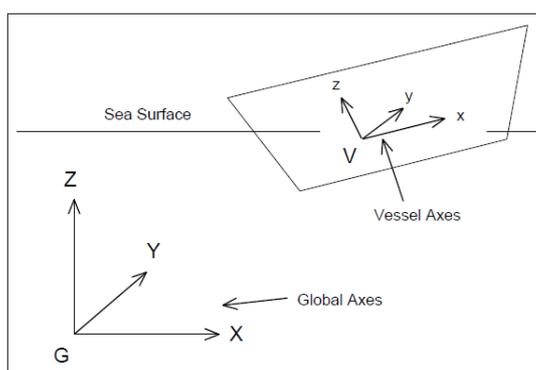


Figura 6-1 Sistema di riferimento Software

Per i carichi ambientali, le direzioni indicate si intendono come direzioni di provenienza. Gli angoli sono considerati in senso antiorario a partire da Ovest.

## 6.2 Modello del Sistema di Ormeggio

Tutte le linee sono costituite da una configurazione “Chain-Wire-Chain”, una combinazione di Catena tipo *Studless* e cavo. Tale configurazione aiuta a tenere bassi i carichi di pretensione e allo stesso tempo a generare migliori caratteristiche delle forze di richiamo.

Il raggio di installazione delle ancore per tutti i tre cluster è stato scelto pari a 1275m.

Il fondo del mare è stato considerato leggermente inclinato (1.5%) e, per questo motivo, le linee non hanno tutte la stessa lunghezza. I carichi di pretensione delle linee e gli angoli che esse formano intersecando il piano di galleggiamento, *hang-off angles*, sono stati impostati mediante un processo iterativo per ottimizzare la tensione del sistema e lo spostamento del centro della torretta, *offset*, dalla condizione di equilibrio.

La figura 6-2 e la figura 6-3 riportano gli screenshot del modello Orcaflex realizzato.

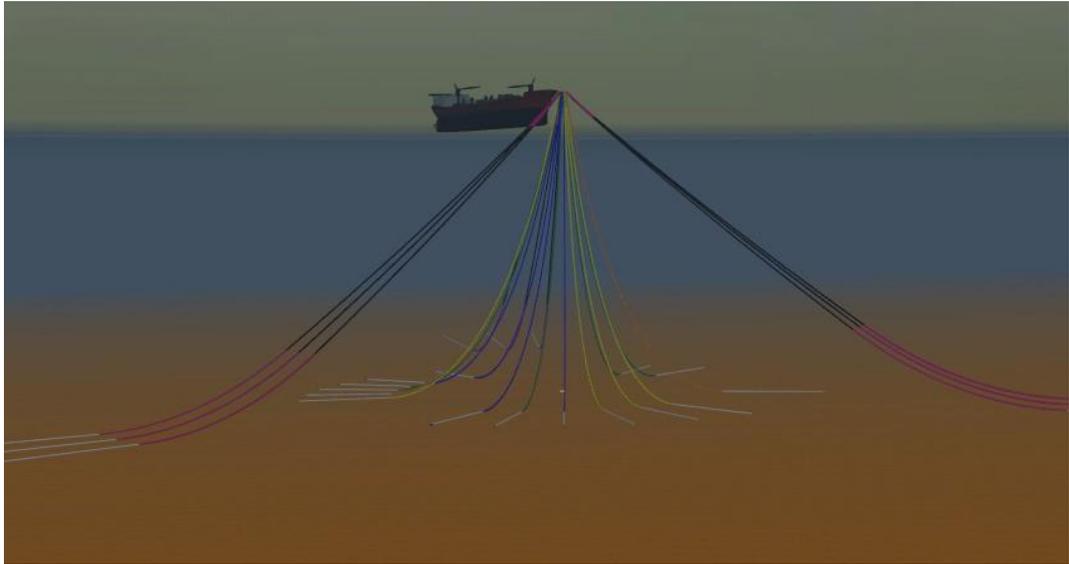


Figura 6-2 OrcaFlex Model -3D

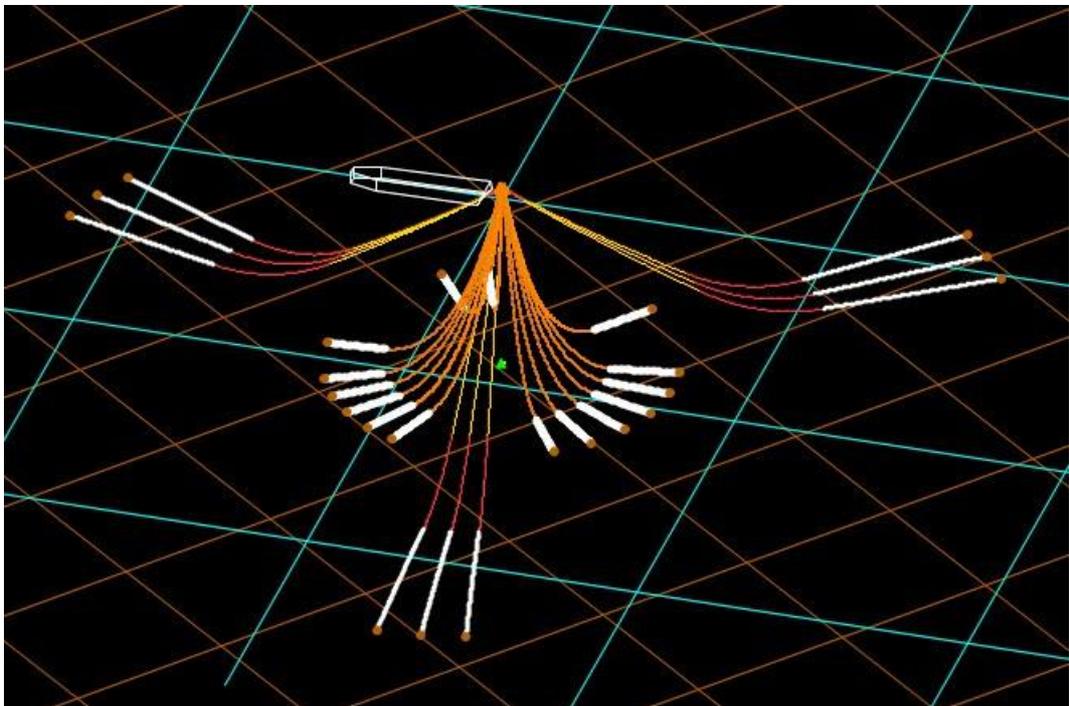


Figura 6-3 Orcaflex Model –wire frame

Le dimensioni del sistema di mooring verificato sono riportate nella tabella 6-1.

Tabella 6-1 Caratteristiche Mooring system

Mooring line	Anchor radius (m)	Anchor Depth (m)	Line length(m) <sup>(1)</sup>	Line make-up (from fairlead)			Azimuth <sup>(2)</sup> (Deg)
				Top Chain- 117mm R3 (m)	Wire Rope- 76mm SPR2Plus (m)	Bottom 117mm R3 (m)	
L1	1275 <sup>(3)</sup>	429.0	1415.0	58.0	530	827	92.5
L2		429.5	1415.1	58.1	530	827	97.5
L3		430.0	1415.3	58.3	530	827	102.5
L4		468.3	1432.1	75.1	530	827	212.5
L5		470.5	1432.7	75.7	530	827	217.5
L6		472.0	1433.3	76.3	530	827	222.5
L7		466.0	1424.1	67.1	530	827	332.5
L8		463.0	1423.3	66.3	530	827	337.5
L9		461.5	1422.6	65.6	530	827	342.5

La lunghezza delle catene in corrispondenza delle ancore dipende dalle proprietà del suolo e dalla profondità dell'ancora. I valori mostrati sono considerati preliminari e sono da definire/confermare a valle della verifica.

La pretensione e gli hang-off angles sono riportati nella tabella 6-2.

Tabella 6-2 Pretensioni e angoli di hangoff

Mooring line	Pretensions (t)		Fairlead Hang-off angles (deg)*	
	Ballast	Loaded	Ballast	Loaded
L1	154	134	43.7	44.8
L2	154	134	43.7	44.8
L3	154	134	43.8	44.8
L4	143	122	47.1	48.7
L5	143	122	47.2	48.8
L6	143	122	47.3	48.9
L7	164	141	44.6	45.9
L8	164	141	44.5	45.7
L9	164	141	44.4	45.6
<b>Average</b>	<b>154</b>	<b>132</b>	<b>45.1</b>	<b>46.5</b>

\*Gli angoli sono misurati rispetto al piano di galleggiamento.

Le caratteristiche meccaniche ed idrodinamiche delle linee di ormeggio sono riportate nella tabella 6-3.

Tabella 6-3 Caratteristiche delle linee

Parametro	Catena	Cavo Wire Rope
Diametro (mm)	117	76
Grado/Tipo	R3	Spiral Strand – Bridon (or equivalent) : Xtreme (sheathed)
Peso in aria (Kg/m)	276.5	30.4
Peso in acqua (Kg/m)	240.4	23.8
Axial stiffness (kN)	1.03E+06	5.57E+05
Coefficiente di Drag (Normal)	1.00	1.15
Coefficiente di Drag (Axial)	0.40	0.00
Coefficiente di Lift	0.00	0.00
Coefficiente di massa aggiunta (Normal)	1.00	1.00
Coefficiente di massa aggiunta (Axial)	0.08	0.00
Coefficiente d'attrito	0.50	0.00
Margine di corrosione	0.4mm/year	-
Minimo carico a rottura (kN) –considerando margine di corrosione = 20 anni	9347	6225

Si noti che alle due estremità è stata considerata una catena di dimensioni maggiori, al fine di limitare la fatica dovuta a flessioni fuori dal piano, innescare maggiori forze di richiamo e limitare le escursioni.

Per le analisi si è considerata una posizione del fondo della *Chain Table*, punto di connessione delle catene alla torretta, come riportato in tabella 6-4.

Tabella 6-4 Coordinate centro connessioni catene

Punto connessione alla Torretta		
X (m)	Y(m)	Z(m)
356.0	0.00	33.7

### 6.3 Analisi dei carichi agenti

Per l'esecuzione dell'analisi è stato necessario considerare carichi assiali trasferiti dai risers collegati alla torretta, forze di attrito innescate da vento e corrente e combinazioni concomitanti di carichi ambientali.

#### Carichi dovuti ai Riser

E' stato necessario prevedere la presenza di un certo numero di riser. Sulla base dell'esperienza, al fine di considerare, anche in maniera approssimata, i carichi

idrodinamici ed inerziali che influenzano il comportamento del mooring, si è attribuito un valore di carico assiale verticale dovuto ai riser pari a 12600 kN

### Forze d'attrito dovute a Vento e Corrente

Le forze d'attrito dovute a velocità traslazionali innescate da vento e corrente che investono l'unità *FPSO*, sono state calcolate come segue:

$$\begin{array}{l}
 \text{Surge Force} = \frac{1}{2} \cdot C_{\text{surge}} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_{\text{surge}} \\
 \text{Sway Force} = \frac{1}{2} \cdot C_{\text{sway}} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_{\text{sway}} \\
 \text{Yaw Moment} = \frac{1}{2} \cdot C_{\text{yaw}} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_{\text{yaw}}
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} \\ \\ \end{array}} \right\} \text{Morison}$$

dove,

- $A_{\text{surge}}$ ,  $A_{\text{sway}}$  e  $A_{\text{yaw}}$  corrispondono, per la corrente, all'area immersa esposta mentre per il vento corrispondono all'area esposta emersa;
- $C_{\text{surge}}$ ,  $C_{\text{sway}}$  and  $C_{\text{yaw}}$  sono i coefficienti relativi all'effettiva direzione di provenienza;
- $\rho$  è la densità dell'acqua di mare (per la corrente) o dell'aria (per il vento).
- $V$  è la velocità relativa del mare o del vento che investono la struttura.

Nelle figure 6-4, 6-5, 6-6 e 6-7, si riportano i coefficienti utilizzati per vento e corrente, al variare dell'angolo di incidenza con la struttura, nelle condizioni di zavorra e di pieno carico.

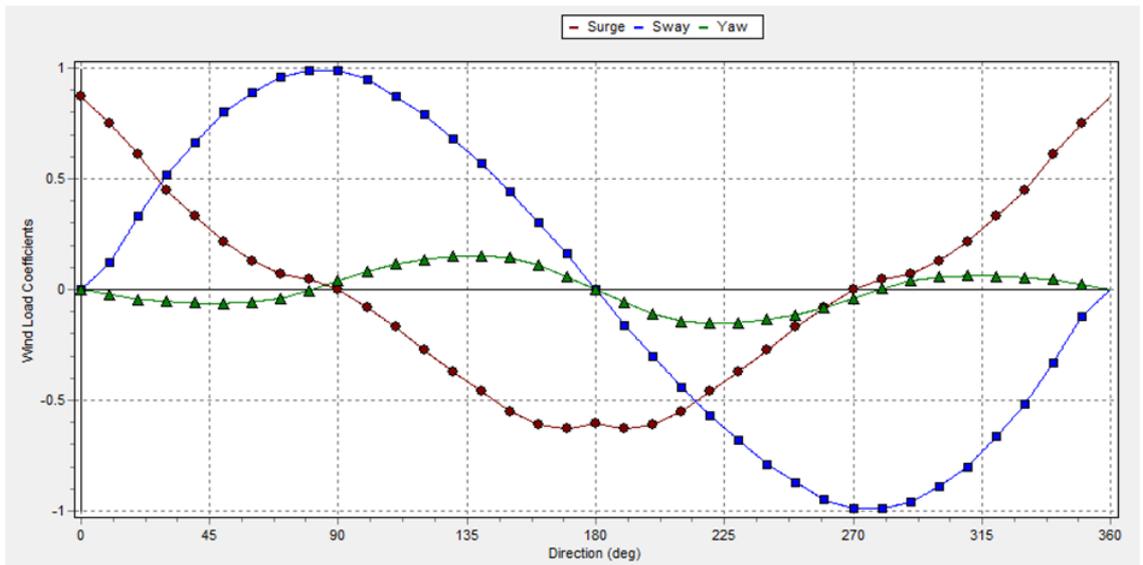


Figura 6-4 Coefficienti Vento (Ballast)

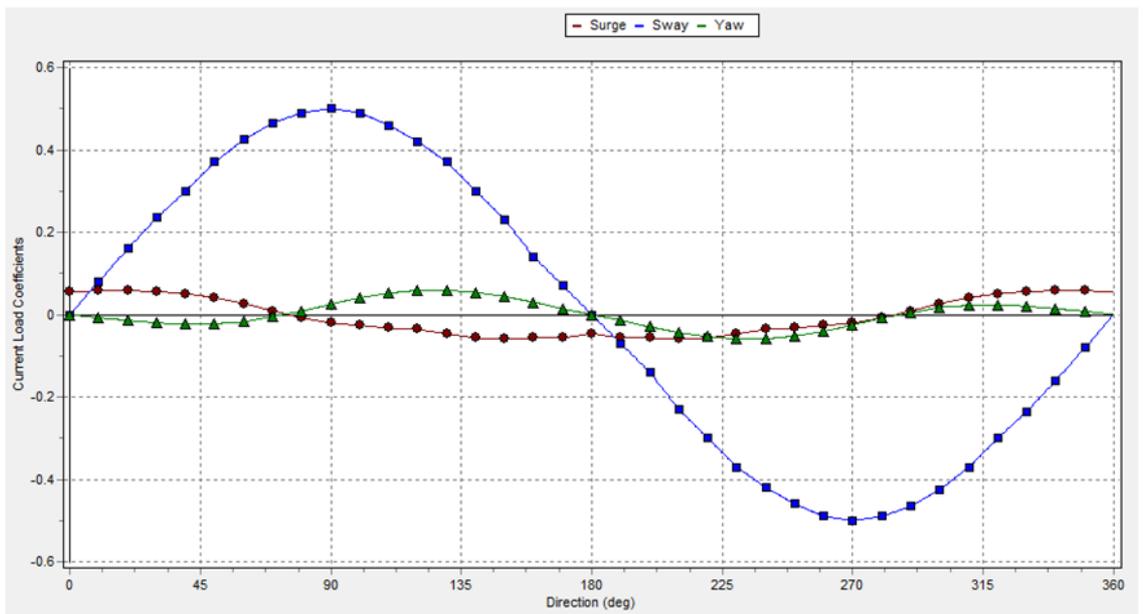


Figura 6-5 Coefficienti Corrente (Ballast)

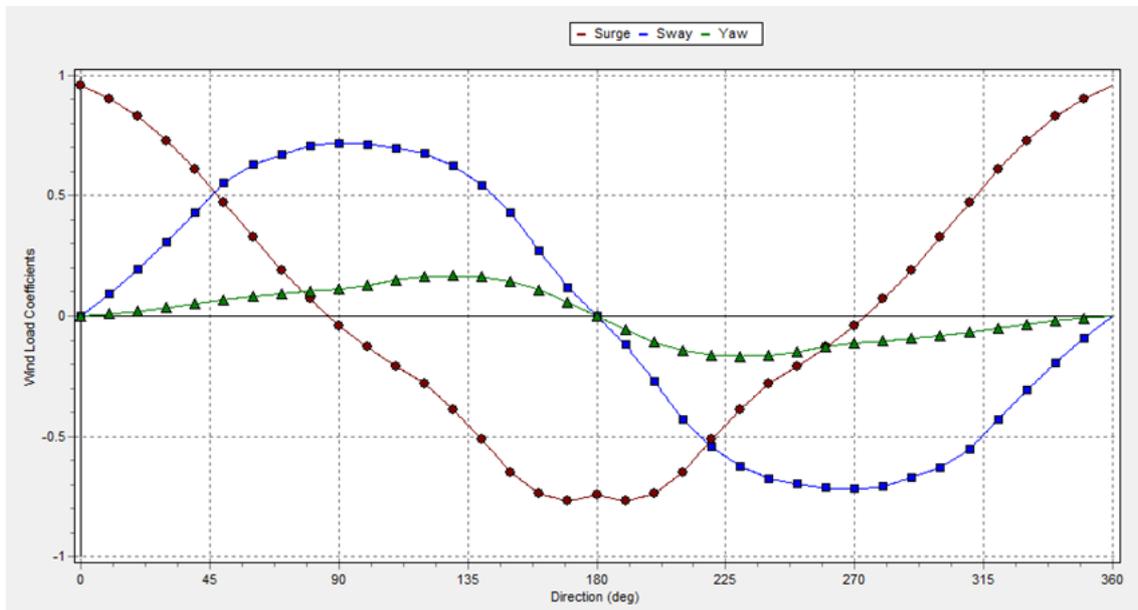


Figura 6-6 Coefficienti Vento (Full Load)

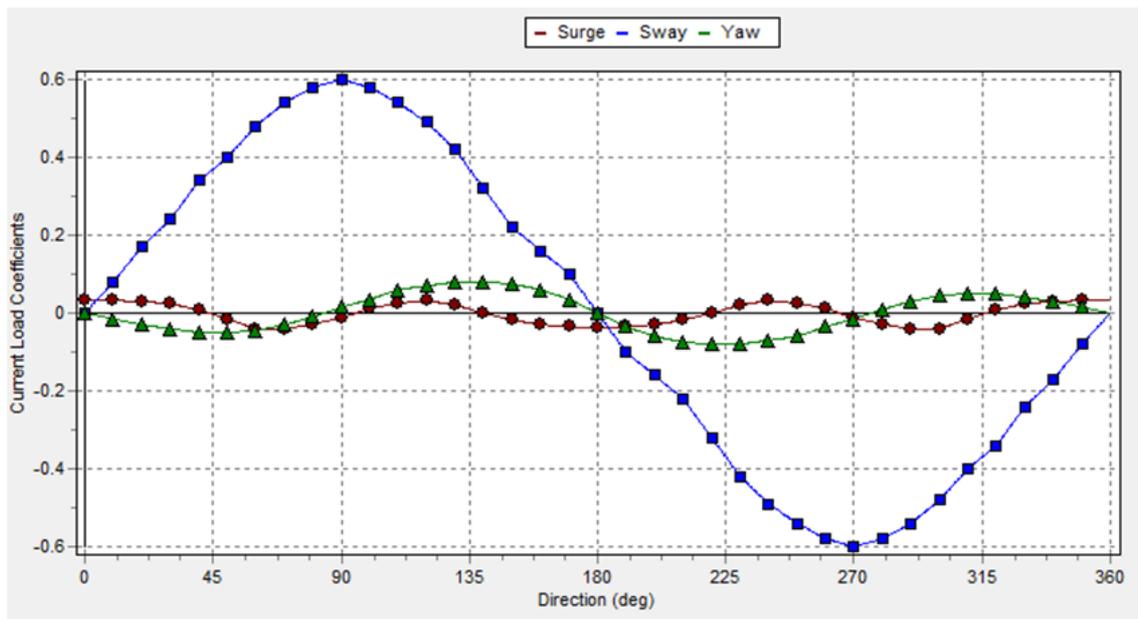


Figura 6-7 Coefficienti Corrente (Full Load)

Le aree esposte al vento e alla corrente considerate sono riportate nella tabella 6-5.

Tabella 6-5 Aree esposte al vento e alla corrente

Condizioni di carico		Vento	Corrente
Ballast	Surge Area (m <sup>2</sup> )	3090	522
	Sway Area (m <sup>2</sup> )	14135	2880
Fully Loaded	Surge Area (m <sup>2</sup> )	2353	1259
	Sway Area (m <sup>2</sup> )	10205	6944

I carichi da vento agenti su una *FPSO* consistono in due componenti, una parte statica che comporta una traslazione ed un'inclinazione ed una parte fluttuante dovuta alle raffiche che principalmente innescano moti a bassa frequenza di surge sway e yaw. La componente di vento dovuta alla raffica è simulata considerando le effettive serie storiche dello squall nell'area geografica di interesse mentre, per il vento non di squall è stato utilizzato uno spettro *NPD*.

## Carichi ambientali

Per l'area geografica scelta, di cui in tabella 6-6 si riporta la probabilità di occorrenza di stati di mare con dato  $H_S$  e  $T_p$  si sono individuate delle condizioni ambientali per le quali è stata effettuata la verifica del sistema.

Tabella 6-6 Scatter Diagram Stati di Mare

$H_S(m)$	$T_p(s)$												
	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	>0
0.00-0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.25-0.50	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
0.50-0.75	0.00	0.10	0.01	0.08	0.14	0.07	0.15	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.56
0.75-1.00	0.00	0.04	0.22	0.63	1.36	0.86	1.89	0.26	0.11	0.04	0.00	0.00	5.40
1.00-1.25	0.00	0.00	0.14	2.03	4.74	3.79	4.15	1.05	0.40	0.06	0.01	0.00	16.35
1.25-1.50	0.00	0.00	0.23	0.67	7.77	9.35	7.62	2.29	0.75	0.04	0.01	0.01	28.75
1.50-1.75	0.00	0.00	0.19	0.67	4.67	9.88	6.73	2.63	0.71	0.19	0.01	0.00	25.69
1.75-2.00	0.00	0.00	0.01	0.26	1.00	5.56	3.94	1.51	0.63	0.11	0.00	0.00	13.01
2.00-2.25	0.00	0.00	0.00	0.03	0.25	1.62	1.78	1.20	0.37	0.04	0.00	0.00	5.28
2.25-2.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	1.03	0.78	0.68	0.23	0.01	0.00	0.00	2.87
2.50-2.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32	0.40	0.32	0.10	0.00	0.00	0.00	1.12
2.75-3.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.18	0.19	0.07	0.00	0.00	0.00	0.45
3.00-3.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.16	0.06	0.04	0.01	0.00	0.00	0.29
3.25-3.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.06	0.01	0.01	0.00	0.00	0.10
3.50-3.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.06	0.00	0.00	0.00	0.10
3.75+	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
>0.00	0.01	0.14	0.81	4.36	20.05	32.49	27.82	10.26	3.49	0.52	0.04	0.01	100.01

Le combinazioni considerate sono descritte in seguito:

### *Condizione di Vento Prevalente*

Gli alisei rappresentano i venti predominanti nella zona tropicale dell'Oceano Atlantico Meridionale. La caratteristica principale di tali venti è la loro costanza e la loro assenza di condizioni di vento estremo. Nell'area considerata, infatti, la probabilità di superare il valore di 7.5 m/s di velocità è circa pari al 5%.

Nell'area geografica considerata sono praticamente assenti gli uragani tuttavia, l'area è caratterizzata da fenomeni di squall, raffiche di vento improvvise non provenienti da direzioni definite che raggiungono anche i 30 m/s per una durata di 5 secondi (periodo di ritorno 100 anni).

Le acque del Fiume Congo influenzano il profilo di corrente soprattutto a basse profondità. Tale fenomeno non condiziona singolarmente il progetto ma, se associato a vento può generare correnti non trascurabili. Per questo motivo si è considerato un profilo di corrente associato al fenomeno di squall.

Nell'area geografica considerata sono rilevate ed analizzate in Orcaflex, nove serie temporali di squall.

Le combinazioni di carichi ambientali verificate sono mostrate nella tabella 6-7.

Tabella 6-7 Squall Predominante – Carichi Ambientali sovrapposti

No.	Swell			Wind sea			Squall		River plume	
	Hs (m)	Tp (s)	Dir	Hs (m)	Tp (s)	Dir	Vel (m/s)	Direction	Vel (m/s)	Dir
1	2.3	13.3	67.5	1.4	3.8	45,90, 135	Squall series 1 to 9	135,157.5,180, 202.5,225	2.0	135,157.5,180, 202.5,225
2	0.5	8.5	67.5	0.8	3.0	45,90, 135	Squall series 1 to 9	135,157.5,180, 202.5,225	1.5	135,157.5,180, 202.5,225

Come mostrato nella tabella 6-7, sono state studiate due combinazioni di carico differenti,

- 100 anni RP squall + swell associato, mare da vento e corrente superficiale.
- 100 anni RP squall + 1 anno RP sea + 1 anno RP corrente + swell nominale

La prima combinazione è caratteristica dell'area geografica.

La seconda combinazione è stata considerata addizionalmente usando le condizioni minime (periodo di ritorno 1 anno) di wind sea e corrente. Essendo le conseguenti forze di attrito di bassa intensità, si potrebbero verificare tensioni o offset del sistema maggiori.

I fenomeni di Squall, sono stati considerati ad intervalli di 22.5°, comportando lo studio di 45 serie temporali (5 direzioni x 9 serie).

In totale, sono state verificate 540 combinazioni (1 direzione di provenienza di swell \* 3 direzioni di provenienza di vento \* 9 serie di squall \* 5 direzioni di squall \* 2 combinazioni con 100 anni RP e 1 anno RP di effetti associati \* 2 immerisoni).

Nell'analisi, è stato considerato lo spettro di Ochi-Hubble, con un fattore di amplificazione lambda pari a 6 per lo swell e ad 1 per il wind sea.

L'influenza dello Squall è stata considerata sia singolarmente che in combinazione con swell e corrente. Le correnti superficiali dovute all'estuario del fiume Congo sono state considerate utilizzando il profilo riportato nella figura 6-8

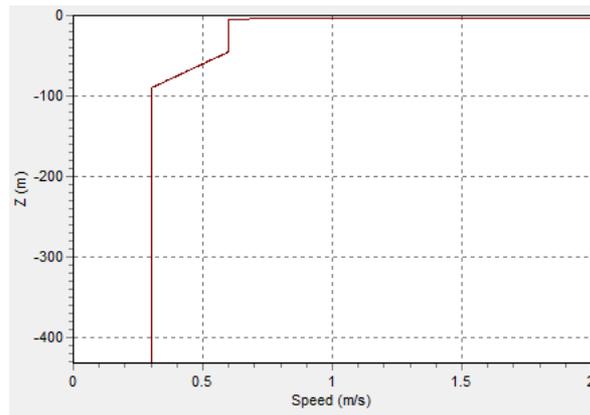


Figura 6-8 Profilo di corrente – River Plume Profile

E' molto importante identificare la più gravosa combinazione di squall, angolo di incidenza e posizionamento della struttura per sollecitazioni di bassa frequenza. Per questo motivo, combinazioni multiple di swell, wind sea e onde sono state considerate combinate con la serie temporale peggiore dello squall.

### *Condizione di Swell prevalente*

Gli alisei relativamente miti che caratterizzano l'area geografica considerata generano solo onde locali di modesta entità. L'area è caratterizzata da onde di swell di altezza significativa pari a 4.5 m con periodo di ritorno 100 anni ma con periodi caratteristici elevati. La verifica è stata effettuata considerando valori di periodo d'onda compresi tra 14.5 s e 19.6 s.

Le condizioni ambientali verificate sono specificate nella tabella 6-8.

Tabella 6-8 Swell Predominante :Carichi ambientali sovrapposti

Swell			Wind sea			Wind		Current	
Hs (m)	Tp (s)*	Dir	Hs (m)	Tp (s)	Dir	Vel (m/s)	Direction	Vel (m/s)	Dir
4.5	14.45 , 17 ,19.55	45,67.5,90	0.2	1.8	45,90,135	7.5	45,90,135	0.3	0,90,135,180, 225,270,315

In totale, sono state considerate 378 combinazioni di carico con Swell prevalente ( 3 Tp \* 3 direzioni di provenienza di swell \* 3 direzioni di provenienza di vento \* 7 direzioni di provenienza di corrente \* 2 immersioni)

Il profilo di corrente utilizzato è riportato in figura 6-9.

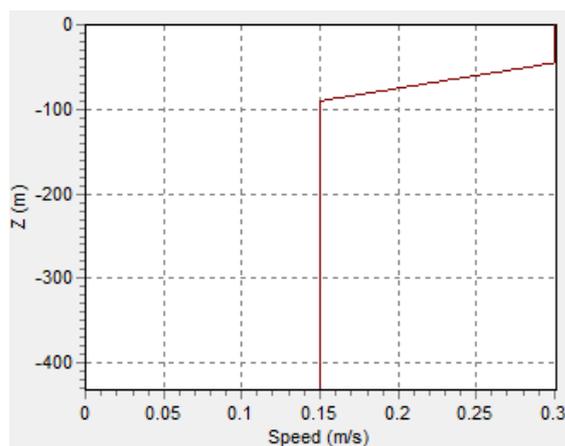


Figura 6-9 Profilo di corrente

### Condizione di Corrente Prevalente

Le correnti dell'area geografica sono caratterizzate da due flussi sovrapposti non uniformi. La massa di colonna d'acqua è guidata da circolazioni su larga scala del bacino dell'Oceano Atlantico Meridionale, correnti generalmente miti con velocità tipiche inferiori a 0.25m/s. Addizionalmente, i primi metri di profondità sono caratterizzati da velocità maggiori, innescate dalle correnti di acqua dolce proveniente dal fiume Congo.

Le correnti nell'area geografica sono descritte da 4 differenti tipi di profilo: *mixed-layer*, *deep mixed-layer*, *mid-depth* e *bottom*, di cui si riportano degli esempi in figura 6-10.

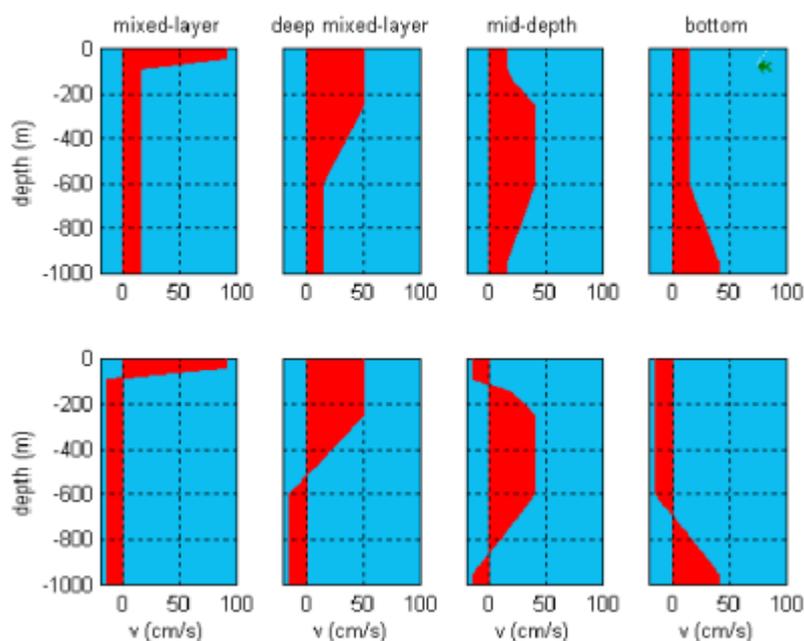


Figura 6-10 Profili estremi di corrente

Le velocità con periodo di ritorno 100 anni associate ai profili di corrente menzionati sono riportate nella tabella 6-9.

Tabella 6-9 Velocità massima corrente

V (m/s)			
Mixed Layer	Deep mixed Layer	Mid depth	Bottom
0.9	0.5	0.4	0.4

Le condizioni ambientali considerate sono riportate nella tabella 6-10:

Tabella 6-10 Corrente Predominante: Carichi ambientali sovrapposti

Swell			Wind sea			Wind		Current	
Hs (m)	Tp (s)	Direction	Hs (m)	Tp (s)	Direction	Vel (m/s)	Direction	Vel (m/s)	Direction
2.3	13.3	45,90	0.2	1.8	45,90,135	7.5	45,90,135	All profiles	292.5,315.0,337.5

Nell'analisi, è stato considerato lo spettro di Ochi-Hubble, con un fattore di amplificazione lambda pari a 6 per lo swell e ad 1 per il wind sea.

In totale sono state verificate 288 combinazioni di swell prevalente (2 direzioni di provenienza di swell \* 3 direzioni di provenienza del vento \* 3 direzioni di provenienza della corrente \* 8 profili di corrente \* 2 immersioni).

#### 6.4 Metodologia

La procedura seguita al fine di definire la massima tensione di progetto delle linee di mooring (in corrispondenza dell'ancora e dei fairlead) ed il massimo spostamento della torretta dalla posizione di equilibrio è riportata nel diagramma di figura 6-11.

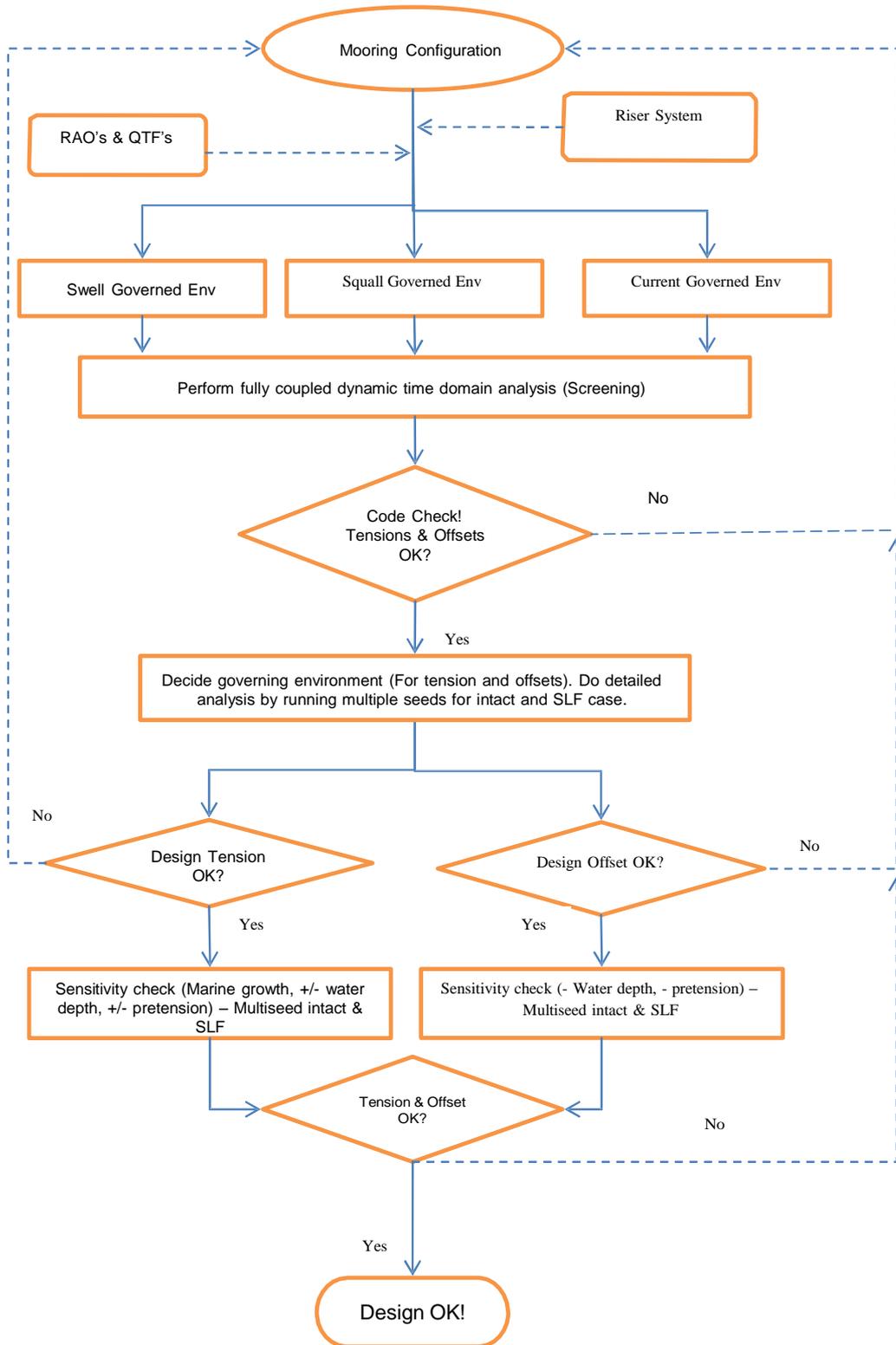


Figura 6-11 Metodologia di progetto

## 6.5 Risultati Mooring Analysis

Prima di effettuare l'analisi vera e propria, il software utilizzato consente di calcolare le caratteristiche di rigidità del modello del sistema di mooring.

Nell'immagine 6-12 si riporta la relazione tra forza di richiamo e l'*offset* del sistema di mooring dalla posizione di quiete.

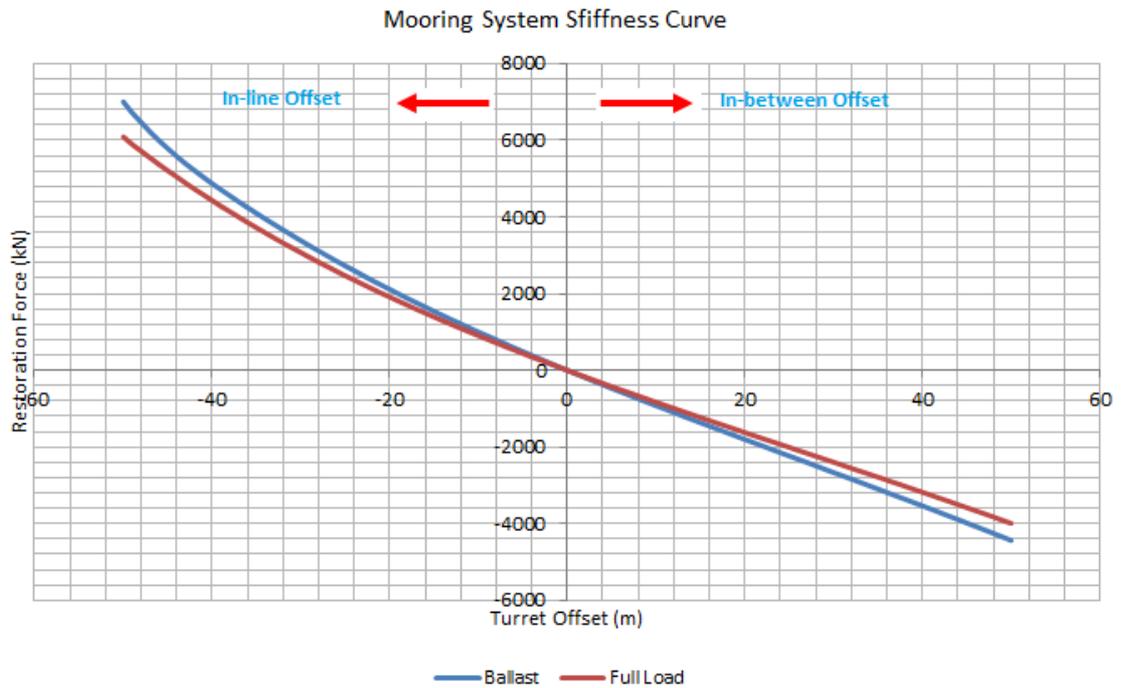


Figura 6-12 Cura di rigidità del Mooring

Il software OrcaFlex consente di individuare il periodo naturale di *surge* del sistema di ormeggio, di cui si riportano i risultati in figura 6-13.

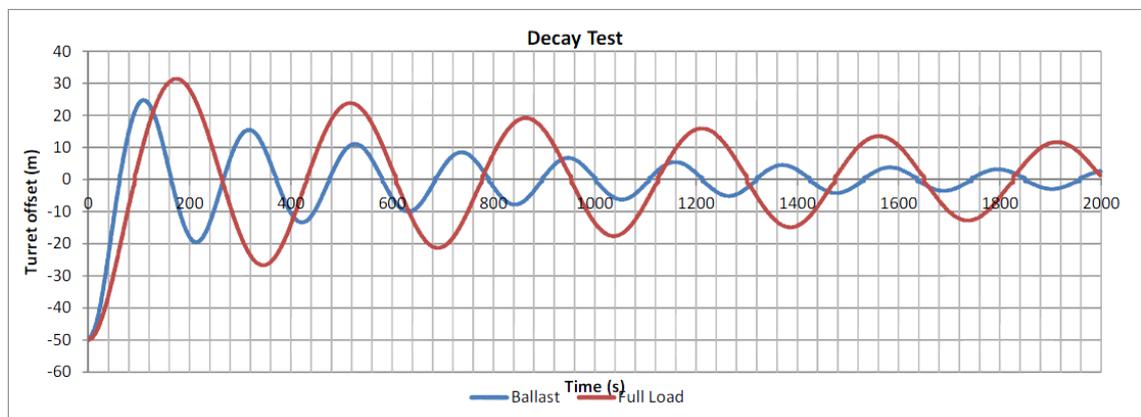


Figura 6-13 Risultati Surge Decay Test

I risultati dell'analisi vera e propria, sono riportati di seguito ed evidenziano che la tensione delle linee dipende strettamente dallo swell mentre l'*offset* in torretta dipende strettamente dallo squall.

### Condizione di Squall prevalente

Si riportano in tabella 6-11, i risultati della verifica per la condizione di squall prevalente.

Tabella 6-11 Risultati dello Screening – Squall prevalente

Squall series	Ballast		Full Load	
	Max Offset (m)	Tension(t)	Max Offset (m)	Tension(t)
S1	18.2	238.4	12.2	229.8
S2	24.5	241.5	16.8	227.2
S3	17.3	243.2	17.2	232.7
S4	16.2	240.6	16.4	232.1
S5	14.6	240.8	14.7	231.1
S6	15.6	239.5	16.0	230.5
S7	24.7	248.6	17.0	226.9
S8	19.8	226.5	15.9	222.7
S9	15.8	242.0	16.4	233.7
Max	24.7	248.6	17.2	233.7

La tensione massima è pari a 248.6 t, leggermente inferiore rispetto alla tensione realizzata in condizione di swell prevalente. Gli *offset* della torretta, rispetto alla condizione di equilibrio, sono invece maggiori.

Si può osservare che l'*offset* massimo, pari a 24.7 m, si verifica in condizione di zavorra con la serie di squall-7. L'*offset* in condizione di pieno carico è molto inferiore, grazie alla minore area esposta al vento. Il massimo *offset* per la condizione di pieno carico è 17.2 m che si verifica per la serie di squall-3. Come già accennato in precedenza, il massimo valore di *offset* è strettamente correlato al periodo naturale del sistema di ormeggio e alla durata del fenomeno di squall.

Tabella 6-12 Squall Serie dimensionanti di squall

Draft	Mooring system Natural period (s)	Governingsquallseries	
		Series	Peak velocity period (s)
Ballast	211	Series-7	190
Fully loaded	347	Series-3	350

La condizione di carico che maggiormente influenza l'offset (ballast draft, squall series-7) è caratterizzata da raffiche provenienti da Est. Il comportamento della struttura in questa particolare circostanza è riportato nei grafici di figura 6-14. I grafici mostrano la relazione tra l'offset della torretta, la velocità dello squall e gli angoli relativi tra squall e orientazione della FPSO.

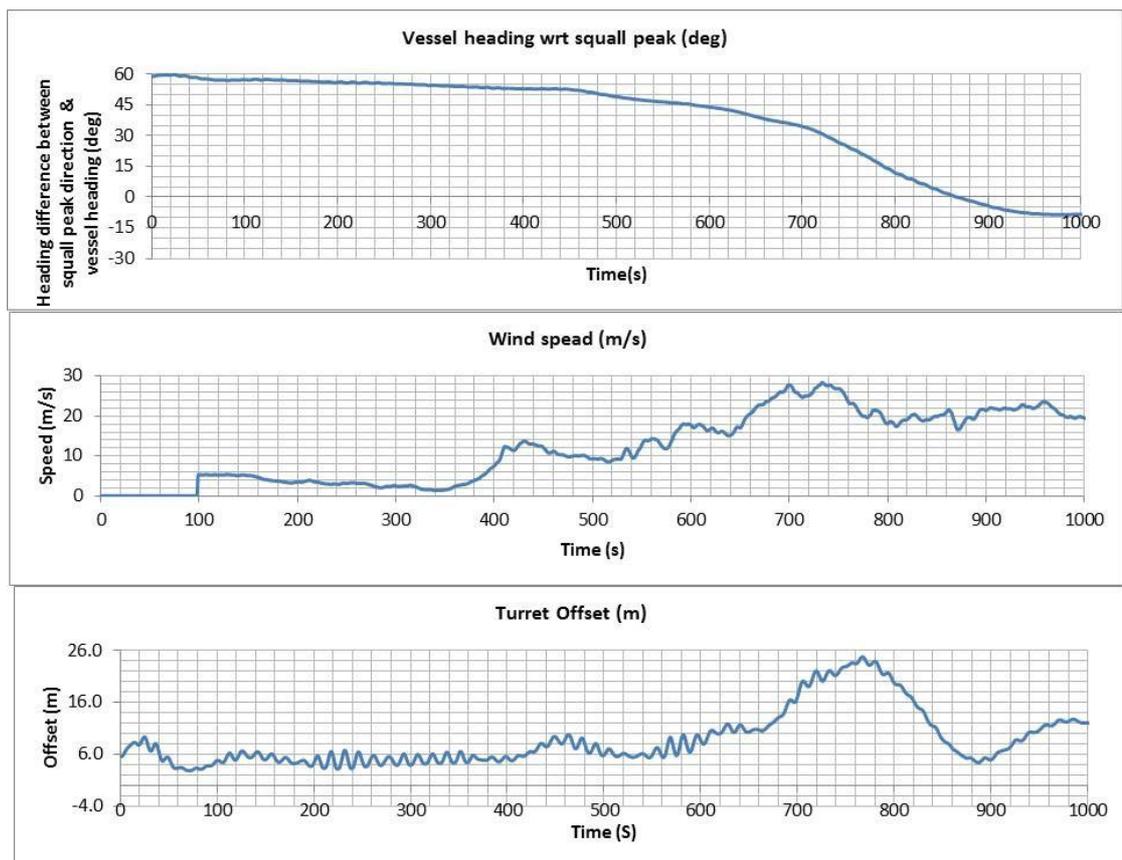


Figura 6-14 Condizione dimensionante di Squall – Comportamento Unità

I grafici mostrano che inizialmente, la direzione di provenienza dello squall ha un angolo rispetto alla nave pari a 60°. La struttura inizia a ruotare ma, per la natura

continuamente variabile dello squall, non riesce a raggiungere la posizione di equilibrio. La nave è così sottoposta alla velocità di squall di 28.4 m/s, con un angolo relativo di 35°. Le forze generate ed applicate nel centro dell'area esposta al vento, ingenerano elevati momenti in torretta che realizzano un conseguente *offset* di 24.7m.

Questa condizione di carico è stata ulteriormente verificata con 20 combinazioni di mare da vento, sia in condizione intatta che danneggiata *SLF*. Analogamente si è proceduto considerando una riduzione della pretensione e dell'altezza di fondale.

Si riporta di seguito il massimo *offset* realizzato dalle condizioni descritte.

Tabella 6-13 Offset teorico di progetto

Case	DesignOffset(m)		
	Intact	SLF	
		SLF-Most loaded	SLF-2nd most loaded
Base	24.7	36.5	35.0
Sensitivity (lower WD & Pretension)	25.3	37.1	35.5
Overall	25.3	37.1	

Si riportano i valori massimi di offset, sia con sistema intatto che con una linea danneggiata.

Tabella 6-14 Offset teorico di progetto -squall

Case	Design offset	
	Value (m)	% WD
Intact	25.3	5.58%
SLF	37.1	8.18%

I risultati soddisfano i limiti di offset, considerati dalla pratica comune, di 8% 10%, rispettivamente in condizione intatta e *SLF*.

E' importante notare che le tensioni delle linee nelle condizioni di squall predominante sono sensibilmente inferiori alla condizione di swell predominante.

## Condizione di Swell predominante

Si riportano di seguito i risultati relativi alla condizione di swell predominante.

Tabella 6-15 Swell Caso dimensionante- risultati screening

Ballast		Full Load	
Max Offset (m)	Tension (t)	Max Offset (m)	Tension (t)
10.3	361	12.7	307

Si può notare che la massima tensione delle linee è realizzata in condizione di zavorra.

L'offset risulta essere molto inferiore rispetto alla condizione di squall predominante.

La condizione di carico più gravosa che realizza una tensione di 361 t coincide con lo swell proveniente da Sud, vento e mare proveniente da Sud-Est e correnti provenienti da nord. In queste circostanze la struttura è disposta verso Sud-Ovest, esposta ad onde di swell con un angolo relativo di 45° che generano una significativa risposta in frequenza dei moti e conseguenti maggiori tensioni delle linee di ormeggio.

Questa condizione di carico è stata verificata ulteriormente incrementando il valore di pretensione, sia in condizione intatta che danneggiata, *SLF*.

Si riportano di seguito le massime tensioni realizzate dalle condizioni di sollecitazione descritte.

Tabella 6-16 Tensioni teoriche di progetto

Case	Design Tension (t)		
	Intact	SLF	
		SLF-Most loaded	SLF-2nd most loaded
Base	358	439	435
Sensitivity - Higher Pretension	362	449	-
Overall Maximum	362	449	

Su può osservare che la massima tensione realizzata in condizione di sistema intatto è pari a 362 t, mentre in SLF è pari a 449 t. Le condizioni più gravose si realizzano invece incrementando leggermente la pretensione delle linee (ogni linea è stata ridotta di 1 m).

Nella tabella 6-17 si riportano i valori di tensione massima realizzati.

Tabella 6-17 Tensioni teoriche di progetto

Case	Design Tension (t)		
	In corrispondenza dei fairlead		At anchor
	Value	Safety Factor	
Intact	362	1.75	290
SLF	449	1.41	384

### Condizione di Corrente Predominante

I risultati relativi alla condizione di corrente predominante sono riportati nella tabella 6-18.

Tabella 6-18 Condizione di corrente predominante – Risultati Screening

Ballast		Full Load	
Max Offset (m)	Tension (t)	Max Offset (m)	Tension (t)
4.9	240	6.4	232

La tensione massima è 240 t mentre il massimo offset è 6.4 m. Si può notare che sia tensione che offset sono inferiori rispetto alle condizioni di swell e squall prevalente.

I risultati mostrano che:

- la tensione massima delle linee è individuata dalla condizione di swell prevalente. La massima tensione, in corrispondenza dei fairlead è 362 t con sistema intatto e 449 t con sistema in *SLF*.
- I minimi angoli *di hang-off* in condizione intatta e Single Line Failure sono rispettivamente 35.4° and 32.4°. Gli angoli sono misurati a partire dal piano orizzontale.
- L'escursione massima della torretta è realizzata nelle condizioni di squall prevalente. I valori massimi realizzati in Intact e *SLF* sono 25.3 m and 37.1 m rispettivamente, corrispondenti a 5.58% e 8.18% dell'altezza di fondale.
- Le tensioni maggiori si realizzano sempre in condizione di zavorra.

- Cluster-3 (Linee 7, 8 e 9) risulta essere il cluster più caricato.
- La lunghezza della catena poggiata al fondo, risulta essere sempre maggiore di 100 m.
- Il tratto di linee di ormeggio costituito da cavo non entra mai in contatto con il fondale. La minima distanza verticale, pari ad 8 m, si verifica in corrispondenza del massimo offset in condizione di SLF.
- In tabella 6-19, si riporta una sintesi dei dati numerici raccolti

Tabella 6-19 Sintesi dei risultati

Case	Design Tension (t)			Design offset		Criteria Check
	At fairlead		At anchor	Value(m)	%WD	
	Value	SafetyFactor				
Intact	362	1.75	290	25.3	5.58%	Pass
1 Line damaged	449	1.41	384	37.1	8.18%	Pass

## **6.6 Analisi a Fatica del sistema di ormeggio**

Di seguito sono illustrate la metodologia, gli input considerati e i risultati dell'analisi eseguita al fine di individuare la vita a fatica delle linee di ormeggio.

L'analisi a fatica è stata eseguita in condizione di carico intermedia, intesa come la condizione di carico media della struttura durante l'intera missione.

Gli obiettivi principali dell'analisi a fatica sono:

- Calcolare il danno a fatica accumulato in ogni linea di ormeggio durante i 20 anni di operatività del sistema.
- Identificare combinazioni ambientali responsabili del massimo danno a fatica.
- Calcolare la vita a fatica minima di ogni linea e comparare il fattore di sicurezza realizzato rispetto al fattore di sicurezza minimo richiesto.
- Verificare che tutte le normative internazionali siano soddisfatte.

Le principali caratteristiche delle condizioni di carico considerate sono riportate di seguito in tabella 6-20. L'analisi è stata eseguita nella condizione di carico intermedia, intesa come la condizione di carico media dell'unità durante i 20 anni di esercizio.

Tabella 6-20 Dati principali

Loading conditions		
Condizione di carico		Intermediate
Immerisione (m)		16.1
Dislocamento (t)		244865
LCG (m) da AP		178.8
TCG (m)		0
VCG (m) da K		19.4
2nd mass moment of vessel	lxx (Te.m <sup>2</sup> )	5.52E+07
	lyy (Te.m <sup>2</sup> )	1.34E+09
	lzz (Te.m <sup>2</sup> )	1.36E+09
Radius of gyration of vessel	Rxx (m)	15.0
	Ryy (m)	74.1
	Rzz (m)	74.4

Oltre a quanto prescritto dal registro FPI di ABS, per l'analisi a fatica si sono tenute in considerazione le normative API-RP-2SK.

Nel rispetto di quanto imposto dall'ABS Guide for Building & Classing Floating Production Installation 2013 Chapter 5 Section 1, per la vita a fatica si è considerato un fattore di sicurezza molto conservativo, pari a 10, in quanto i componenti del sistema di ormeggio risultano evidentemente essere non ispezionabili. Si richiede quindi che la vita a fatica della linea più sollecitata a fatica sia almeno 200 anni.

La pretensione e gli angoli di *hang-off* considerati nel modello sono riportati in tabella 6-21.

Tabella 6-21 Pretensione & Angoli di hang-off (immersione intermedia)

Mooring line	Pretensions (t)	Fairlead Hang-off angles (deg)*
L1	143	44.6
L2	143	44.5
L3	143	44.6
L4	132	48.3
L5	132	48.4
L6	132	48.5
L7	151	45.4
L8	152	45.3
L9	151	45.2
<b>Average</b>	<b>142</b>	<b>46.1</b>

\*Gli angoli sono misurati dal piano orizzontale.

Il minimo carico a rottura considerato nel calcolo del danno a fatica, tenendo conto di fenomeni di corrosione, è stato quello corrispondente alla catena classe *ORQ 113, Oil Rig Quality*, classe specifica per il campo applicativo considerato, le cui caratteristiche meccaniche sono regolamentate dell' *American Petroleum Institute*.

### **Onde di swell e mare da vento**

Per le condizioni di carico considerate nell'analisi a fatica, è stata considerata la sovrapposizione di swell e mare da vento già vista in precedenza e riportata in tabella 6-22.

Tabella 6-22 Swell-Sea % di occorrenza

Case No.	Swell			Sea			Probability %
	Hs (m)	Tp (s)	Gamma	Hs (m)	Tp (s)	Gamma	
1	0.7	7.3	6	0.1	1.7	1	0.24%
2	0.7	7.3	6	0.4	3.1	1	0.04%
3	0.7	7.3	6	0.7	3.8	1	0.00%
4	0.7	11.4	10	0.1	1.7	1	0.19%
5	0.7	11.4	10	0.4	3.1	1	0.03%
6	0.7	11.4	10	0.7	3.8	1	0.00%
7	0.7	14.4	20	0.1	1.7	1	0.05%
8	0.7	14.4	20	0.4	3.1	1	0.01%
9	0.7	14.4	20	0.7	3.8	1	0.00%
10	0.9	6.0	6	0.1	1.7	1	0.46%
11	0.9	6.0	6	0.4	3.1	1	0.08%
12	0.9	6.0	6	0.7	3.8	1	0.00%
13	0.9	9.0	6	0.1	1.7	1	1.82%
14	0.9	9.0	6	0.4	3.1	1	0.32%
15	0.9	9.0	6	0.7	3.8	1	0.01%
16	0.9	12.6	10	0.1	1.7	1	1.82%
17	0.9	12.6	10	0.4	3.1	1	0.32%
18	0.9	12.6	10	0.7	3.8	1	0.01%
19	0.9	15.2	20	0.1	1.7	1	0.46%
20	0.9	15.2	20	0.4	3.1	1	0.08%
21	0.9	15.2	20	0.7	3.8	1	0.00%
22	1.1	7.0	6	0.1	1.7	1	1.38%
23	1.1	7.0	6	0.4	3.1	1	0.25%
24	1.1	7.0	6	0.7	3.8	1	0.01%
25	1.1	9.0	6	0.1	1.7	1	5.52%
26	1.1	9.0	6	0.4	3.1	1	0.98%
27	1.1	9.0	6	0.7	3.8	1	0.04%
28	1.1	12.3	6	0.1	1.7	1	5.52%
29	1.1	12.3	6	0.4	3.1	1	0.98%
30	1.1	12.3	6	0.7	3.8	1	0.03%
31	1.1	15.1	15	0.1	1.7	1	1.24%
32	1.1	15.1	15	0.4	3.1	1	0.22%
33	1.1	15.1	15	0.7	3.8	1	0.01%
34	1.1	18.2	40	0.1	1.7	1	0.14%
35	1.1	18.2	40	0.4	3.1	1	0.02%
36	1.1	18.2	40	0.7	3.8	1	0.00%
37	1.4	7.8	6	0.1	1.7	1	2.43%
38	1.4	7.8	6	0.4	3.1	1	0.43%
39	1.4	7.8	6	0.7	3.8	1	0.02%
40	1.4	19.0	6	0.1	1.7	1	9.70%
41	1.4	19.0	6	0.4	3.1	1	1.72%
42	1.4	19.0	6	0.7	3.8	1	0.07%
43	1.4	12.5	6	0.1	1.7	1	9.70%
44	1.4	12.5	6	0.4	3.1	1	1.72%
45	1.4	12.5	6	0.7	3.8	1	0.07%
46	1.4	15.2	15	0.1	1.7	1	2.18%
47	1.4	15.2	15	0.4	3.1	1	0.39%
48	1.4	15.2	15	0.7	3.8	1	0.02%
49	1.4	18.1	40	0.1	1.7	1	0.24%
50	1.4	18.1	40	0.4	3.1	1	0.04%
51	1.4	18.1	40	0.7	3.8	1	0.00%
52	1.6	8.1	6	0.1	1.7	1	2.17%
53	1.6	8.1	6	0.4	3.1	1	0.38%
54	1.6	8.1	6	0.7	3.8	1	0.02%
55	1.6	10.4	6	0.1	1.7	1	8.67%
56	1.6	10.4	6	0.4	3.1	1	1.54%
57	1.6	10.4	6	0.7	3.8	1	0.07%
58	1.6	12.7	6	0.1	1.7	1	8.67%
59	1.6	12.7	6	0.4	3.1	1	1.54%
60	1.6	12.7	6	0.7	3.8	1	0.07%
61	1.6	15.6	15	0.1	1.7	1	1.95%

Case No.	Swell			Sea			Probability %
	Hs (m)	Tp (s)	Gamma	Hs (m)	Tp (s)	Gamma	
62	1.6	15.6	15	0.4	3.1	1	0.35%
63	1.6	15.6	15	0.7	3.8	1	0.02%
64	1.6	18.8	40	0.1	1.7	1	0.22%
65	1.6	18.8	40	0.4	3.1	1	0.04%
66	1.6	18.8	40	0.7	3.8	1	0.00%
67	1.9	9.0	6	0.1	1.7	1	1.10%
68	1.9	9.0	6	0.4	3.1	1	0.19%
69	1.9	9.0	6	0.7	3.8	1	0.01%
70	1.9	11.1	6	0.1	1.7	1	4.39%
71	1.9	11.1	6	0.4	3.1	1	0.78%
72	1.9	11.1	6	0.7	3.8	1	0.03%
73	1.9	13.1	6	0.1	1.7	1	4.39%
74	1.9	13.1	6	0.4	3.1	1	0.78%
75	1.9	13.1	6	0.7	3.8	1	0.03%
76	1.9	16.2	15	0.1	1.7	1	0.99%
77	1.9	16.2	15	0.4	3.1	1	0.18%
78	1.9	16.2	15	0.7	3.8	1	0.01%
79	1.9	18.6	40	0.1	1.7	1	0.11%
80	1.9	18.6	40	0.4	3.1	1	0.02%
81	1.9	18.6	40	0.7	3.8	1	0.00%
82	2.1	9.6	6	0.1	1.7	1	0.45%
83	2.1	9.6	6	0.4	3.1	1	0.08%
84	2.1	9.6	6	0.7	3.8	1	0.00%
85	2.1	11.7	6	0.1	1.7	1	1.78%
86	2.1	11.7	6	0.4	3.1	1	0.32%
87	2.1	11.7	6	0.7	3.8	1	0.01%
88	2.1	14.1	6	0.1	1.7	1	1.78%
89	2.1	14.1	6	0.4	3.1	1	0.32%
90	2.1	14.1	6	0.7	3.8	1	0.01%
91	2.1	16.4	6	0.1	1.7	1	0.40%
92	2.1	16.4	6	0.4	3.1	1	0.07%
93	2.1	16.4	6	0.7	3.8	1	0.00%
94	2.1	18.3	6	0.1	1.7	1	0.04%
95	2.1	18.3	6	0.4	3.1	1	0.01%
96	2.1	18.3	6	0.7	3.8	1	0.00%
97	2.4	9.9	6	0.1	1.7	1	0.24%
98	2.4	9.9	6	0.4	3.1	1	0.04%
99	2.4	9.9	6	0.7	3.8	1	0.00%
100	2.4	11.6	6	0.1	1.7	1	0.97%
101	2.4	11.6	6	0.4	3.1	1	0.17%
102	2.4	11.6	6	0.7	3.8	1	0.01%
103	2.4	14.2	6	0.1	1.7	1	0.97%
104	2.4	14.2	6	0.4	3.1	1	0.17%
105	2.4	14.2	6	0.7	3.8	1	0.01%
106	2.4	16.6	6	0.1	1.7	1	0.24%
107	2.4	16.6	6	0.4	3.1	1	0.04%
108	2.4	16.6	6	0.7	3.8	1	0.00%
109	2.6	11.5	6	0.1	1.7	1	0.24%
110	2.6	11.5	6	0.4	3.1	1	0.04%
111	2.6	11.5	6	0.7	3.8	1	0.00%
112	2.6	13.0	6	0.1	1.7	1	0.47%
113	2.6	13.0	6	0.4	3.1	1	0.08%
114	2.6	13.0	6	0.7	3.8	1	0.00%
115	2.6	15.8	6	0.1	1.7	1	0.24%
116	2.6	15.8	6	0.4	3.1	1	0.04%
117	2.6	15.8	6	0.7	3.8	1	0.00%
118	2.9	12.3	6	0.1	1.7	1	0.10%
119	2.9	12.3	6	0.4	3.1	1	0.02%
120	2.9	12.3	6	0.7	3.8	1	0.00%
121	2.9	14.2	6	0.1	1.7	1	0.19%
122	2.9	14.2	6	0.4	3.1	1	0.03%
123	2.9	14.2	6	0.7	3.8	1	0.00%
124	2.9	16.1	6	0.1	1.7	1	0.10%
125	2.9	16.1	6	0.4	3.1	1	0.02%
126	2.9	16.1	6	0.7	3.8	1	0.00%
127	3.1	12.8	6	0.1	1.7	1	0.14%
128	3.1	12.8	6	0.4	3.1	1	0.02%
129	3.1	12.8	6	0.7	3.8	1	0.00%
130	3.1	15.9	6	0.1	1.7	1	0.14%
131	3.1	15.9	6	0.4	3.1	1	0.02%
132	3.1	15.9	6	0.7	3.8	1	0.00%
133	3.4	14.1	6	0.1	1.7	1	0.02%
134	3.4	14.1	6	0.4	3.1	1	0.00%
135	3.4	14.1	6	0.7	3.8	1	0.00%
136	3.4	17.0	6	0.1	1.7	1	0.02%
137	3.4	17.0	6	0.4	3.1	1	0.00%
138	3.4	17.0	6	0.7	3.8	1	0.00%
139	3.7	14.0	6	0.1	1.7	1	0.05%
140	3.7	14.0	6	0.4	3.1	1	0.01%
141	3.7	14.0	6	0.7	3.8	1	0.00%
142	3.7	16.9	6	0.1	1.7	1	0.05%
143	3.7	16.9	6	0.4	3.1	1	0.01%
144	3.7	16.9	6	0.7	3.8	1	0.00%

A partire dalle 144 condizioni di carico di tabella 4-2 dell'Heading Analysis, è evidente che ogni caso di carico da swell è analizzato con tre diversi casi di mare da vento. I casi sono stati raggruppati in uno solo con probabilità di non essere superato pari al 95%,  $H_S = 0.2$  m and  $T_P = 1.8$ s.

Le condizioni ambientali sono state conseguentemente ridotte a  $144/3 = 48$  (tabella 6-23)

Tabella 6-23 Swell-Sea % di occorrenza (Reduced)

Case	Swell			Sea			Probability %
	Hs (m)	Tp (s)	Gamma	Hs (m)	Tp (s)	Gamma	
1	0.7	7.3	6	0.2	1.8	1	0.287
2	0.7	11.4	10	0.2	1.8	1	0.230
3	0.7	14.4	20	0.2	1.8	1	0.058
4	0.9	6.0	6	0.2	1.8	1	0.541
5	0.9	9.0	6	0.2	1.8	1	2.162
6	0.9	12.6	10	0.2	1.8	1	2.162
7	0.9	15.2	20	0.2	1.8	1	0.541
8	1.1	7.0	6	0.2	1.8	1	1.640
9	1.1	9.0	6	0.2	1.8	1	6.541
10	1.1	12.3	6	0.2	1.8	1	6.524
11	1.1	15.1	15	0.2	1.8	1	1.472
12	1.1	18.2	40	0.2	1.8	1	0.164
13	1.4	7.8	6	0.2	1.8	1	2.875
14	1.4	19.0	6	0.2	1.8	1	11.500
15	1.4	12.5	6	0.2	1.8	1	11.500
16	1.4	15.2	15	0.2	1.8	1	2.588
17	1.4	18.1	40	0.2	1.8	1	0.288
18	1.6	8.1	6	0.2	1.8	1	2.568
19	1.6	10.4	6	0.2	1.8	1	10.274
20	1.6	12.7	6	0.2	1.8	1	10.274
21	1.6	15.6	15	0.2	1.8	1	2.312
22	1.6	18.8	40	0.2	1.8	1	0.257
23	1.9	9.0	6	0.2	1.8	1	1.301
24	1.9	11.1	6	0.2	1.8	1	5.205
25	1.9	13.1	6	0.2	1.8	1	5.205
26	1.9	16.2	15	0.2	1.8	1	1.171
27	1.9	18.6	40	0.2	1.8	1	0.130
28	2.1	9.6	6	0.2	1.8	1	0.528
29	2.1	11.7	6	0.2	1.8	1	2.113
30	2.1	14.1	6	0.2	1.8	1	2.113
31	2.1	16.4	6	0.2	1.8	1	0.475
32	2.1	18.3	6	0.2	1.8	1	0.053
33	2.4	9.9	6	0.2	1.8	1	0.287
34	2.4	11.6	6	0.2	1.8	1	1.150
35	2.4	14.2	6	0.2	1.8	1	1.150
36	2.4	16.6	6	0.2	1.8	1	0.287
37	2.6	11.5	6	0.2	1.8	1	0.281
38	2.6	13.0	6	0.2	1.8	1	0.561
39	2.6	15.8	6	0.2	1.8	1	0.281
40	2.9	12.3	6	0.2	1.8	1	0.113
41	2.9	14.2	6	0.2	1.8	1	0.226
42	2.9	16.1	6	0.2	1.8	1	0.113
43	3.1	12.8	6	0.2	1.8	1	0.164
44	3.1	15.9	6	0.2	1.8	1	0.164
45	3.4	14.1	6	0.2	1.8	1	0.027
46	3.4	17.0	6	0.2	1.8	1	0.027
47	3.7	14.0	6	0.2	1.8	1	0.055
48	3.7	16.9	6	0.2	1.8	1	0.055
Total							100.0

## Vento

In tabella 6-24 si riporta la percentuale di occorrenza di velocità del vento proveniente da una specifica direzione e gli stati di mare ad esso associati.

Tabella 6-24 Velocità Vento-Mare da vento % di occorrenza

Wind (m/s)		Wind Sea		Directions towards (clockwise from north)								All
From	To	Hs (m)	Tp (s)	22.5	67.5	112.5	157.5	202.5	247.5	292.5	337.5	
0	2	0	0	2.44%	2.20%	1.37%	0.71%	0.44%	0.18%	0.38%	1.80%	9.51%
2	4	0.1	1.9	9.64%	4.00%	1.36%	0.69%	1.06%	0.70%	3.37%	13.03%	33.83%
4	6	0.2	2.4	14.68%	3.63%	0.53%	0.26%	0.47%	0.50%	3.50%	16.69%	40.27%
6	8	0.3	2.7	6.46%	0.71%	0.10%	0.12%	0.09%	0.09%	0.74%	6.56%	14.87%
8	10	0.4	3	0.40%	0.04%	0.04%	0.08%	0.06%	0.02%	0.12%	0.69%	1.45%
10	12	0.5	3.3	0.01%	0.00%	0.01%	0.02%	0.02%	0.02%	0.01%	0.00%	0.07%
12	14	0.6	3.5	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%
14+		0.7	3.8	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%
Total				33.60%	10.60%	3.40%	1.90%	2.10%	1.50%	8.10%	38.80%	100.00%

Al fine di ottimizzare il numero di condizioni di carico considerate durante l'analisi, i load cases relativi al vento, riportati in tabella 6-24 sono stati raggruppati considerando 5 direzioni di provenienza. I casi ottenuti, sono riportati nella tabella 6-25.

Tabella 6-25 Velocità vento-mare % di occorrenza (Reduced)

Parametro	Direzioni di provenienza (senso orario, da nord)					All
	0	22.5	67.5	292.5	337.5	
Speed (m/s)	5.6	5.6	4.6	5.2	5.6	-
Probability%	26%	25%	12%	9%	28%	100%

Il vento è stato modellato con lo spettro *NPD*. Per il wind sea si è considerata la stessa direzione di provenienza del vento.

## Corrente

In tabella 6-26 si riporta la percentuale di occorrenza della corrente da una specifica direzione.

Tabella 6-26 Corrente % of occorrenza

Current (m/s)		Directions towards (clockwise from north)								All
From	To	22.5	67.5	112.5	157.5	202.5	247.5	292.5	337.5	
0.00	0.20	5.07%	5.12%	8.75%	11.21%	13.78%	13.09%	9.68%	8.07%	74.75%
0.20	0.25	0.51%	0.38%	2.00%	2.82%	1.99%	1.55%	1.04%	1.70%	11.99%
0.25	0.30	0.14%	0.24%	1.43%	2.03%	1.41%	0.58%	0.42%	1.12%	7.37%
0.30	0.35	0.02%	0.09%	0.69%	1.35%	0.45%	0.16%	0.15%	0.48%	3.39%
0.35	0.40	0.01%	0.08%	0.37%	0.64%	0.21%	0.06%	0.02%	0.02%	1.40%
0.40	0.45	0.00%	0.01%	0.23%	0.35%	0.04%	0.01%	0.00%	0.00%	0.63%
0.45	0.50	0.00%	0.00%	0.17%	0.17%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.34%
0.50	0.55	0.00%	0.00%	0.04%	0.06%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.09%
0.55	0.60	0.00%	0.00%	0.00%	0.04%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.04%
Total		5.75%	5.92%	13.68%	18.64%	17.88%	15.44%	11.31%	11.38%	100.00%

Al fine di ottimizzare il numero di condizioni di carico da considerare durante l'analisi, i load cases relativi alla corrente, riportati in tabella 6-26, sono state raggruppati considerando la media pesata della velocità rispetto alla probabilità di occorrenza.

Allo stesso modo, considerando la direzione di provenienza rispetto allo swell, si è ottenuto una sola condizione di corrente, riportata nella tabella 6-27.

Tabella 6-27 Corrente % di occorrenza (Reduced)

Parametro	Direzioni di provenienza (senso orario, da Nord)	
	72.5 deg	332.5 deg
Speed (m/s)	0.14	0.14
Occurrence (%)	50.0%	50.0%

Essendo la forza di corrente un carico non ciclico, si considera non gravosa nei confronti del danno a fatica. Per questo motivo la condizione di carico ambientale dovuta alla corrente è considerata essere sufficiente.

Il profilo di corrente considerato nell'analisi è riportato nella figura 6-15.

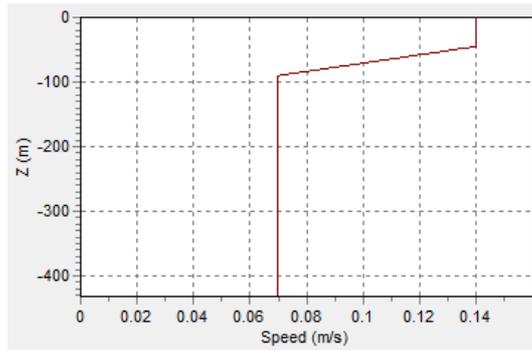


Figura 6-15 Profilo di Corrente

### Sovrapposizione degli effetti

Come già evidenziato, i fenomeni meteomarinari di onde, vento e corrente, risultano essere non correlati statisticamente. Si sono quindi considerate  $48 \times 5 \times 2 = 3600$  combinazioni di sollecitazione utilizzate per procedere con l'Heading Analysis. A titolo di esempio, si riportano nella tabella 6-28, dieci delle combinazioni di carico utilizzate. L'analisi è stata eseguita considerando sia l'immersione di Zavorra che di Pieno Carico.

Tabella 6-28 Esempio: sovrapposizione effetti

No.		Swell					Sea					Wind			Current			Probability %	
Original case	New load case	Dir	Hs (m)	Tp (s)	Gamma	Prob % (A)	Dir	Hs (m)	Tp (s)	Gamma	Prob % (B)	Dir	Speed (m/s)	Prob %	Dir	Speed (m/s)	Prob % <sup>⊙</sup>	case-wise P (=A*B*C)	P (Total)
1	1	22.5	0.7	7.3	6	0.287	22.5	0.2	1.8	1	0.116	22.5	4.6	0.116	72.5	0.14	0.5	0.017	0.287
	2	22.5	0.7	7.3	6	0.287	22.5	0.2	1.8	1	0.116	22.5	4.6	0.116	332.5	0.14	0.5	0.017	
	3	22.5	0.7	7.3	6	0.287	67.5	0.2	1.8	1	0.246	67.5	5.6	0.246	72.5	0.14	0.5	0.035	
	4	22.5	0.7	7.3	6	0.287	67.5	0.2	1.8	1	0.246	67.5	5.6	0.246	332.5	0.14	0.5	0.035	
	5	22.5	0.7	7.3	6	0.287	0	0.2	1.8	1	0.265	0	5.6	0.265	72.5	0.14	0.5	0.038	
	6	22.5	0.7	7.3	6	0.287	0	0.2	1.8	1	0.265	0	5.6	0.265	332.5	0.14	0.5	0.038	
	7	22.5	0.7	7.3	6	0.287	292.5	0.2	1.8	1	0.284	292.5	5.6	0.284	72.5	0.14	0.5	0.041	
	8	22.5	0.7	7.3	6	0.287	292.5	0.2	1.8	1	0.284	292.5	5.6	0.284	332.5	0.14	0.5	0.041	
	9	22.5	0.7	7.3	6	0.287	337.5	0.2	1.8	1	0.089	337.5	5.2	0.089	72.5	0.14	0.5	0.013	
	10	22.5	0.7	7.3	6	0.287	337.5	0.2	1.8	1	0.089	337.5	5.2	0.089	332.5	0.14	0.5	0.013	

## 6.7 Risultati Mooring Fatigue Life

L'analisi è stata svolta nel dominio del tempo, mediante l'utilizzo del software Orcaflex. La stima della vita a fatica è individuata per i vari componenti delle linee di ormeggio mediante l'utilizzo delle curve S-N fornite delle normative API RP 2SK.

Il danno a fatica accumulato annualmente dai componenti di una linea di ormeggio è ottenuto considerando un'opportuna discretizzazione delle sollecitazioni a lungo termine a cui la struttura è sottoposta.

Il danno a fatica accumulato per ogni linea di mooring nei rispetti dell'altezza significativa delle onde di swell Hs è riportato nella tabella 6-29.

Tabella 6-29 Risultati analisi a fatica

Hs (m)	Exposure (hours/year)	Fatigue Damage (per year)								
		L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9
0.7	50.4	8.82E-07	7.21E-07	7.45E-07	9.44E-07	9.69E-07	9.89E-07	9.10E-07	8.69E-07	8.47E-07
0.9	482.1	2.68E-05	2.27E-05	2.33E-05	2.34E-05	2.38E-05	2.40E-05	2.75E-05	2.64E-05	2.59E-05
1.1	1438.5	1.07E-04	9.18E-05	9.41E-05	1.03E-04	1.04E-04	1.06E-04	1.10E-04	1.06E-04	1.03E-04
1.4	2518.3	4.10E-04	4.08E-04	4.12E-04	3.27E-04	3.33E-04	3.39E-04	4.16E-04	4.05E-04	3.98E-04
1.6	2244.8	5.70E-04	5.42E-04	5.48E-04	5.99E-04	6.09E-04	6.19E-04	5.91E-04	5.64E-04	5.45E-04
1.9	1136.7	7.46E-04	6.95E-04	7.15E-04	8.63E-04	8.70E-04	8.71E-04	7.73E-04	7.41E-04	7.17E-04
2.1	461.7	4.46E-04	4.48E-04	4.56E-04	4.83E-04	4.88E-04	4.88E-04	4.59E-04	4.43E-04	4.31E-04
2.4	251.8	3.60E-04	4.10E-04	4.15E-04	3.80E-04	3.85E-04	3.87E-04	3.71E-04	3.59E-04	3.48E-04
2.6	97.5	2.15E-04	2.16E-04	2.21E-04	2.35E-04	2.37E-04	2.39E-04	2.22E-04	2.14E-04	2.06E-04
2.9	39.8	2.18E-04	2.65E-04	2.67E-04	2.21E-04	2.24E-04	2.25E-04	2.24E-04	2.18E-04	2.12E-04
3.1	28.1	1.59E-04	1.71E-04	1.73E-04	1.51E-04	1.53E-04	1.55E-04	1.64E-04	1.59E-04	1.53E-04
3.4	4.9	5.47E-05	6.12E-05	6.06E-05	4.23E-05	4.33E-05	4.42E-05	5.64E-05	5.48E-05	5.29E-05
3.7	9.3	1.68E-04	1.75E-04	1.73E-04	1.27E-04	1.32E-04	1.36E-04	1.74E-04	1.69E-04	1.63E-04
Total	8764.0	3.48E-03	3.51E-	3.56E-	3.56E-	3.60E-	3.63E-	3.59E-	3.46E-	3.35E-03
Fatigue Life (years)	-	287	285	281	281	277	275	279	289	298
Safety Factor	-	14.4	14.3	14.0	14.1	13.9	13.8	13.9	14.4	14.9

Si può notare che la vita minima a fatica è 275 anni, realizzata dalla linea L6. Ciò corrisponde ad un coefficiente di sicurezza pari a 13.8 ( $=275/20$ ), maggiore del minimo richiesto pari a 10.

Il danno a fatica è riportato graficamente nella figura 6-16.

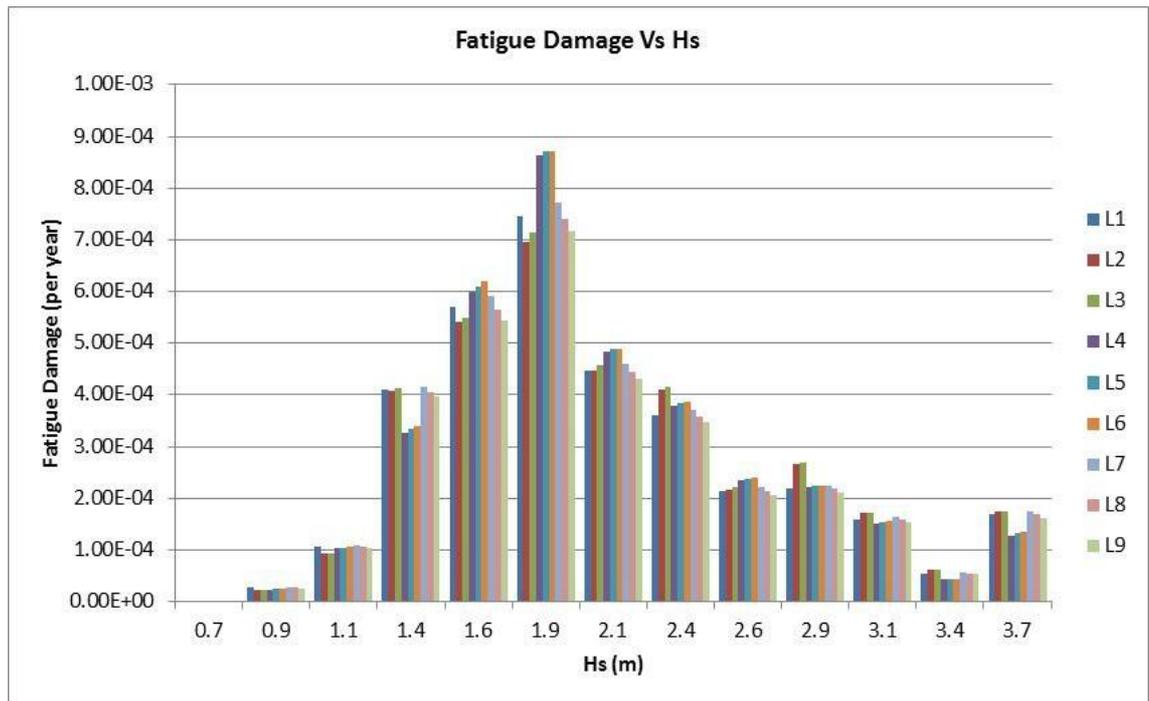


Figura 6-16 Danno a fatica Vs Hs

Si può osservare che il massimo danno a fatica si verifica per swell con Hs pari a 1.9 m.

La relazione tra il danno a fatica ed il periodo d'onda da swell, con Hs 1.9 è riportato nel grafico di figura 6-17.

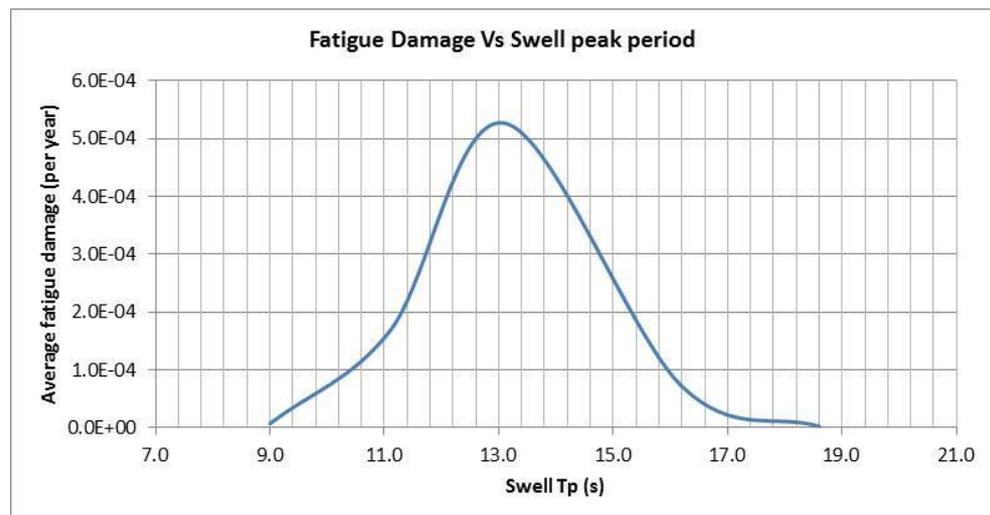


Figura 6-17 Danno a fatica Vs Tp – Hs 1.9 m

Si può osservare che lo swell con Hs 1.9 e Tp 13.1 sec comporta il maggior danno a fatica.

Nel grafico di figura 6-18 è riportato il danno a fatica che occorre lungo le linee di ormeggio.

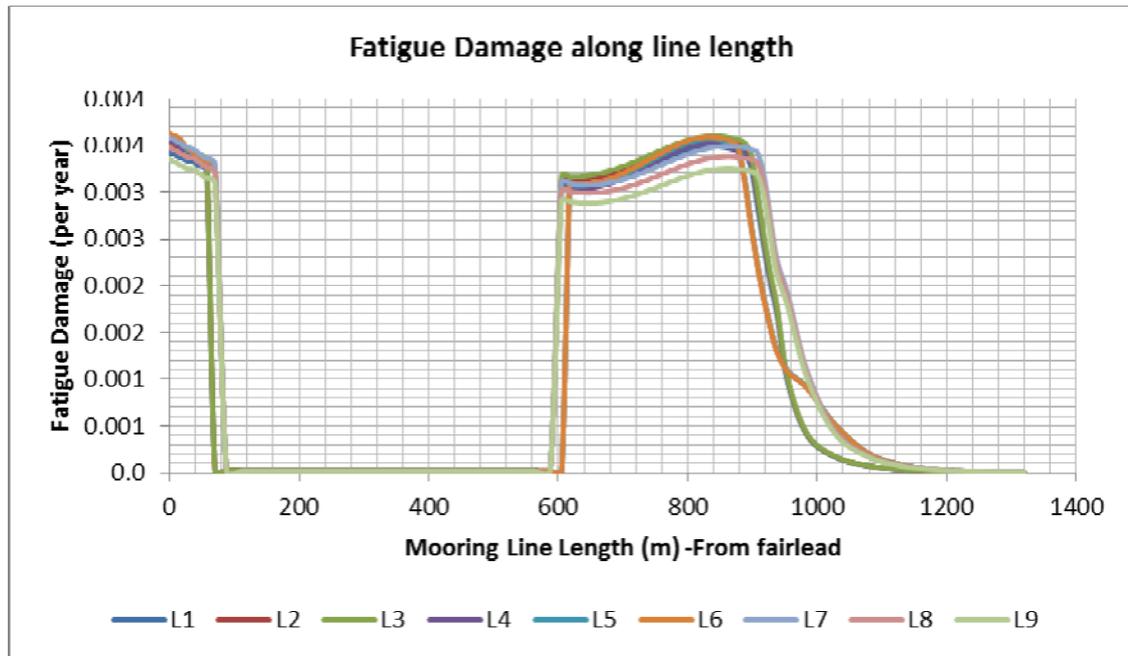


Figura 6-18 Danno a fatica lungo le linee di mooring

Si può osservare che il danno massimo si realizza in corrispondenza dei fairlead. Il secondo punto più critico risulta essere appena superiore al punto di contatto della catena con il fondale.

Si può notare che, in corrispondenza del wire rope si ha un crollo del danno a fatica, legato alle differenti caratteristiche meccaniche.

Il diagramma riassuntivo di figura 6-19 mostra la vita a fatica di ogni linea di ormeggio.

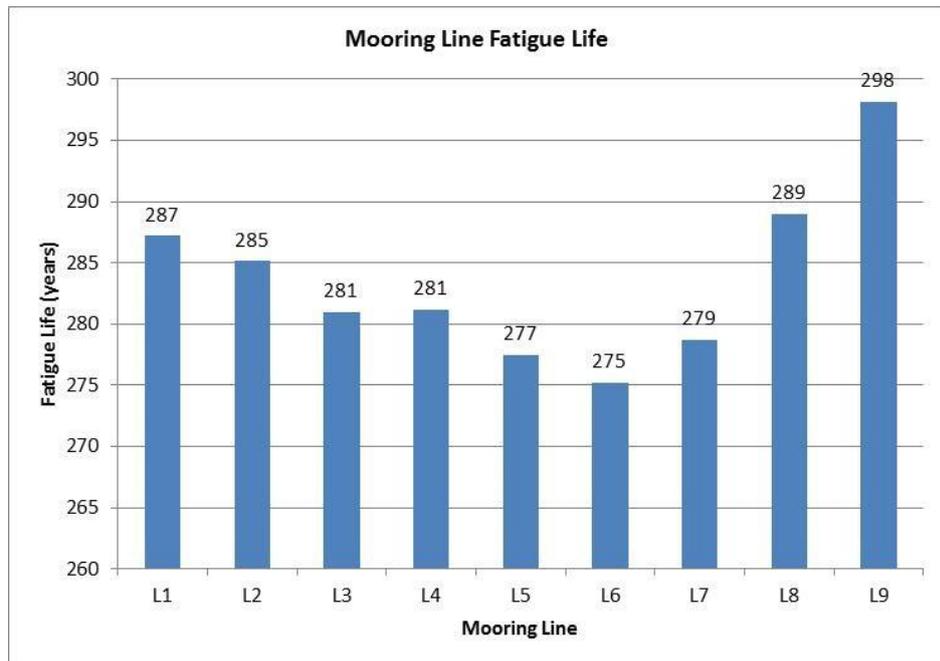


Figura 6-19 Vita a fatica delle linee di ormeggio

# Capitolo 7

## Risultati della ricerca

### 7.1 Introduzione

Il progetto di una struttura di produzione Offshore, così come di una nave in genere, si caratterizza di successive approssimazioni: ipotizzati degli opportuni dati iniziali, si procede con il lavoro ottenendo risultati e caratteristiche sempre più vicine al risultato finale. Solitamente, il progettista, entra nella “spirale di progetto” fidandosi della propria esperienza e, talvolta, osservando soluzioni adottate in progetti simili. In questo modo, si incrementa la probabilità di convergere ad un risultato di qualità in un tempo ragionevole.

E' importante considerare, però, che il progetto di una struttura *FPSO* ha una *time to market* di circa 6 anni e che l'elevato numero di variabili (newbuilt/conversion, profilo di missione, tipo di mooring, layout delle linee, etc.) rende ogni unità sempre differente dalle analoghe realizzazioni precedenti.

Per questi motivi e per la difficile reperibilità di informazioni dettagliate relative alle *FPSO* realizzate ed installate nelle diverse aree geografiche, sulla base del lavoro descritto nei capitoli precedenti, si è proceduto con una sensitivity analysis relativa al sistema di ormeggio verificato.

### 7.2 Influenza dell'altezza del fondale – Mooring System

Variando l'altezza del fondale ed adeguando opportunamente la geometria e i componenti delle linee, si è proceduto con verifiche ripetute del sistema di mooring, facendo in modo di realizzare valori di offset dalla condizione di equilibrio e tensioni delle linee quanto più prossimi ai valori realizzati nel caso studiato nei capitoli precedenti.

Dai risultati ottenuti, è stato possibile costruire i grafici seguenti, che riportano il peso delle linee (*legs*) al variare dell'altezza del fondale.

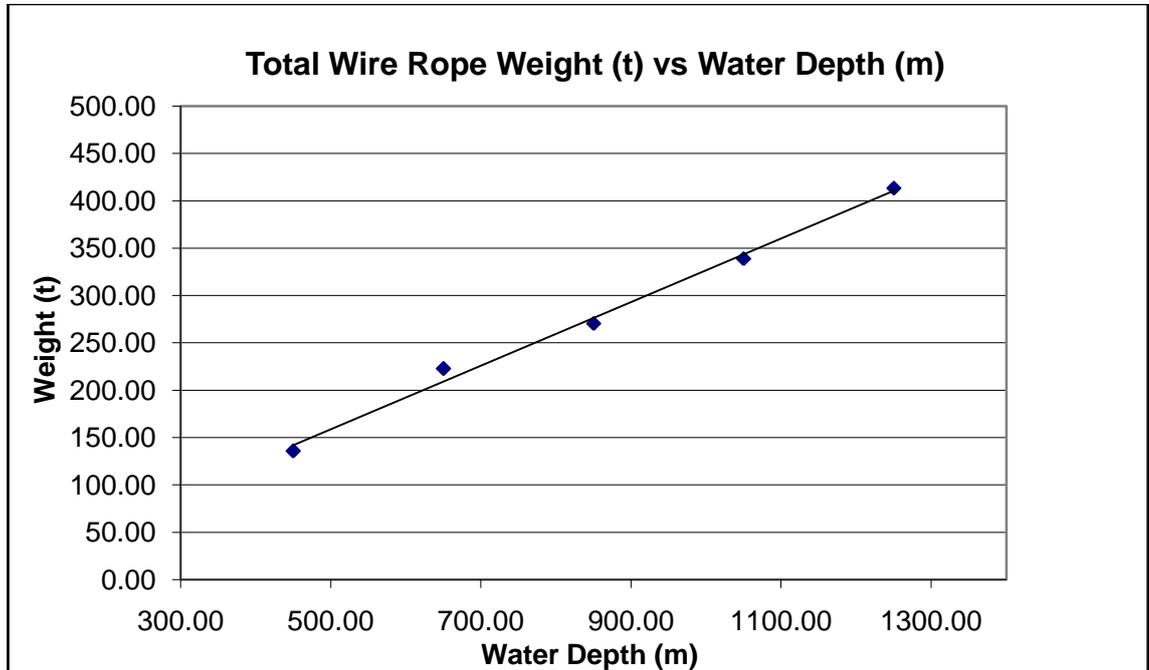


Figura 7-1 Peso cavo wire rope Vs Altezza Fondale

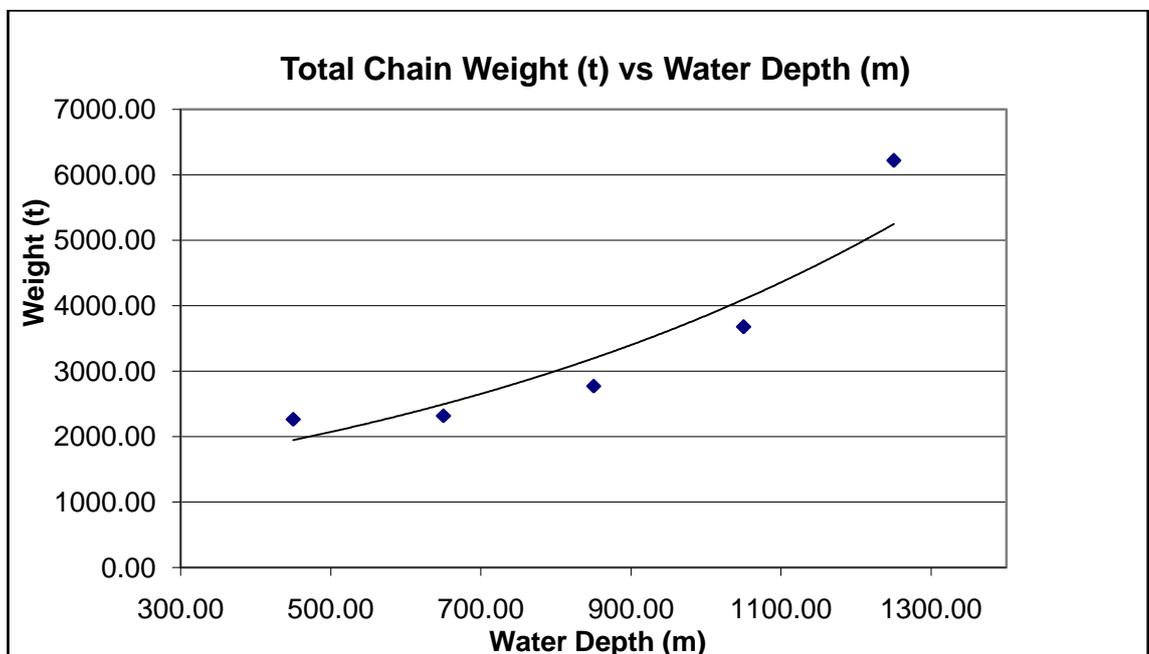


Figura 7-2 Peso catene Vs Altezza fondale

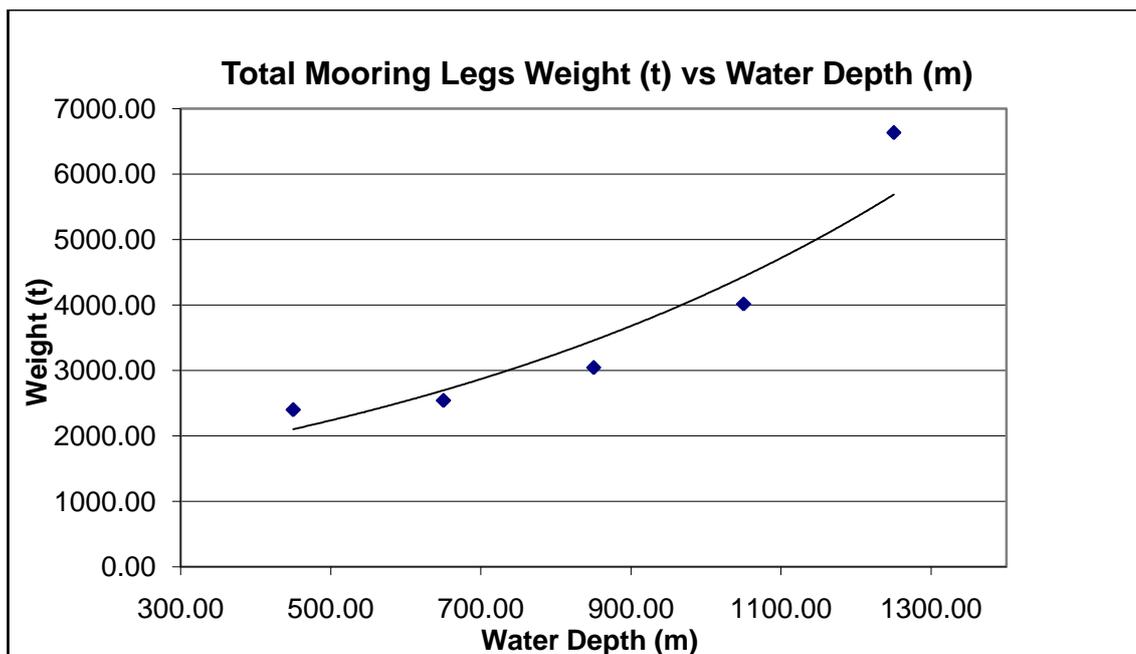


Figura 7-3 Peso linee Vs Altezza fondale

Le analisi sono state eseguite tra i 450 m e i 1250 m, con step di 200 m.

Dai grafici riportati si evince che il sistema a catenaria utilizzato, soprattutto per i tratti di linee composti da catena, oltre i 1000 m di fondale, comporta pesi e quindi costi di investimento molto alti, confermando la pratica comune di utilizzare, per installazioni in acque profonde, un sistema tipo *Taut*. In tale configurazione, le linee di ormeggio, quasi interamente costituite da fibre sintetiche, sono completamente pretensionate e si dispongono in linea retta tra il punto di ancoraggio e i fairlead, con angoli col fondale tra 30° e 45°.

### 7.3 Topside

Il lavoro svolto durante il corso di dottorato, non interamente riportato nella presente trattazione in quanto strettamente legato ad aspetti di carattere professionale, ha riguardato la stima dei pesi delle strutture dei Topside.

Nelle fasi preliminari di un progetto, i dati di input necessari per il corretto dimensionamento di tali strutture (deformazione dell'unità in corrispondenza del ponte

principale, *Hull deflection*, accelerazioni inerziali ed impianti da ospitare) non sono ancora noti.

Considerato, inoltre, che l'installazione sul ponte principale di pesi rilevanti ha un'influenza significativa sulle caratteristiche di stabilità della struttura, risulta essere di primaria importanza stimare opportunamente i pesi dei moduli previsti per lo specifico progetto. Sulla scorta dell'esperienza professionale ed accademica, per alcuni dei moduli più comuni, è stato possibile elaborare i grafici del paragrafo seguente.

### ***Piperack***

Per Piperack si intende l'insieme delle strutture, disposte solitamente sul ponte a centro nave, sulle quali sono alloggiate tutte le tubazioni ed i cavi che percorrono longitudinalmente l'unità *FPSO*. In base alle esigenze del cantiere di costruzione, si può decidere di realizzare il piperack come modulo distinto, posato in opera direttamente sul ponte, oppure realizzarlo a tratti, integrato con gli altri moduli di cui è prevista l'installazione. Si riporta nelle figure 7-4 e 7-5, l'andamento del peso delle strutture del piperack al variare del peso dei componenti meccanici alloggiati.

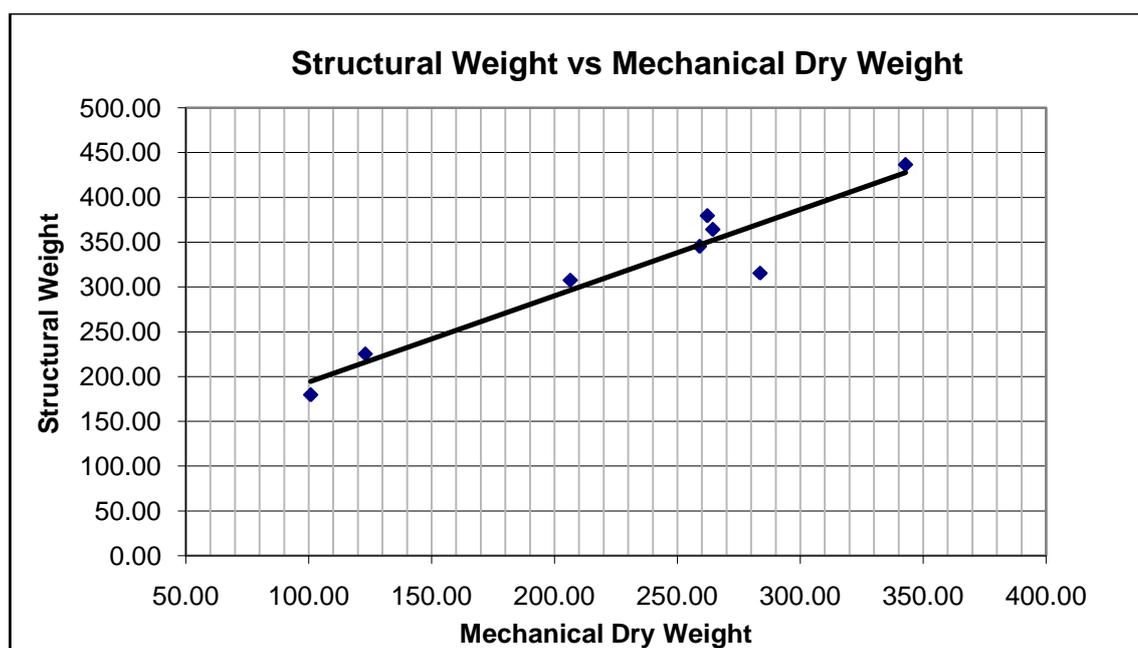


Figura 7-4 Peso vs component meccanici – Piperack integrato

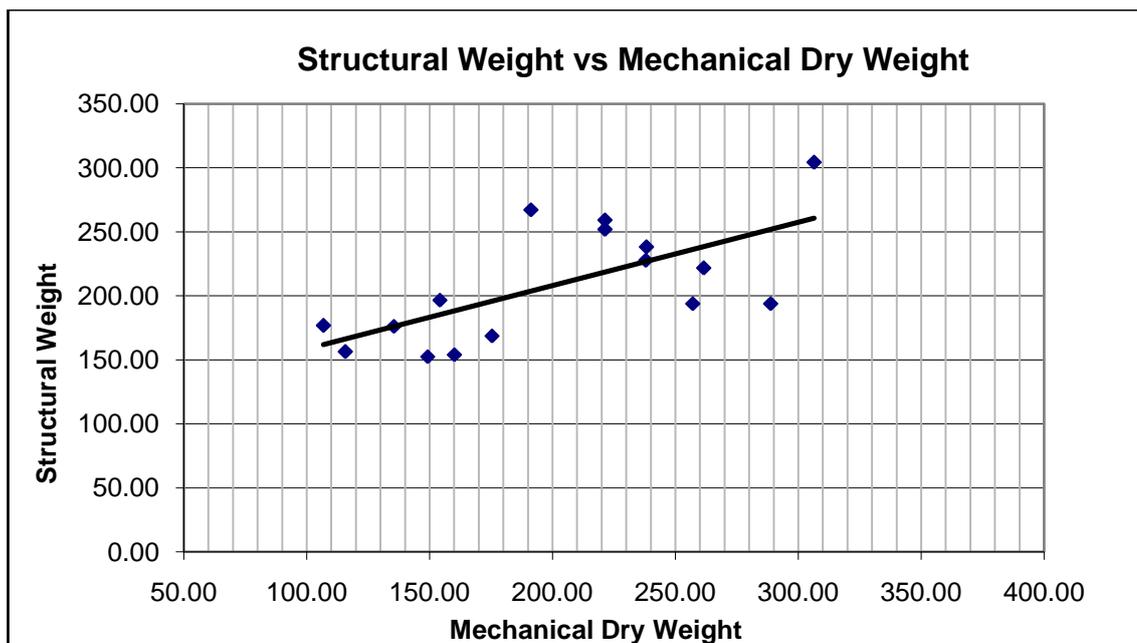


Figura 7-5 Peso strutture vs component meccanici - Piperack non integrato

**Power Generation**

Il modulo di *power generation* ospita i componenti meccanici, principalmente turbine ed ausiliari, che costituiscono la fonte primaria di approvvigionamento di energia elettrica per tutti i processi e le utenze di bordo. Nella figura 7-6 è riportato l'andamento del peso della struttura del modulo, in funzione del peso delle strutture supportate.

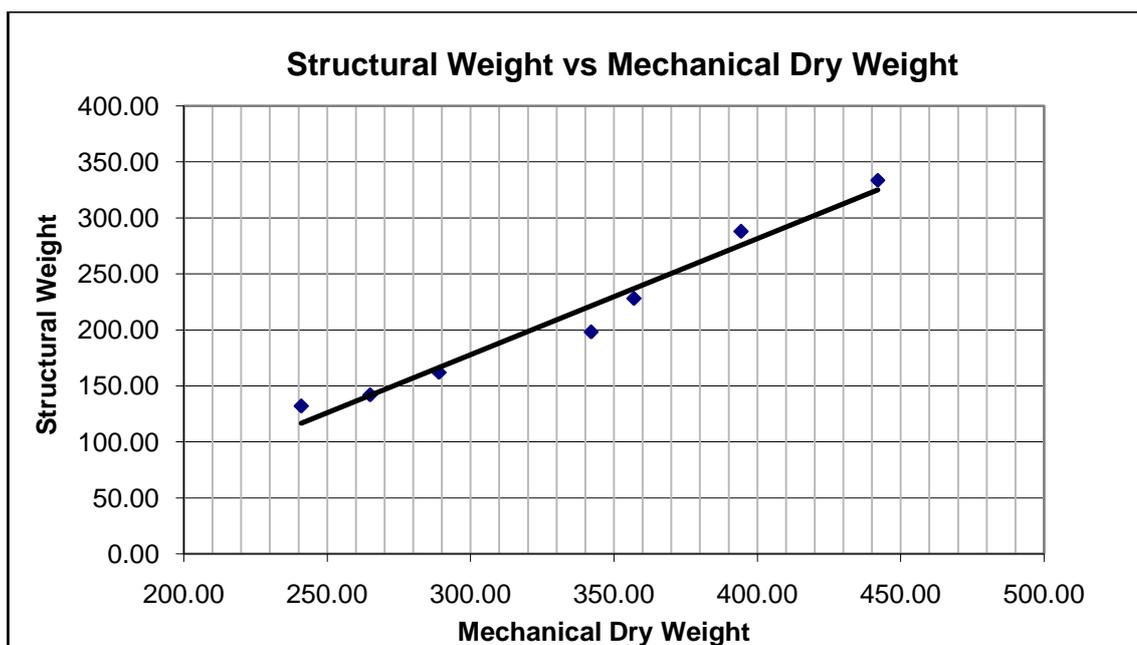


Figure 7-6 Peso strutture vs component meccanici – Modulo Power generation

### ***Laydown Area***

Il modulo di *laydown*, per quanto semplice, risulta essere indispensabile sia in fase di costruzione dell'*FPSO*, sia in fase di esercizio. Solitamente installato per primo, è costituito da una serie di strutture che supportano un ponte piano e sgombro da qualsiasi impianto, su cui è possibile movimentare in sicurezza carichi, con l'ausilio delle gru, di cui l'unità è dotata, o dell'impianto di sollevamento del cantiere di costruzione.

In figura 7-7 si riporta l'andamento del peso della struttura del modulo di *laydown* in funzione dell'area utile alla movimentazione.

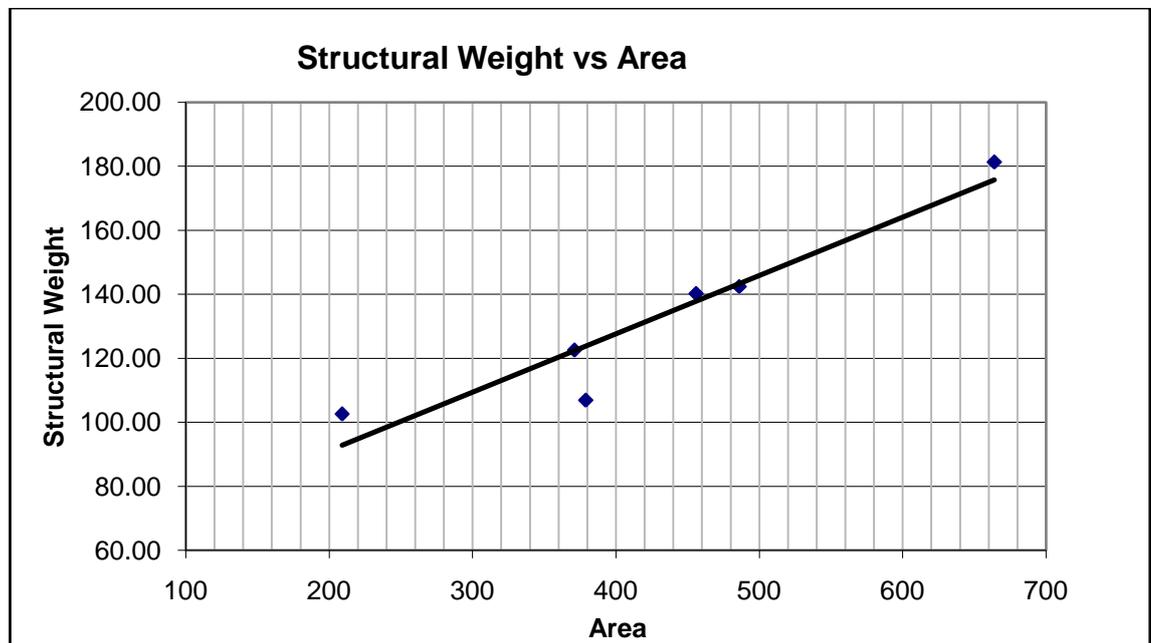


Figura 7-7 Peso strutture vs area utile

## ***Flare***

La *flare* è una struttura reticolare di estensione rilevante, prossima ai 100 m, installata verticalmente sul ponte. E' realizzata da tre o quattro travi principali, opportunamente vincolate alle strutture della *FPSO* e collegate tra esse da montanti e controventi. Ha il compito di sorreggere i dispositivi che, solo in caso di emergenza, provvedono alla depressurizzazione rapida degli impianti di processo, mediante la combustione totale o parziale degli idrocarburi in essi contenuti. Il grafico di figura 7-8 riporta l'andamento del peso della struttura del modulo flare a pianta triangolare (tre travi principali), in funzione della propria altezza.

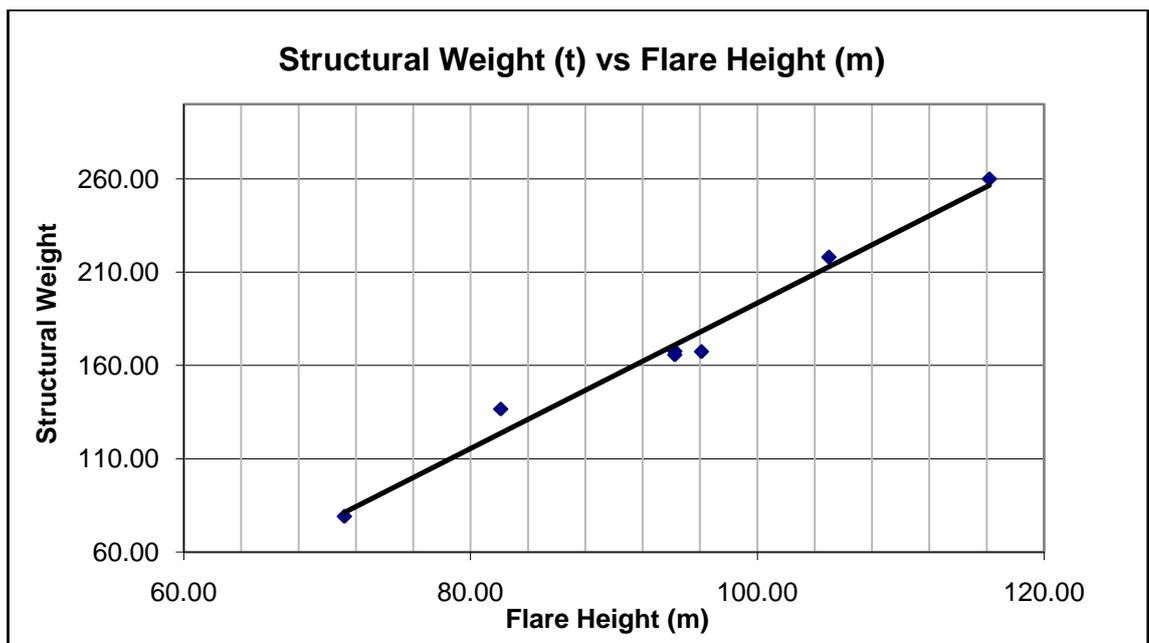


Figura 7-8 Peso struttura vs altezza – Modulo Flare sezione triangolare

## Composizione dei Pesì dei Topside

Nella figura 7-9 si riportano i pesi, suddivisi per categoria, dei topside di quindici unità FPSO attualmente in esercizio.

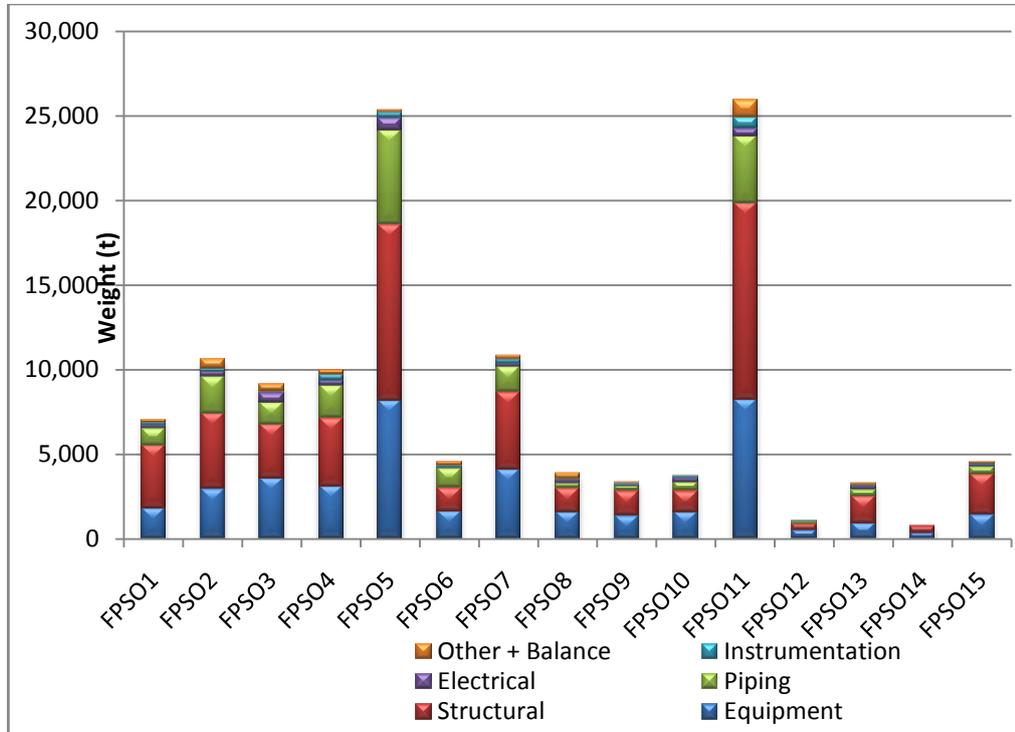


Figura 7-9 Pesì per categoria di 15 unità investigate

Dalle informazioni riportate nella figura precedente, è stato possibile dedurre il contributo medio di ogni categoria sul peso totale dei moduli (figura 7-10).

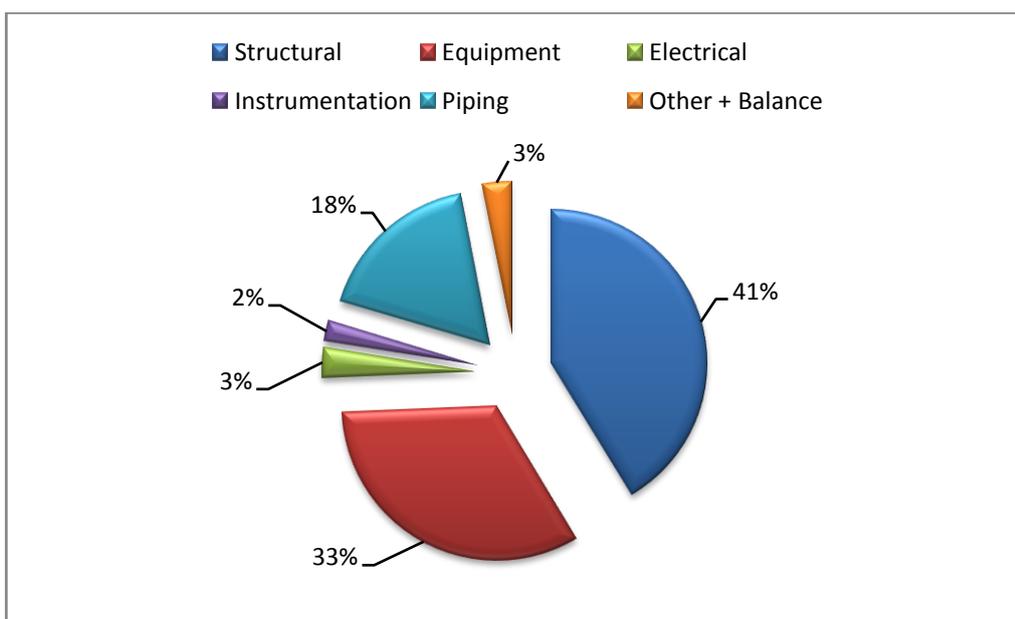


Figura 7-10 % peso categoria Vs Peso totale topside

# Capitolo 8

## Conclusioni

### 8.1 Premessa

Negli ultimi anni, la progressiva diminuzione delle fonti fossili disponibili sulla terraferma ha spostato l'attenzione sullo studio di soluzioni alternative, con lo scopo di rendere economicamente vantaggiosa la coltivazione di campi marginali, situati geograficamente in aree di mare sempre più distanti dalla costa e con fondale sempre più elevato.

Le riserve di idrocarburi, approvvigionabili con le tecnologie odierne, consentiranno il sostentamento energetico mondiale per i prossimi settanta anni, inoltre, considerato che il passaggio a fonti alternative di energia, anche per motivi di equilibrio economico-politico mondiale, non possa che avvenire gradualmente, lo studio, il progetto e la realizzazione di strutture di produzione offshore risulta essere pienamente giustificato.

### 8.2 Sintesi dell'elaborato

Il tipo di strutture oggetto del lavoro svolto, risulta essere fortemente condizionato dalle caratteristiche dello specifico sito di installazione, sia per le condizioni meteo, sia per l'altezza di fondale. Per questo motivo, si è ritenuto opportuno studiare il sistema di ormeggio di una *FPSO*, al fine di tracciare delle linee guida a sostegno del progettista nelle prime fasi del lavoro. Secondariamente, si sono fornite delle indicazioni utili per la stima dei pesi dei topside, di considerevole influenza nei riguardi della stabilità trasversale della struttura.

Eseguita parte del progetto di una unità *FPSO* da installare sulle coste dell'Africa Occidentale, definita la geometria, la compartimentazione dello scafo e la distribuzione di massima dei pesi, si è proceduto con il progetto e la verifica del sistema di ormeggio.

Con l'ausilio di software di calcolo specialistici si è realizzato il modello dello scafo e si è proceduto con l'individuazione della probabilità di occorrenza di un fissato posizionamento rispetto al Nord (*Heading Analysis*) e dell'ampiezza dei moti nave quando sottoposta a determinate sollecitazioni concomitanti di onde, corrente e vento (*Motion Analysis*). Sulla base dell'esperienza e dall'osservazione di soluzioni adottate in progetti simili, si è proceduto al dimensionamento, alla realizzazione del modello ed alla verifica del sistema di ormeggio (*Mooring Strength and Fatigue Analysis*).

Completato il lavoro sopra descritto, variando l'altezza del fondale ed adeguando opportunamente la geometria e i componenti delle linee, si è proceduto con verifiche ripetute del sistema di *mooring* ottenendo i risultati riportati nel capitolo precedente.

### **8.3 Conclusioni**

Da quanto evidente dai risultati dello studio effettuato, per fondali con altezza superiore ai 1000 m, la configurazione a catenaria studiata, risulta essere caratterizzata da costi di investimento troppo elevati.

Sulla linea del lavoro svolto, sarebbe interessante studiare l'installazione della medesima unità in aree geografiche differenti, confrontando costi, vantaggi e svantaggi dei diversi sistemi di *mooring*.

Sviluppi futuri, per fondali quindi sempre più elevati, mirano ad incrementare l'applicabilità dei sistemi di ormeggio *Taut* e a perfezionare tecniche di coltivazione sottomarina automatizzata, eventualmente in comunicazione con una struttura *FPSO* installata in altezze di fondale inferiori.

# Bibliografia

- American Petroleum Institute *Recommended Practice API RP 2SK*.
- American Bureau of Shipping - *FPI Floating Production Installation*, 2013
- American Bureau of Shipping - *SVR Steel Vessel Rules*, 2012
- Prof. Ing. Campanile A.– *Appunti del corso di Strutture Offshore* Federico II, Napoli.
- Det Norske Veritas Germanischer Lloyd – Software HydroD, 2015
- International Association of Classification Societies - *CSR Common Structural Rules*, 2012.
- Norwegian Petroleum Directorate - *NPD Gust Spectra*, 1992
- Ochi M. K., Hubble E. N. - *Six Parameter Wave Spectra*, 1976
- Orcina – *Software OrcaFlex*, 2015
- Pallavicini F. - *Enciclopedia degli Idrocarburi* Volume I, Treccani, 2003.