

AVAMPORTO GALLEGGGIANTE BOCCA DI LIDO TERMINAL PASSEGGERI



2013 - 2015

ALLEGATO 4

RAFFAELE NICOLOSI

Dynamics of Offshore Floating Structures

Via Borgo Antiga 95, 31020 San Pietro di Feletto (TV), Italia

Tel. +39 0438486663, +39 3490998629

e-mail: nicolosi.raffaele@gmail.com

C.F. NCLRFL81S28Z114Z

P.IVA n. 04578360267

Albo professionale N. A 3696

N. Progetto: A-14-8

PROPONENTI DEL PROGETTO

Proff. Stefano Boato, Carlo Giacomini, Mariarosa Vittadini

Ingg. Vincenzo Di Tella, Raffaele Nicolosi, Paolo Vielmo

Arch. Dino Verlato, Michele Zordan

TITOLO DOCUMENTO:

ALLEGATO 4

Nuovo Terminal Crociere di Venezia – Soluzione Galleggiante

Analisi Dinamica del Sistema

TIPO DOCUMENTO: **Relazione Tecnica**

<i>DOCUMENTO N.</i>	<i>REVISIONE</i>	<i>DATA</i>	<i>PREPARATO DA</i>	<i>CONTROLLATO DA</i>
TR-14-2	0	01/11/2014	R. G. Nicolosi	V. Di Tella



REVISIONI

Revisione	Motivo dell'emissione	Sezioni modificate
0	Per revisione	



INDICE

1	Introduzione e descrizione del progetto	5
2	Scopo del lavoro	6
3	Simboli, acronimi e abbreviazioni	7
3.1	Simboli	7
3.2	Acronimi e abbreviazioni.....	8
4	Riferimenti.....	9
4.1	Documenti di progetto.....	9
4.2	Standard e normative	9
4.3	Letteratura tecnica	9
5	Unità di misura	10
6	Sistemi di riferimento	11
7	Descrizione del sistema	12
7.1	Generale	12
7.2	Moduli galleggianti.....	12
7.3	Sistema di ormeggio dei moduli.....	13
7.4	Sistema di connessione tra moduli	14
7.5	Navi da crociera	15
7.6	Sistema di ormeggio delle navi da crociera.....	16
7.6.1	Parabordi.....	16
7.6.2	Cavi.....	17
7.6.3	Bitte.....	17
7.6.4	Configurazione di ormeggio	18
8	Dati meteomarini	19
9	Metodologia di calcolo	20
9.1	Generale	20
9.2	Scenari	20
9.2.1	Estremo.....	20
9.2.2	Operativo	20
9.2.3	Impatto della nave durante l’approccio	21
9.3	Casi meteomarini.....	21
9.3.1	Condizioni estreme	22
9.3.2	Condizioni operative	23
9.4	Criteri.....	23
9.5	Analisi di sensitività sui corpi morti.....	24
9.6	Output.....	24
10	Software	26



11	Modellazione del sistema	27
11.1	Generale	27
11.2	Corpi galleggianti	27
11.2.1	Forze idrostatiche	27
11.2.2	Forze idrodinamiche	27
11.2.3	Forze del vento e della corrente	28
11.2.4	Smorzamento del moto di rollio	29
11.2.5	Smorzamento dei moti a bassa frequenza	29
11.3	Linee di ormeggio dei moduli	29
11.4	Cerniere	29
11.5	Parabordi	29
11.6	Cavi di ormeggio delle navi	29
11.7	Agenti meteomarini	29
11.7.1	Onde	29
11.7.2	Vento	30
11.7.3	Corrente	30
12	Risultati	31
12.1	Condizioni estreme	32
12.2	Condizioni operative	34
12.2.1	Due navi ormeggiate	34
12.2.2	Quattro navi ormeggiate	37
12.3	Impatto della nave durante l'approccio	40
12.4	Riepilogo dei risultati	42
12.5	Sensitività sui corpi morti	45
13	Conclusioni	47
	Appendice	48



1 INTRODUZIONE E DESCRIZIONE DEL PROGETTO

In seguito al divieto di transito delle grandi navi da crociera nel Canale di San Marco, sancito dal Decreto Interministeriale 2 Marzo 2012 (Decreto “Clini - Passera”), è al vaglio la realizzazione di un nuovo terminal crociere.

La soluzione proposta prevede la realizzazione di un terminal galleggiante, modulare, presentato dal gruppo di lavoro costituito dai proff. S. Boato, C. Giacomini, M.R. Vittadini, e gli arch. Ylenia Bristot, Andrea Stefani. La configurazione strutturale dei moduli e il progetto preliminare del sistema di ancoraggio è stato presentato dall'ing. V. Di Tella. Successivamente si sono aggiunti al gruppo di lavoro l'ing. P. Vielmo per la progettazione meccanica e impiantistica e gli arch. Verlato, M. Zordan per l'architettura generale e la progettazione delle sovrastrutture dei moduli.

Ciascun modulo, costruito in acciaio, lungo circa 155 metri e largo 36, è ormeggiato al fondale tramite catene. La soluzione proposta è totalmente reversibile e di facile costruzione. I moduli possono essere costruiti in cantieri navali, trasportati in sito e connessi al sistema di ormeggio. Tale operazione è completamente reversibile.

Il terminal è posizionato all'esterno rispetto alle paratoie del MOSE lato Treporti ed è verificato e dimensionato per l'ormeggio di quattro navi da crociera fino a 120,000 tonnellate di stazza lorda. Va tuttavia sottolineato che, se fosse necessario, il terminal può essere ampliato facilmente grazie alla sua modularità. Davanti al terminal lato mare è posizionata una boa per l'ormeggio dei cavi alla lunga delle due navi esterne.

Nella prima fase di esercizio il terminal è del tutto indipendente dall'isola artificiale del Bacan, a regime quando le opere del Mose saranno terminate e si potrà utilizzare l'isola per il trasferimento persone e merci dal terminal alla laguna. Il terminal sarà collegato con due passerelle incernierate fisse alle strutture dell'isola e appoggiate sul primo modulo (modulo 1) con un vincolo che ne consente i moti rispetto alla struttura fissa di appoggio delle passerelle.



2 SCOPO DEL LAVORO

Lo scopo principale di questo documento è di presentare i risultati dell'analisi del progetto di terminal galleggiante per le navi da crociera a Venezia.

In particolare sono valutati i comportamenti dinamici dei moduli che compongono il terminal, delle navi e dei sistemi di ormeggio e connessione tra i corpi che compongono il sistema.

L'analisi dinamica e la verifica dei sistemi di ormeggio sono condotte in accordo con le più rilevanti normative internazionali applicabili.

Nelle sezioni seguenti sono descritti:

- il sistema e i dati di input;
- la metodologia usata;
- il software e le principali caratteristiche di modellazione;
- i risultati ottenuti e le conclusioni.

L'analisi parte dalla verifica strutturale del terminal e dalla configurazione degli ancoraggi dei singoli moduli trattati nella relazione Tr-14-11 *“NuovoTerminal Crociere di Venezia- Soluzione Galleggiante-Analisi di Stabilità e Robustezza Longitudinale”* e utilizza i risultati del rapporto Principia MEM 144.380.01 *“Hydrodynamic Calculation – Methodology and Outputs”* del 20/10/14.



3 SIMBOLI, ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

3.1 SIMBOLI

A_L	Area laterale
A_T	Area trasversale
AX	Accelerazione lungo l'asse longitudinale
AY	Accelerazione lungo l'asse trasversale
AZ	Accelerazione lungo l'asse verticale
B	Larghezza
D	Altezza di costruzione, diametro
F	Forza
Fr	Forza radiale
F_x	Forza lungo l'asse longitudinale
F_y	Forza lungo l'asse trasversale
F_z	Forza lungo l'asse verticale
GM_T	Altezza metacentrica trasversale
H_s	Altezza significativa
I_{xx}	Momento d'inerzia attorno all'asse longitudinale
I_{yy}	Momento d'inerzia attorno all'asse trasversale
I_{zz}	Momento d'inerzia attorno all'asse verticale
L	Lunghezza
LCG	Coordinata longitudinale del centro di gravità
L_{OA}	Lunghezza fuori tutto
L_{PP}	Lunghezza tra le perpendicolari
Oxyz	Sistema di riferimento locale dei corpi
R_X	Rotazione attorno all'asse longitudinale
R_Y	Rotazione attorno all'asse trasversale
R_Z	Rotazione attorno all'asse verticale
T	Immersione, Tensione
TCG	Coordinata trasversale del centro di gravità
T_p	Periodo di picco
V_c	Velocità della corrente (superficiale)
VCG	Coordinata verticale del centro di gravità
V_w	Velocità del vento (media oraria)
X	Spostamento lungo l'asse longitudinale
Y	Spostamento lungo l'asse trasversale
Z	Spostamento lungo l'asse verticale
γ	Parametro di picco dello spettro JONSWAP
Δ	Dislocamento



3.2 ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

API	American Petroleum Institute
BV	Bureau Veritas
Dir.	Direzione
DNV	Det Norske Veritas
DWT	Dead Weight Tonnes
FEM	Finite Element Method
FS	Fattore di Sicurezza
GEA	Guaranteed Energy Absorption
GL	Germanischer Lloyd
GT	Gross tonnage
IFP	Institut Française du Pétrole
IMO	International Maritime Organization
ISO	International Organization for Standardization
ITTC	International Towing Tank Conference
JONSWAP	Joint North Sea WAVE Project
Max.	Massimo
MBL	Minimum Breaking Load
MPM	Most Probable Maximum
ND	Noble Denton
NPD	Norwegian Petroleum Directorate
OCIMF	Oil Companies International Marine Forum
PIANC	Permanent International Association of Navigation Congresses
Oper.	Operativo
QTF	Quadratic Transfer Function
RAO	Response Amplitude Operator
Rif.	Riferimento
RINA	Registro Italiano Navale
SI	Sistema Internazionale di unità di misura
SWL	Safe Working Load
UF	Utilization Factor



4 RIFERIMENTI

4.1 DOCUMENTI DI PROGETTO

- [1] Technital, “Relazione Meteomarina e Morfologica”, 25/09/02
- [2] Principia MEM.144.380.01 “Venice Floating Dock – Hydrodynamic Calculations – Methodology and Outputs”, Rev. 01, 20/10/2014
- [3] Raffaele Nicolosi, TR-14-1, “Nuovo Terminal Crociere di Venezia – Soluzione Galleggiante – Analisi della Stabilità e Robustezza Longitudinale”, Rev. 0, 01/11/2014

4.2 STANDARD E NORMATIVE

- [4] API, Recommended Practice 2SK, “Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures”, Third Edition, October 2005
- [5] BV, Rule Note NR 493 DT R02 E, “Classification of Mooring Systems for Permanent Offshore Units”, April 2012
- [6] GL Noble Denton, 0032/ND, “Guidelines for Moorings”, Rev. 0, 6 Dec 10
- [7] IMO, MSC/Circ.1175, “Guidance on Shipboard Towing and Mooring Equipment”, 24 May 2005
- [8] ISO, International Standard ISO 19901-7:2013, “Petroleum and Natural Gas Industries – Specific Requirements for Offshore Structures – Part 7: Stationkeeping Systems for Floating Offshore Structures and Mobile Offshore Units”, Second Edition, 2013-05-01
- [9] ITTC, The Specialist Committee on Waves, “Final Report and Recommendations to the 23rd ITTC”, 2002
- [10] DNV, Offshore Standard DNV-OS-E301, “Position Mooring”, October 2010
- [11] DNV, Recommended Practice DNV-RP-C205, “Environmental Conditions and Environmental Loads”, October 2010
- [12] OCIMF, “Mooring Equipment Guidelines (MEG3)”, 3rd Edition, 2008
- [13] PIANC, “Guidelines for the Design of Fender Systems: 2002”, Report of Working Group 33 of the Maritime Navigation Commission, 2002

4.3 LETTERATURA TECNICA

- [14] Blendermann W., “Wind Loading of Ships – Collected Data from Wind Tunnel Tests in Uniform Flow”, Institut für Schiffbau der Universität Hamburg, Bericht Nr. 574, Dezember 1996
- [15] Molin B., “Hydrodynamique Des Structures Offshore”, CLAROM, Editions Technip, 2002
- [16] Posidonia, DWG 391/07, “Improved Double Bollards”, Rev.1, 17/01/2012
- [17] Principia, IFP Energies Nouvelles, “DeepLines™ 4.5 Theory Manual”, July 2011
- [18] Ramnas, “Quality Chains and Accessories”
- [19] Rice S. D., Seelig W. N., “Cruise Vessel Wind Coefficients for Mooring Analysis”, ASCE, 2010
- [20] Trelleborg, Ref. M1100-S12-V1-3-EN, “Fender Design”, 2011
- [21] Yokohama, Ref: WAN05100110, “Performance Curve of Yokohama Pneumatic Fender 3300x4500 – P80 (P₀=80kPa)”



5 UNITÀ DI MISURA

Se non diversamente indicato, nel presente elaborato le unità di misura sono conformi al Sistema Internazionale (SI).



6 SISTEMI DI RIFERIMENTO

Il sistema di riferimento locale delle navi da crociera è destrorso, con l'origine O sulla perpendicolare addietro, sul piano diametrale e al livello della chiglia. L'asse x è positivo verso prua, l'asse y verso sinistra e l'asse z verso l'alto.

Il sistema di riferimento locale dei moduli è destrorso, con l'origine O all'estrema poppa, sul piano diametrale e al livello della chiglia. L'asse x è positivo verso prua, l'asse y verso sinistra e l'asse z verso l'alto.



7 DESCRIZIONE DEL SISTEMA

7.1 GENERALE

Il terminal è composto da 4 moduli galleggianti identici, ciascuno ormeggiato al fondale tramite 8 catene. I moduli sono collegati tra di loro attraverso cerniere che consentono rotazioni relative attorno all'asse trasversale, cioè beccheggio relativo (si veda

Figura 7-6).

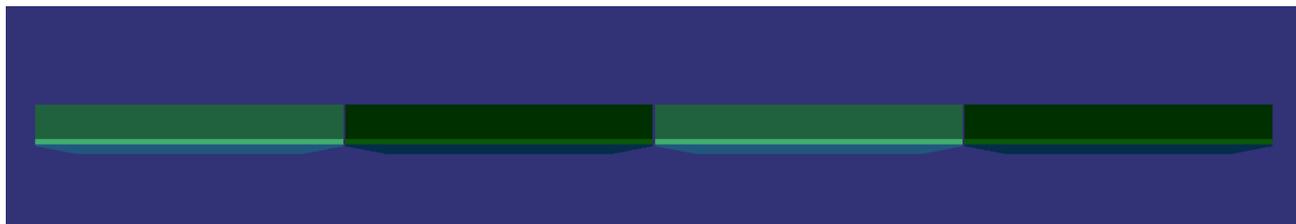


Figura 7-1 – Configurazione del terminal galleggiante

Le caratteristiche principali del sistema sono descritte nei paragrafi seguenti.

7.2 MODULI GALLEGGIANTI

I moduli galleggianti sono semplici pontoni di forma scatolare con poppa e prua leggermente sfinite, come mostrato in Figura 7-2. I moduli sono dotati di casse di zavorra sul fondo, sui fianchi e nelle zone di poppa e prua. Per maggiori dettagli si faccia riferimento a Rif. [3]. Le caratteristiche principali dei moduli, usate per le analisi dinamiche, sono riportate nella tabella seguente e sono state prese da Rif. [3].

Dato	Valore	Unità
L	155.200	m
B	36.000	m
D	8.700	m
T	6.000	m
GM_T	16.970	m
Δ	30615.5	t
LCG	77.600	m
TCG	0.000	m
VCG	4.370	m
I_{xx}	3.790E5	$t\,m^2$
I_{yy}	1.279E6	$t\,m^2$
I_{zz}	1.295E6	$t\,m^2$



Tabella 7-1 – Caratteristiche principali dei moduli

7.3 SISTEMA DI ORMEGGIO DEI MODULI

Ciascun modulo è ormeggiato al fondale tramite 8 catene identiche: due alle estremità (una a poppa e una a prua) e 6 laterali (3 a dritta e 3 a sinistra), come mostrato in Figura 7-2.

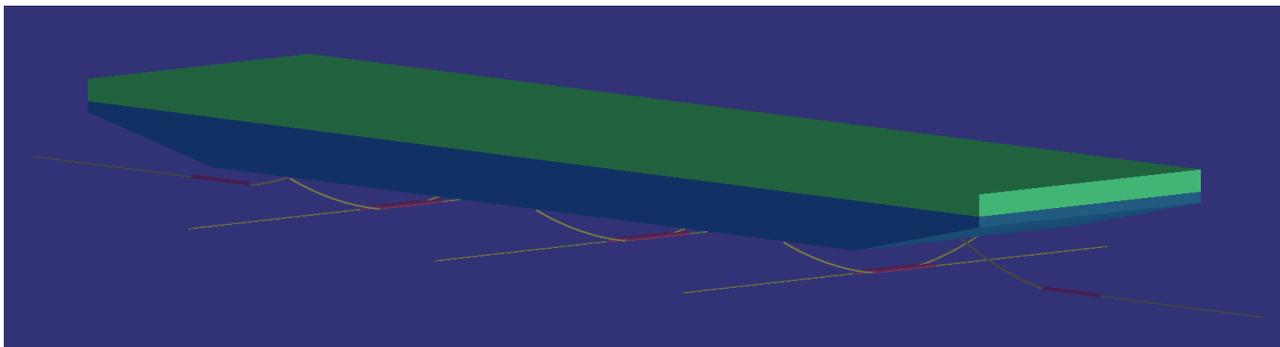


Figura 7-2 – Sistema di ormeggio dei moduli

La configurazione delle catene trasversali è tale per cui non interferiscono con eventuali navi ormeggiate, andando sotto la chiglia del modulo piuttosto che tradizionalmente verso l'esterno. Inoltre, la posizione dei "chain stopper" sul modulo e le ancore sul fondo sono tali per cui le linee non si sovrappongono tra di loro: vi è una lieve asimmetria tra le posizioni delle catene di dritta e di sinistra e anche tra quelle di poppa e prua.

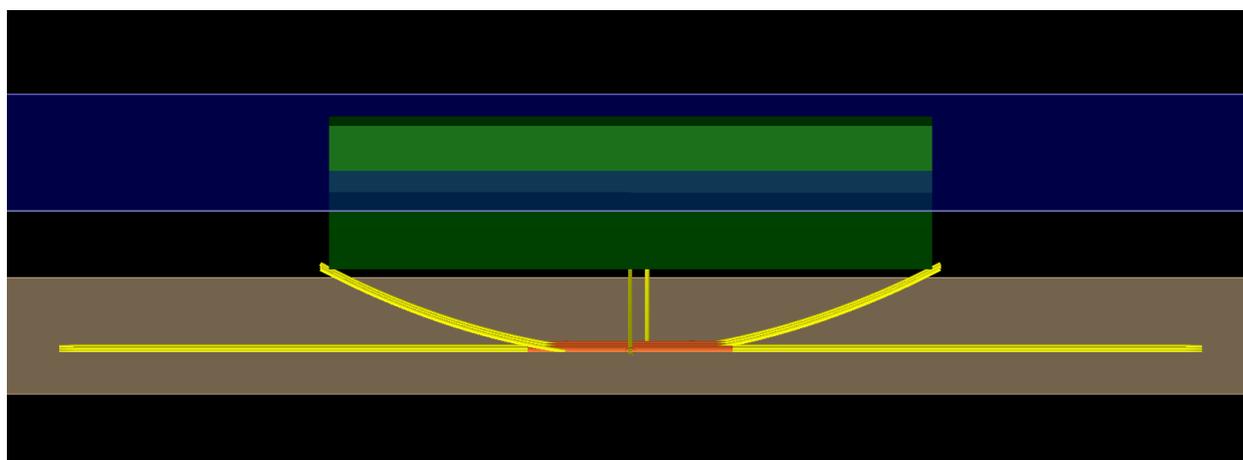


Figura 7-3 – Sistema di ormeggio dei moduli – Vista trasversale

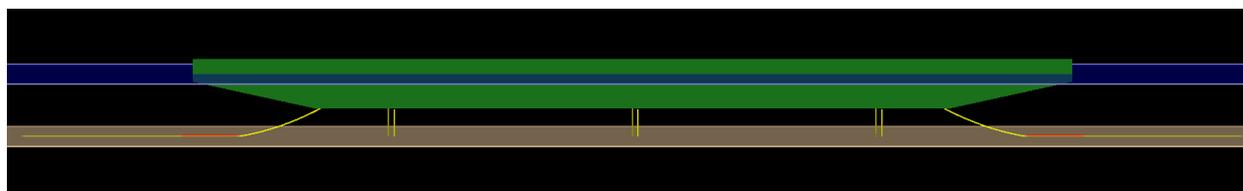


Figura 7-4 – Sistema di ormeggio dei moduli – Vista longitudinale

Per irrigidire il sistema, cioè aumentare le forze di richiamo in modo da limitare gli spostamenti del terminal sul piano, i primi 10 metri del tratto di catena appoggiato sul fondo (nella configurazione statica indisturbata



della catenaria) è appesantito mediante l'uso di corpi morti ("clump weights"). Il peso dei corpi morti lungo questo tratto di catena è stato assunto preliminarmente di 20 t/m.

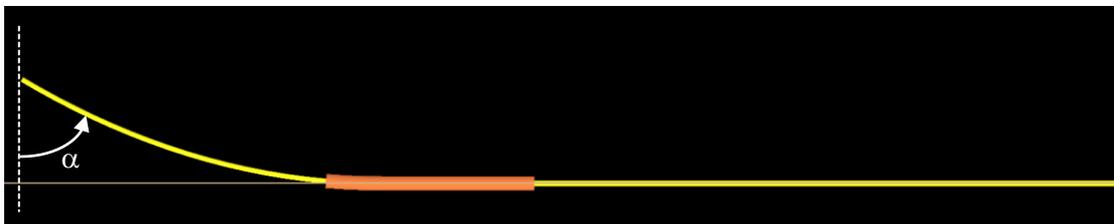


Figura 7-5 – Configurazione della catenaria di una linea di ormeggio dei moduli

Le caratteristiche della catena di ormeggio sono date in Tabella 7-2 (Rif. [18]).

Dato	Valore	Unità
Tipo	Studlink	-
Grado	R4	-
D	140	mm
L	53.5	m
Peso	429	kg/m
MBL	13565	kN
Pretensione	172.8	kN
α	61.7	deg

Tabella 7-2 – Caratteristiche delle catene di ormeggio dei moduli

7.4 SISTEMA DI CONNESSIONE TRA MODULI

I moduli sono connessi tra loro in modo da evitare movimenti relativi sul piano eccessivi che potrebbero comportare problemi operativi. La connessione è ottenuta mediante due cerniere, una a dritta e una a sinistra, tra la prua di un modulo e la poppa di quello successivo che permettono rotazioni relative attorno all'asse trasversale Y.

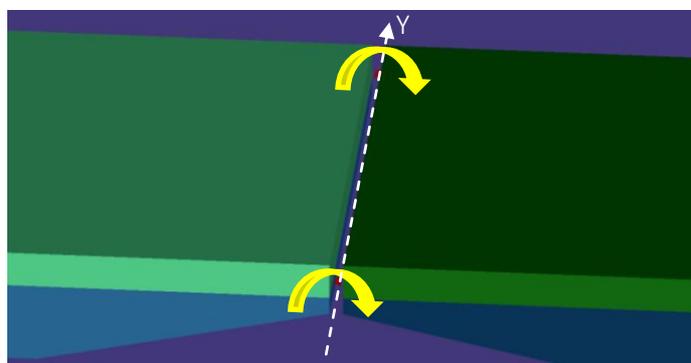


Figura 7-6 – Cerniere di connessione tra moduli



Per la simulazione il collegamento tra due pontoni adiacenti è stato simulato con una cerniera semplice della quale viene rappresentato il perno in Figura 7.7

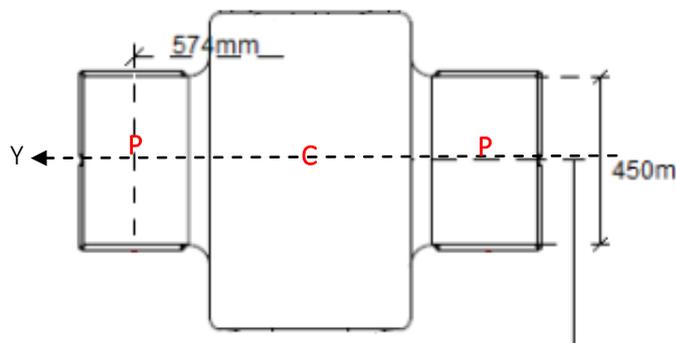


Figura 7-7 – Esempio dettaglio perno della cerniera di connessione tra moduli

Il carico radiale massimo ammissibile su ciascun cuscinetto (punto P) è 9772 kN.

7.5 NAVI DA CROCIERA

Il terminal è stato verificato, per comodità di calcolo in questa fase, con l'ormeggio contemporaneo di quattro navi da crociera da 120,000 t di stazza lorda.

Le caratteristiche principali delle navi sono riportate nella tabella seguente. I dati sono stati presi da database interni considerando navi di stazza e forme simili.

Dato	Valore	Unità
L_{OA}	290.000	m
L_{PP}	250.000	m
B	36.000	m
D	25.000	m
T	8.500	m
GM_T	2.000	m
Δ	53448.6	t
LCG	126.991	m
TCG	0.000	m
VCG	17.462	m
I_{xx}	7.697E6	$t \cdot m^2$
I_{yy}	2.619E8	$t \cdot m^2$
I_{zz}	2.619E8	$t \cdot m^2$



Tabella 7-3 – Caratteristiche principali delle navi da crociera

7.6 SISTEMA DI ORMEGGIO DELLE NAVI DA CROCIERA

7.6.1 Parabordi

I parabordi (o fender) saranno posizionati lungo entrambe le fiancate di ciascun modulo.

Il dimensionamento dei parabordi è effettuato in accordo con la metodologia PIANC (Rif. [13] e [20]). Il singolo parabordo è dimensionato calcolando l'urto massimo della nave durante l'accosto. In particolare, l'energia d'impatto è calcolata come:

$$E_{fender} = E_{nave} \cdot f$$

dove

$$f = C_e \cdot C_m \cdot C_s \cdot C_c$$

C_e : fattore di eccentricità

C_m : fattore di massa aggiunta

C_s : fattore di rigidezza

C_c : fattore di configurazione dell'accosto

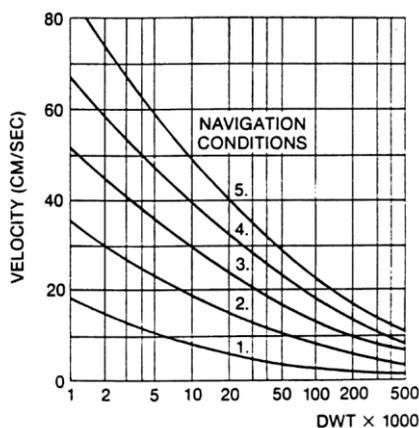
L'energia cinetica della nave durante l'accosto è calcolata come:

$$E_{nave} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot V^2$$

dove M è la massa della nave e V la velocità di accosto. Quindi:

$$E_{fender} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot V^2 \cdot C_e \cdot C_m \cdot C_s \cdot C_c$$

La massa di una nave da crociera da 120,000 GT con un'immersione di circa 8.5 m è stimata in 55,000 t. La velocità di accosto è ricavata dal grafico seguente (Rif. [13]), considerando che la portata lorda (DWT) di una nave da crociera da 120,000 GT è circa 55,000 t.



Navigation Conditions

1. Easy Docking; Sheltered
2. Difficult Docking; Sheltered
3. Easy Docking; Exposed
4. Good Docking; Exposed
5. Difficult Docking; Exposed



Figura 7-8 – Velocità di accosto in funzione della portata lorda

Si può assumere che la manovra di accosto al terminale in oggetto rientri nella seconda categoria di Figura 7-8 (manovra difficile in area protetta), tuttavia la velocità di accosto è presa pari a 0.2 m/s.

Dai calcoli risulta che l'energia di impatto durante l'accosto che deve essere assorbita dal fender è 1619 kN·m. Il parabordo selezionato è il fender pneumatico Yokohama 3300x4500 P80 (Rif. [21]), con le seguenti caratteristiche:

Dato	Valore	Unità
Dimensioni (D x L)	3300 x 4500	mm
Pressione interna iniziale	80	kPa
GEA	1673	kN·m
Compressione a GEA	60	%
Reazione massima a GEA	2491	kN

Tabella 7-4 – Caratteristiche principali dei parabordi

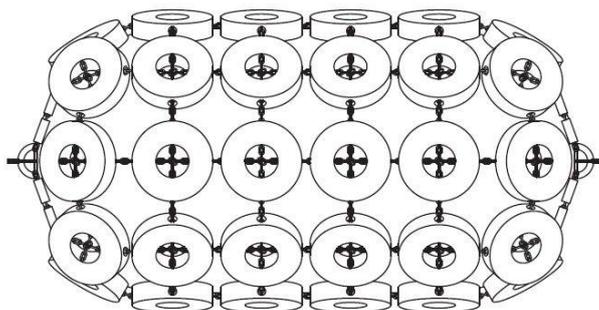


Figura 7-9 – Tipico parabordo Yokohama

Si sono ipotizzati 12 parabordi per ciascun modulo, 6 a sinistra e 6 a dritta distanziati longitudinalmente di circa 22 metri, per una capacità totale di spinta trasversale (per ogni modulo) di 1524 t.

7.6.2 Cavi

Il terminal è progettato per poter ormeggiare navi da crociera fino a circa 120,000 tonnellate di stazza lorda. Queste navi sono allestite con cavi di ormeggio sintetici (si veda Rif. [12]) da 68 mm di diametro con circa 85 t di carico di rottura (MBL).

7.6.3 Bitte

Le bitte dovranno essere doppie, capaci di ospitare due cavi in “configurazione a 8”, come mostrato nella figura seguente.

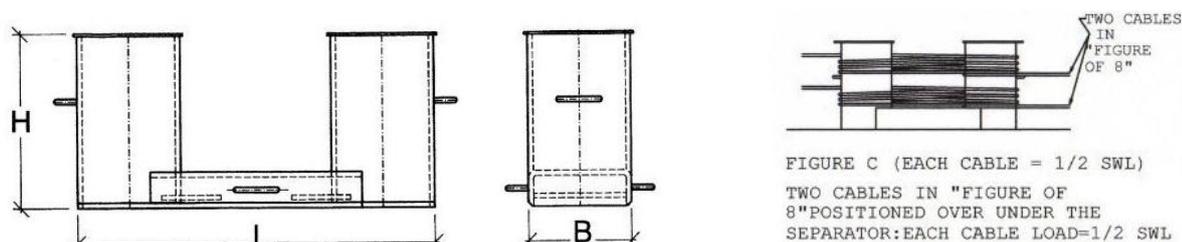


Figura 7-10 – Bitta doppia

In accordo con le normative internazionali (per esempio OCIMF, Rif. [12], e IMO, Rif. [7]), le bitte dovranno avere un massimo carico di esercizio (SWL) almeno pari a due volte il MBL dei cavi delle navi: $SWL=170$ t. Considerando, per esempio, le bitte fornite da Posidonia (approvate RINA, Rif. [16]), esse avranno le seguenti dimensioni: $L=2.180$ m, $B=0.610$ m, $H=1.000$ m (il significato di L, B e H è quello di Figura 7-10).

Sono state ipotizzate 32 bitte per ciascun modulo, 16 a dritta e 16 a sinistra.

7.6.4 Configurazione di ormeggio

Le navi da crociera sono ormeggiate come mostrato in Figura 7-11, con 16 cavi: 4 cavi alla lunga a poppa e 4 cavi alla lunga a prua, 2 traversini a poppa e 2 a prua, 2 “spring” a poppa e 2 a prua.

Per le navi ormeggiate all’estremità del terminal è previsto un punto di ormeggio aggiuntivo per i cavi alla lunga di prua, situato a 26 m dall’estremità prodiera dell’ultimo modulo. Tale punto di ormeggio potrà essere realizzato tramite una boa, e dovrà essere capace di sostenere una forza orizzontale di circa 350 t, in modo da potervi collegare 4 cavi.

Ciascuna nave poggia su 7 fender.

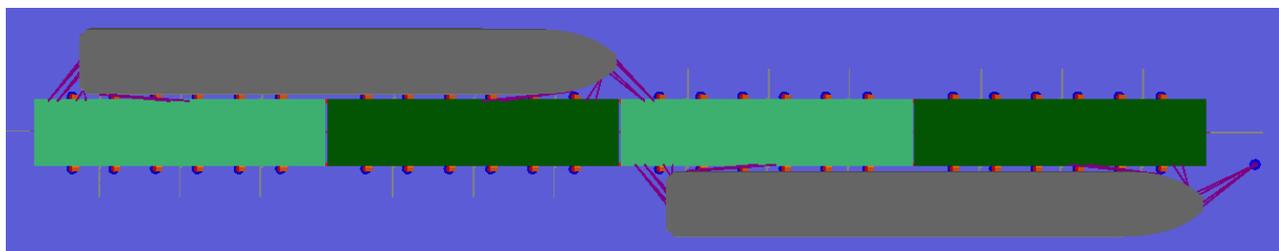


Figura 7-11 – Configurazione di ormeggio delle navi

È necessario sottolineare che il layout e dei cavi di ormeggio delle navi è preliminare, di conseguenza, la configurazione scelta non è frutto di una ottimizzazione che sarà fatta nel progetto definitivo.



8 DATI METEOMARINI

I dati meteo-marini usati per questa analisi sono quelli riportati nei documenti elaborati dal Consorzio Nuova Venezia per il progetto definitivo del Mose presentato al Comune di Venezia, (Rif. [1]) e sintetizzati nella tabella 8-1.

Periodo di ritorno (anni)	H_s (m)	V_w (m/s)	V_c (m/s)
10	1.9	25	1.6
1000	2.5	37	2.0

Tabella 8-1 – Dati meteo-marini

In particolare:

La velocità del vento riportata è la velocità massima, e in assenza di uno specifico riferimento è stata assunta, secondo una prassi internazionale, come la velocità della raffica dei 3 secondi per poter rappresentare l'azione del vento in forma spettrale, ovvero variabile nel tempo, per le simulazioni in tempo reale.

Come meglio specificato al paragrafo 9, i dati con periodo di ritorno di 10 anni sono usati per analizzare il sistema in condizioni "operative" (con navi ormeggiate), mentre quelli con periodo di ritorno di 1000 anni sono usati per analizzare il sistema in condizioni "estreme" (senza navi ormeggiate).

È doveroso sottolineare che le normative usate per i progetti nel settore offshore suggeriscono di usare periodi di ritorno di 100 anni per le condizioni estreme e generalmente si fa riferimento ai dati con periodo di ritorno di 1 anno per le condizioni operative. Tuttavia, in questa fase, in assenza di un rapporto meteo di progetto che sarà aggiornato secondo le tecniche recenti anche in funzione della presenza delle lunate alla bocca di porto, per il progetto definitivo, conservativamente, sono stati utilizzati quelli di Tabella 8-1.

La profondità del fondale è assunta pari a 11 metri.



9 METODOLOGIA DI CALCOLO

9.1 GENERALE

L'analisi dinamica del sistema è svolta attraverso simulazioni nel dominio del tempo ("dynamic" e "fully coupled", si veda paragrafo 11.1) della durata di 3 ore (convenzionalmente considerata rappresentativa di uno stato di mare) utilizzando il software DeepLines™ (paragrafo 10).

L'analisi è svolta in accordo con le metodologie suggerite dalle norme internazionali più significative per ciò che concerne le tecniche d'analisi del comportamento di corpi galleggianti e di sistemi di ormeggio:

- API RP-2SK (Rif. [4]);
- BV NR-493-DT-R02-E (Rif. [5]);
- DNV-OS-E301 (Rif. [10]);
- GL ND 0032/ND ([6]);
- ISO 19901-7:2013 (Rif. [8]).

9.2 SCENARI

Il comportamento del sistema è valutato per diversi scenari rappresentativi:

- 1) moduli senza navi ormeggiate in condizioni meteo-marine estreme;
- 2) moduli e navi ormeggiate in condizioni meteo-marine operative;
- 3) impatto della nave durante l'approccio in mare calmo.

9.2.1 Estremo

Lo scenario estremo è inteso come quello in cui il sistema è soggetto ai massimi carichi ambientali, solitamente con periodo di ritorno di 100 anni ma in questo caso di 1000 anni come spiegato al paragrafo 8. In questo scenario è verosimile assumere che non vi siano navi ormeggiate al terminale, in quanto la loro permanenza al terminale sarebbe interdetta.

In questo scenario, dunque, il sistema è analizzato con i soli moduli, sottoposto alle condizioni meteo-marine "estreme" di Tabella 9-1.

9.2.2 Operativo

Lo scenario operativo è quello in cui il sistema è soggetto ai massimi carichi ambientali per cui è possibile mantenere le navi ormeggiate. Di norma si considerano condizioni meteo-marine operative quelle con periodo di ritorno di 1 anno, ma in questo caso sono state assunte quelle dei 10 anni (si veda paragrafo 8).

Il terminale è pensato per poter ormeggiare massimo quattro navi da 120,000 GT, tuttavia, per semplificare l'analisi, lo studio è condotto in due passi:

- 1) due navi ormeggiate considerando tutte le condizioni meteo-marine "operative" di Tabella 9-2; le due navi analizzate sono "Nave sinistra 1" e "Nave dritta 1" di Figura 12-1;
- 2) quattro navi ormeggiate considerando le due condizioni meteo-marine "operative" più gravose, in termini di tensioni sulle catene di ormeggio e carichi sulle cerniere, risultate dal primo passo.



9.2.3 Impatto della nave durante l'approccio

L'ultimo scenario analizzato è quello dell'impatto della nave durante l'approccio. In questo caso si è assunto che non agiscano forzanti meteo-marine ma che la manovra sia tale per cui la nave impatta il parabordo più prodiero dell'ultimo modulo comprimendolo del 60% (compressione massima) in 1 secondo. Questa simulazione è condotta simulando l'impatto con una forza concentrata in corrispondenza del fender con l'evoluzione temporale di Figura 9-1.

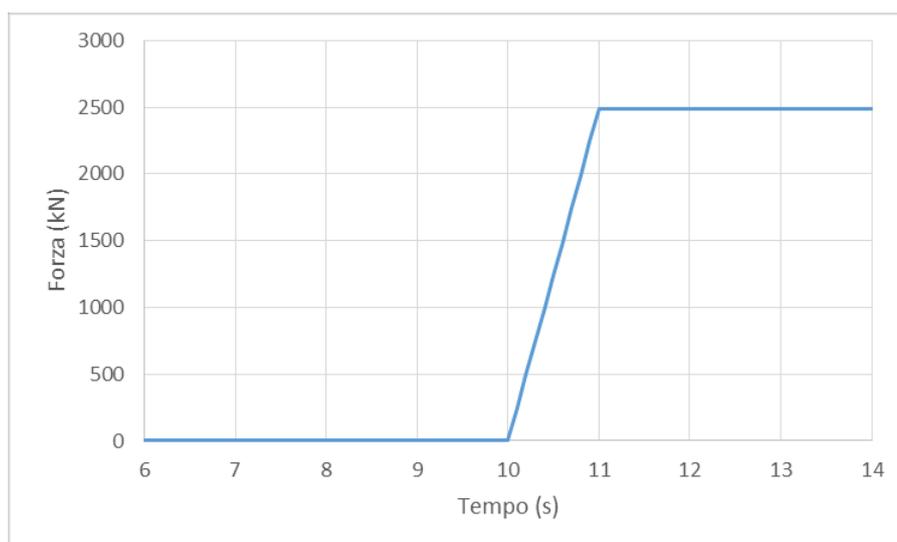


Figura 9-1 – Andamento della forza trasversale per simulare l'impatto della nave durante l'approccio

9.3 CASI METEO-MARINI

Considerando la configurazione del bacino in cui si situerebbe l'installazione, onda e corrente sono plausibilmente provenienti dal settore di "prua" (prua=180 deg, il sistema di riferimento utilizzato è mostrato nella figura sotto).

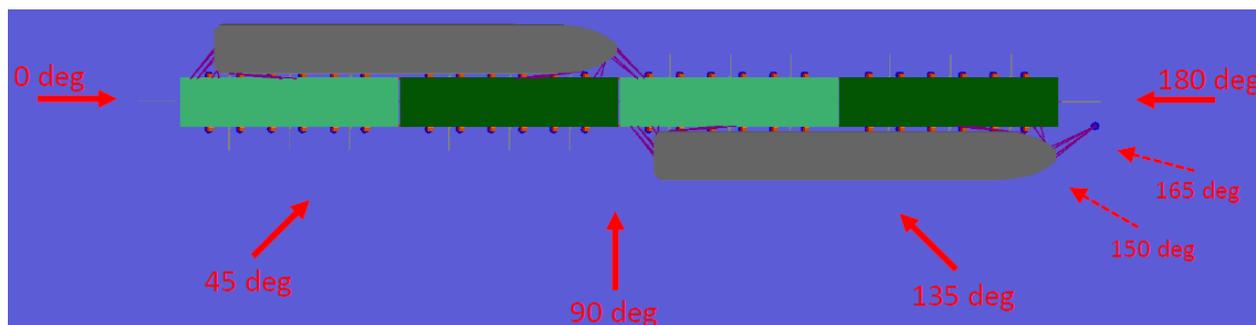


Figura 9-2 – Convenzione usata per le direzioni degli agenti meteo-marini

Il vento, invece, è conservativamente considerato proveniente da tutte le possibili direzioni. Tuttavia, sono considerate solo le direzioni da 0 deg a 180 deg; si può assumere, infatti, che i risultati per direzioni da 180 deg a 360 deg siano simili a quelli da 0 deg a 180 deg. Conservativamente, onda e corrente sono assunti collineari e con 3 possibili direzioni: da "prua" (180 deg), 15 deg rispetto alla prua (165 deg) e 30 deg rispetto



alla prua (150 deg). Per ciascuna di queste tre direzioni di onda e corrente sono considerate le seguenti direzioni di vento:

0 deg; 45 deg; 90 deg; 135 deg; 180 deg;

In aggiunta si è considerata anche la direzione collineare con onda e corrente per i casi non compresi nei precedenti.

Lo studio meteo-marino di riferimento (Rif. [1]) non specifica i periodi di picco delle onde. Questi sono stati quindi stimati considerando la relazione H_s-T_p di uno spettro Bretschneider (Rif. [9]) che corrisponde anche al centro dell'intervallo di applicabilità dello spettro JONSWAP secondo DNV (Rif. [11]).

In conclusione, sono analizzate 17 condizioni estreme e 17 operative. La velocità del vento riportata nelle tabelle seguenti è la velocità media oraria, calcolata da quella della raffica di paragrafo 8 in accordo con le formulazioni DNV per uno spettro NPD (Rif. [11]).

9.3.1 Condizioni estreme

Caso	Onda			Corrente		Vento	
	Dir. (deg)	H_s (m)	T_p (s)	Dir. (deg)	V_c (m/s)	Dir. (deg)	V_w (m/s)
C1	150	2.5	7.2	150	2.0	0	27
C2	150	2.5	7.2	150	2.0	45	27
C3	150	2.5	7.2	150	2.0	90	27
C4	150	2.5	7.2	150	2.0	135	27
C5	150	2.5	7.2	150	2.0	150	27
C6	150	2.5	7.2	150	2.0	180	27
C7	165	2.5	7.2	165	2.0	0	27
C8	165	2.5	7.2	165	2.0	45	27
C9	165	2.5	7.2	165	2.0	90	27
C10	165	2.5	7.2	165	2.0	135	27
C11	165	2.5	7.2	165	2.0	165	27
C12	165	2.5	7.2	165	2.0	180	27
C13	180	2.5	7.2	180	2.0	0	27
C14	180	2.5	7.2	180	2.0	45	27
C15	180	2.5	7.2	180	2.0	90	27
C16	180	2.5	7.2	180	2.0	135	27
C17	180	2.5	7.2	180	2.0	180	27

Tabella 9-1 – Casi meteomarini – condizioni estreme



9.3.2 Condizioni operative

Caso	Onda			Corrente		Vento	
	Dir. (deg)	H _s (m)	T _p (s)	Dir. (deg)	V _c (m/s)	Dir. (deg)	V _w (m/s)
C1	150	1.9	6.3	150	1.6	0	19
C2	150	1.9	6.3	150	1.6	45	19
C3	150	1.9	6.3	150	1.6	90	19
C4	150	1.9	6.3	150	1.6	135	19
C5	150	1.9	6.3	150	1.6	150	19
C6	150	1.9	6.3	150	1.6	180	19
C7	165	1.9	6.3	165	1.6	0	19
C8	165	1.9	6.3	165	1.6	45	19
C9	165	1.9	6.3	165	1.6	90	19
C10	165	1.9	6.3	165	1.6	135	19
C11	165	1.9	6.3	165	1.6	165	19
C12	165	1.9	6.3	165	1.6	180	19
C13	180	1.9	6.3	180	1.6	0	19
C14	180	1.9	6.3	180	1.6	45	19
C15	180	1.9	6.3	180	1.6	90	19
C16	180	1.9	6.3	180	1.6	135	19
C17	180	1.9	6.3	180	1.6	180	19

Tabella 9-2 – Casi meteomarinari – condizioni operative

9.4 CRITERI

I criteri per la verifica del sistema sono i seguenti:

Componente	MBL (kN)	FS	SWL (kN)	Rif.
Tensione catena	13565	1.67	8123	[4], [5], [8]
Carico radiale cerniere	-	-	9772	-
Carico parabordo	-	-	2491	[21]
Tensione cavo	834	2.0	417	[12]

Tabella 9-3 – Criteri



La valutazione del comportamento del sistema è svolta considerando parametri ulteriori rispetto a quelli riportati nella tabella precedente (per esempio i moti dei moduli). Tuttavia, per questi non vi sono indicazioni normative e quindi la valutazione può essere solo qualitativa e ingegneristicamente ponderata.

9.5 ANALISI DI SENSITIVITÀ SUI CORPI MORTI

Un'analisi di sensitività è svolta sui corpi morti posizionati sul tratto di catena inizialmente adagiato sul fondo.

Tale analisi è eseguita sul caso più critico tra tutti quelli estremi e operativi.

Il caso "base" prevede l'utilizzo di pesi di 20t/m lungo un tratto di catena di 10m. Viene studiato il comportamento del sistema per due ulteriori opzioni (S1 e S2):

Caso	Peso (t/m)	Lunghezza (m)
Base	20	10
S1	20	5
S2	10	20

Tabella 9-4 – Analisi di sensitività sui corpi morti

9.6 OUTPUT

Gli output dell'analisi per gli scenari estremo e operativo sono i seguenti:

- moti dei moduli nei sei gradi di libertà (X, Y, Z, RX, RY, RZ);
- beccheggio (RY) relativo tra moduli (rotazioni cerniere);
- accelerazioni dei moduli in corrispondenza dei 4 punti di Figura 9-3 (AX, AY, AZ);
- tensioni delle catene di ormeggio dei moduli;
- carichi sulle cerniere: longitudinali (Fx), trasversali (Fy), verticali (Fz) e radiali (Fr) sia in corrispondenza dei cuscinetti (P) sia del punto di connessione del braccio (C) (si veda Figura 7-7);
- moti delle navi nei sei gradi di libertà (solo per lo scenario operativo) (X, Y, Z, RX, RY, RZ);
- tensioni sui cavi di ormeggio delle navi (solo per lo scenario operativo);
- carichi sui fender (solo per lo scenario operativo).

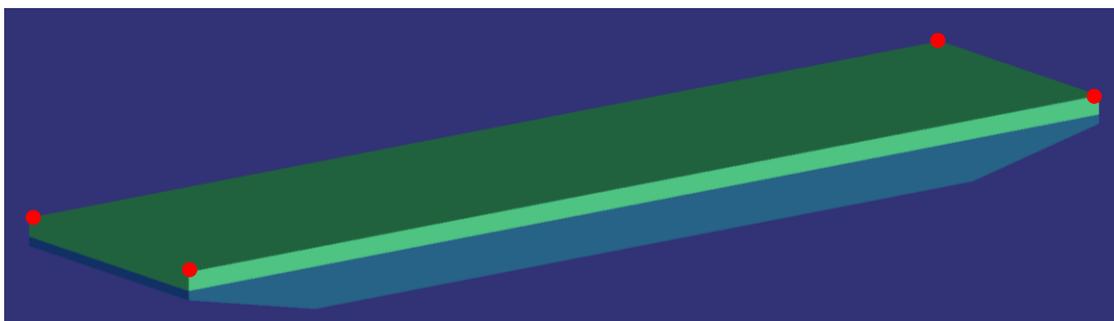


Figura 9-3 – Punti di valutazione delle accelerazioni sui moduli



Per ciascun output sono riportati due valori significativi: il massimo assoluto durante la simulazione (Max) e il massimo previsto in uno stato di mare di 3 ore (MPM) calcolato in accordo con una distribuzione di probabilità opportuna. In particolare, per segnali tipicamente Gaussiani come i moti e le accelerazioni, si è applicata una distribuzione Rayleigh mentre per segnali asimmetrici e non gaussiani (tensioni, carichi sui parabordi, ecc.) una distribuzione Weibull. Nel caso della verifica all’impatto della nave durante l’approccio sono riportati solo i valori massimi poiché è privo di significato calcolare statistiche per processi non ergodici.

I massimi valori dei moti X, Y e Z sono dati rispetto alla posizione iniziale di equilibrio.

Gli output dell’analisi di sensitività (paragrafo 9.5) sono quelli riportati sopra con l’aggiunta di:

- angolo massimo e minimo verticale della catena al “chain stopper” (Figura 7-5);
- tensione massima orizzontale all’ancora.



10 SOFTWARE

L'attività è svolta utilizzando il software DeepLines™ sviluppato da Principia SAS (per maggiori informazioni si visiti il sito www.principia.fr).

DeepLines™ è un software a elementi di superficie finiti 2D non lineare per l'analisi di installazione e il progetto di una vasta gamma di strutture offshore come riser rigidi e flessibili, ombelicali, condotte sottomarine, linee di ormeggio ecc. soggetti ad agenti meteomarinari e moti di corpi galleggianti.

L'azione idrodinamica sui flessibili è calcolata attraverso l'equazione di Morison mentre le proprietà idrodinamiche di galleggianti come navi, mezzi di trivellazione, posatubi, chiatte, ecc., sono importate da database esterni generati da software come Diodore™.

DeepLines™ può eseguire diverse tipologie di analisi: statica e quasi-statica, dinamica nel dominio della frequenza e del tempo, modale, accoppiamento completo tra galleggiante e flessibili, analisi a fatica di qualsiasi tipo di flessibile, ecc.



11 MODELLAZIONE DEL SISTEMA

11.1 GENERALE

Il sistema composto dai moduli ormeggiati al fondale con catene e le navi ormeggiate ai moduli tramite cavi e fender è modellato usando approcci detti “dynamic” e “fully coupled”.

Il primo termine indica il fatto che le linee di ormeggio dei moduli sono modellate attraverso linee ad elementi finiti; il software dunque include effetti inerziali, idrodinamici e di attrito sul fondo delle catene di ormeggio. Con il secondo termine si specifica che le equazioni del moto dei galleggianti sono risolte includendo tutte le forzanti esterne: gli agenti meteomarinari e gli elementi di connessione tra corpi (in questo caso linee di ormeggio, fender e cerniere). Dunque, per i moti nel dominio delle frequenze d’onda non si è fatto uso dei RAO.

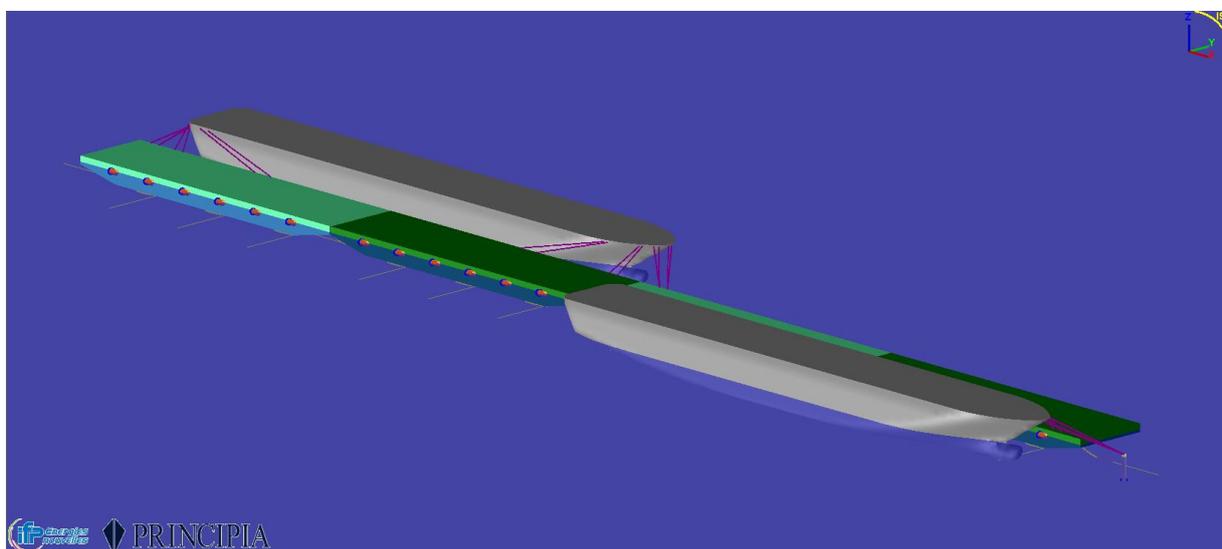


Figura 11-1 – Screenshot del modello DeepLines™

11.2 CORPI GALLEGGIANTI

11.2.1 Forze idrostatiche

Le forze idrostatiche sono calcolate usando un approccio lineare, attraverso matrici di richiamo. Tale metodologia è considerata applicabile in quanto i moti verticali (sussulto, rollio e beccheggio) dei corpi sono assai limitati e le variazioni dell’opera viva (il volume immerso dello scafo) trascurabili.

11.2.2 Forze idrodinamiche

Le forze idrodinamiche, cioè quelle d’onda, sono calcolate attraverso i dati contenuti nei database idrodinamici calcolati da Principia con la teoria potenziale (Rif. [2]), contenenti:

- le funzioni di trasferimento lineari e quadratiche delle forzanti d’onda;
- i coefficienti di massa aggiunta e smorzamento di radiazione.



Le forze idrodinamiche possono essere suddivise in tre categorie principali: forze dovute alle onde incidenti, forze dovute alle onde diffratte e forze di radiazione. Le prime due, causate dalle onde del mare, sono calcolate usando le funzioni di trasferimento lineari e quadratiche. Le ultime, forze di reazione del fluido sul corpo per effetto dei moti dello stesso, facendo uso del metodo della convoluzione attraverso i coefficienti di massa aggiunta e di smorzamento di radiazione (per maggiori dettagli si può fare riferimento a Rif. [15]).

È fondamentale evidenziare che l'analisi idrodinamica è stata svolta tenendo in considerazione due importanti aspetti:

- 1) accoppiamenti idrodinamici tra i moduli;
- 2) effetti di basso fondale.

Il primo aspetto è importante poiché è intuibile come vi sia una influenza del campo fluido attorno ad un modulo per effetto della presenza di quelli adiacenti, soprattutto per onde nella direzione dell'asse longitudinale dei moduli (la situazione attuale, si veda paragrafo 9.3).

Il secondo è essenziale in quanto in bassi fondali vi è una netta variazione della cinematica del fluido rispetto a quella in alti fondali e, nel caso in esame, l'interazione idrodinamica tra il corpo immerso e il fondale è considerevole (basso rapporto tra altezza del fondale e immersione). In questi casi le forze d'onda del secondo ordine devono essere calcolate usando il cosiddetto metodo "full QTF" e non è possibile semplificare il calcolo attraverso l'approssimazione di Newman (Rif. [15]) valida in alti fondali.

11.2.3 Forze del vento e della corrente

Le forze del vento e della corrente (tipicamente forze di drag) sono calcolate usando coefficienti polari.

I coefficienti del vento delle navi da crociera sono estratti dalla recente pubblicazione di Rice e Seelig (Rif. [19]) che fornisce dati per navi di forme moderne. Quelli della corrente dal MEG3 dell'OCIMF (Rif. [12]) che presenta coefficienti per navi gasiere e petroliere in bassi fondali (per bassi rapporti profondità/immersione le forze della corrente aumentano considerevolmente). È vero che le forme delle carene delle navi da crociera sono differenti da quelle di navi gasiere o petroliere ma in questa fase del progetto, in assenza di dati più precisi, questi coefficienti sono considerati sufficientemente indicativi e generalmente conservativi.

Per i moduli si sono impiegati i coefficienti del vento per strutture di forme scatolari forniti dal Blendermann (Rif. [14]), mentre i coefficienti della corrente sono stimati sulla base della geometria della struttura e corretti per tenere in considerazione gli effetti di basso fondale utilizzando i rapporti alto fondale/basso fondale dei coefficienti dell'OCIMF.

Le forze del vento e della corrente sono ricavate dai coefficienti attraverso le superfici (trasversale e laterale) esposte al flusso. Quelle relative alla corrente sono semplicemente ricavate dalla lunghezza del galleggiante e l'immersione mentre quelle del vento sono stimate come riportato nella tabella seguente.

Galleggiante	A_T	A_L
Modulo	322	1544
Nave da crociera	1550	10538



Tabella 11-1 – Superfici esposte al vento

11.2.4 Smorzamento del moto di rollio

Lo smorzamento del moto di rollio dei moduli e delle navi è calcolato usando la formulazione proposta da Molin (Rif. [15]) e opportuni coefficienti di drag, stimati sulla base di coefficienti di smorzamento di carene di forme simili a quelle in esame e calibrati con prove in vasca.

11.2.5 Smorzamento dei moti a bassa frequenza

Gli smorzamenti dei moti a bassa frequenza di un corpo galleggiante sono dovuti a diversi fattori come:

- le forze di drag (viscose) agenti sulla carena;
- lo smorzamento delle forze ondose del secondo ordine (“wave drift damping”);
- l’attrito delle linee di ormeggio sul fondale;
- le forze viscose agenti sulle linee di ormeggio.

Tutte le forze di smorzamento dovute alle cause sopra elencate sono automaticamente calcolate da DeepLines™: le forze di drag utilizzando le velocità relative corpo-flusso nel calcolo delle forze di vento e corrente; le seconde usando le formulazioni di Aranha (Rif. [17]); le ultime due attraverso la modellazione ad elementi finiti delle catene di ormeggio che permette di includere l’effetto dell’attrito sul fondale e le forze di drag sulle linee attraverso l’equazione di Morsion (paragrafo 11.3).

11.3 LINEE DI ORMEGGIO DEI MODULI

Le catene di ancoraggio dei moduli sono modellate con linee ad elementi finiti con nodi a passi di 1 metro. Questo tipo di modellazione consente di includere nel calcolo la dinamica delle linee, comprendendo effetti inerziali, spinta idrostatica, attrito sul fondale marino e forze idrodinamiche, queste ultime calcolate attraverso l’equazione di Morsion (Rif. [17]).

11.4 CERNIERE

Le cerniere sono modellate tramite linee ad elementi finiti con elevata rigidità assiale. Non sono tenute in considerazione eventuali forze di attrito.

11.5 PARABORDI

I parabordi sono modellati con molle direzionali (solo compressione) multilineari, con legge compressione-forza in accordo con quanto specificato in paragrafo 7.6.1 e Rif. [21].

11.6 CAVI DI ORMEGGIO DELLE NAVI

I cavi di ormeggio delle navi da crociera sono modellati usando molle direzionali (solo tensione) con rigidità in accordo con quanto suggerito dall’OCIMF (Rif. [12]) per cavi sintetici ad alta resistenza.

11.7 AGENTI METEOMARINI

11.7.1 Onde

Le onde sono modellate come irregolari con suddivisione dell’energia in frequenza in accordo con lo spettro JONSWAP (Rif. [11]) con tipico parametro di picco $\gamma=3.3$.

Lo spettro è rappresentato in 200 frequenze.



11.7.2 Vento

Il vento è modellato con velocità variabile nel tempo in accordo con lo spettro NPD, suggerito dal DNV per il Mare del Nord (Rif. [11]) e quindi sicuramente conservativo per l'alto Adriatico.

Lo spettro è rappresentato in 100 frequenze.

La direzione del vento è assunta costante per la durata della simulazione.

11.7.3 Corrente

La corrente è modellata come costante nel tempo sia in direzione sia in intensità.

In assenza di dati più precisi, il profilo verticale di velocità è preso in accordo con quanto suggerito dal DNV (Rif. [11]).



12 RISULTATI

Considerato l'elevatissimo numero di output, sono riportati solo quelli più significativi. Per esempio non sono riportate le tensioni su tutte le catene di ormeggio ma solo quelle massime tra tutte e 6 le catene di un modulo.

Inoltre, in questo paragrafo sono riportati solo i risultati massimi tra tutte i casi meteomarini analizzati. I risultati più dettagliati sono dati in Appendice.

I galleggianti sono identificati come segue.

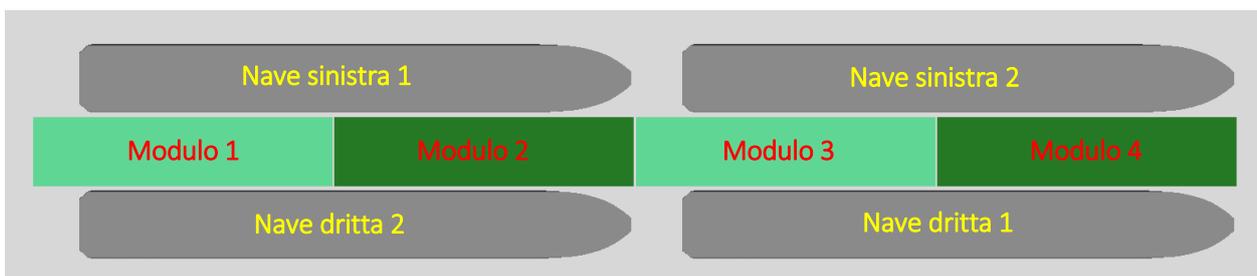


Figura 12-1 – Identificazione dei galleggianti



12.1 CONDIZIONI ESTREME

Moto	Modulo 1		Modulo 2		Modulo 3		Modulo 4		Massimi	
	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM
X (m)	0.240	0.157	0.240	0.157	0.240	0.157	0.240	0.156	0.240	0.157
Y (m)	0.161	0.165	0.103	0.091	0.146	0.104	0.265	0.183	0.265	0.183
Z (m)	0.035	0.037	0.049	0.050	0.054	0.062	0.151	0.148	0.151	0.148
RX (deg)	0.652	0.666	0.652	0.666	0.652	0.666	0.652	0.666	0.652	0.666
RY (deg)	0.076	0.084	0.067	0.073	0.093	0.096	0.212	0.216	0.212	0.216
RZ (deg)	0.057	0.057	0.046	0.046	0.045	0.042	0.046	0.047	0.057	0.057

Tabella 12-1 – Moti dei moduli in condizioni estreme

Rotazione	Mod. 1 - Mod. 2		Mod. 2 - Mod. 3		Mod. 3 - Mod. 4		Massimi	
	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM
RY (deg)	0.136	0.150	0.155	0.158	0.293	0.303	0.293	0.303

Tabella 12-2 – Rotazioni relative tra moduli in condizioni estreme

Accelerazione	Modulo 1		Modulo 2		Modulo 3		Modulo 4		Massimi	
	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM
AX (m/s ²)	0.081	0.063	0.078	0.061	0.073	0.059	0.073	0.060	0.081	0.063
AY (m/s ²)	0.210	0.176	0.112	0.086	0.155	0.105	0.268	0.191	0.268	0.191
AZ (m/s ²)	0.133	0.119	0.119	0.116	0.154	0.140	0.335	0.316	0.335	0.316

Tabella 12-3 – Accelerazioni sui moduli in condizioni estreme

Tensione	Modulo 1		Modulo 2		Modulo 3		Modulo 4		Massimi	
	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM
T (kN)	3229	3104	2222	2489	2657	2535	4303	4149	4303	4149

Tabella 12-4 – Tensioni delle catene dei moduli in condizioni estreme



Forza	Mod. 1 - Mod. 2		Mod. 2 - Mod. 3		Mod. 3 - Mod. 4		Massimi	
	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM
Fx (kN)	4752	4033	7368	6131	5305	4616	7368	6131
Fy (kN)	569	545	566	544	600	613	600	613
Fz (kN)	1239	1209	1488	1518	1976	1882	1976	1882
Fr (kN)	4753	4272	7375	6382	5318	4706	7375	6382

Tabella 12-5 – Forze sulle cerniere in condizioni estreme – Punto P

La seguente tabella riporta i risultati della verifica dei criteri di Tabella 9-3. La verifica è effettuata calcolando il fattore di utilizzo (UF), cioè il rapporto tra il valore massimo ottenuto e il valore ammissibile.

Componente	UF
Tensione catena	0.53
Carico radiale cerniere	0.75

Tabella 12-6 – Verifica dei criteri in condizioni estreme



12.2 CONDIZIONI OPERATIVE

12.2.1 Due navi ormeggiate

Moto	Modulo 1		Modulo 2		Modulo 3		Modulo 4		Massimi	
	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM
X (m)	0.163	0.137	0.163	0.137	0.163	0.137	0.162	0.136	0.163	0.137
Y (m)	0.114	0.106	0.085	0.073	0.101	0.086	0.126	0.117	0.126	0.117
Z (m)	0.016	0.015	0.026	0.025	0.035	0.033	0.088	0.084	0.088	0.084
RX (deg)	0.477	0.465	0.477	0.466	0.477	0.467	0.478	0.468	0.478	0.468
RY (deg)	0.067	0.065	0.048	0.050	0.059	0.063	0.107	0.115	0.107	0.115
RZ (deg)	0.032	0.033	0.029	0.029	0.028	0.029	0.035	0.032	0.035	0.033

Tabella 12-7 – Moti dei moduli in condizioni operative con 2 navi

Rotazione	Mod. 1 - Mod. 2		Mod. 2 - Mod. 3		Mod. 3 - Mod. 4		Massimi	
	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM
RY (deg)	0.110	0.111	0.103	0.108	0.162	0.175	0.162	0.175

Tabella 12-8 – Rotazioni relative tra moduli in condizioni operative con 2 navi

Accelerazione	Modulo 1		Modulo 2		Modulo 3		Modulo 4		Massimi	
	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM
AX (m/s ²)	0.042	0.040	0.040	0.038	0.041	0.037	0.042	0.036	0.042	0.040
AY (m/s ²)	0.155	0.119	0.104	0.079	0.108	0.094	0.151	0.138	0.155	0.138
AZ (m/s ²)	0.124	0.114	0.127	0.112	0.125	0.122	0.244	0.247	0.244	0.247

Tabella 12-9 – Accelerazioni sui moduli in condizioni operative con 2 navi

Tensione	Modulo 1		Modulo 2		Modulo 3		Modulo 4		Massimi	
	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM
T (kN)	2776	2660	2132	1987	2167	2078	2953	3015	2953	3015

Tabella 12-10 – Tensioni delle catene dei moduli in condizioni operative con 2 navi



Forza	Mod. 1 - Mod. 2		Mod. 2 - Mod. 3		Mod. 3 - Mod. 4		Massimi	
	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM
Fx (kN)	3724	3946	3695	3817	2904	2775	3724	3946
Fy (kN)	382	356	436	419	414	368	436	419
Fz (kN)	881	828	1121	1114	1282	1260	1282	1260
Fr (kN)	3726	3945	3705	3918	2921	3006	3726	3945

Tabella 12-11 – Forze sulle cerniere in condizioni operative con 2 navi – Punto P

Moto	Nave sinistra 1		Nave dritta 1		Massimi	
	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM
X (m)	1.334	1.246	1.000	1.018	1.334	1.246
Y (m)	1.116	0.914	0.451	0.441	1.116	0.914
Z (m)	0.028	0.030	0.028	0.028	0.028	0.030
RX (deg)	2.794	2.704	2.132	1.935	2.794	2.704
RY (deg)	0.060	0.062	0.056	0.059	0.060	0.062
RZ (deg)	0.514	0.508	0.612	0.581	0.612	0.581

Tabella 12-12 – Moti delle navi in condizioni operative con 2 navi

Tensione	Nave sinistra 1		Nave dritta 1		Massimi	
	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM
T (kN)	643	629	319	324	643	629

Tabella 12-13 – Tensioni dei cavi delle navi in condizioni operative con 2 navi

Forza	Nave sinistra 1		Nave dritta 1		Massimi	
	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM
F (kN)	151	331	1748	1714	1748	1714

Tabella 12-14 – Forze sui fender in condizioni operative con 2 navi



La seguente tabella riporta i risultati della verifica dei criteri di Tabella 9-3. La verifica è effettuata calcolando il fattore di utilizzo (UF), cioè il rapporto tra il valore massimo ottenuto e il valore ammissibile.

Componente	UF
Tensione catena	0.37
Carico radiale cerniere	0.40
Tensione cavo	1.54
Carico parabordo	0.70

Tabella 12-15 – Verifica dei criteri in condizioni operative con 2 navi



12.2.2 Quattro navi ormeggiate

I casi meteomarini più gravosi nel caso di 2 navi ormeggiate, in termini di forze radiali sulle cerniere e tensioni nelle catene di ormeggio, sono i casi C2 e C4 (si veda Appendice e Tabella 9-2).

Per questi due casi sono state svolte simulazioni anche con quattro navi ormeggiate e i risultati sono riportati nelle seguenti tabelle.

Moto	Modulo 1		Modulo 2		Modulo 3		Modulo 4		Massimi	
	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM
X (m)	0.160	0.177	0.160	0.177	0.160	0.177	0.159	0.176	0.160	0.177
Y (m)	0.135	0.109	0.081	0.072	0.077	0.072	0.119	0.112	0.135	0.112
Z (m)	0.019	0.016	0.026	0.025	0.036	0.033	0.065	0.074	0.065	0.074
RX (deg)	0.588	0.548	0.587	0.548	0.586	0.547	0.585	0.548	0.588	0.548
RY (deg)	0.075	0.071	0.064	0.064	0.072	0.075	0.121	0.131	0.121	0.131
RZ (deg)	0.031	0.031	0.025	0.026	0.023	0.025	0.030	0.032	0.031	0.032

Tabella 12-16 – Moti dei moduli in condizioni operative con 4 navi

Rotazione	Mod. 1 – Mod. 2		Mod. 2 – Mod. 3		Mod. 3 – Mod. 4		Massimi	
	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM
RY (deg)	0.138	0.132	0.127	0.132	0.190	0.203	0.190	0.203

Tabella 12-17 – Rotazioni relative tra moduli in condizioni operative con 4 navi

Accelerazione	Modulo 1		Modulo 2		Modulo 3		Modulo 4		Massimi	
	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM
AX (m/s ²)	0.038	0.035	0.037	0.035	0.037	0.033	0.037	0.033	0.038	0.035
AY (m/s ²)	0.134	0.116	0.051	0.057	0.073	0.067	0.149	0.139	0.149	0.139
AZ (m/s ²)	0.071	0.061	0.073	0.062	0.089	0.096	0.199	0.213	0.199	0.213

Tabella 12-18 – Accelerazioni sui moduli in condizioni operative con 4 navi

Tensione	Modulo 1		Modulo 2		Modulo 3		Modulo 4		Massimi	
	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM
T (kN)	3505	3285	2409	2270	2419	2342	3331	3263	3505	3285

Tabella 12-19 – Tensioni delle catene dei moduli in condizioni operative con 4 navi



Forza	Mod. 1 – Mod. 2		Mod. 2 – Mod. 3		Mod. 3 – Mod. 4		Massimi	
	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM
Fx (kN)	3096	3051	4012	3633	2831	2633	4012	3633
Fy (kN)	427	410	629	562	340	327	629	562
Fz (kN)	895	779	1275	1150	1172	1145	1275	1150
Fr (kN)	3118	3190	4028	3695	2970	2696	4028	3695

Tabella 12-20 – Forze sulle cerniere in condizioni operative con 4 navi – Punto P

Moto	Nave sinistra 1		Nave dritta 1		Nave sinistra 2		Nave dritta 2		Massimi	
	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM
X (m)	1.167	1.117	0.962	1.004	1.027	0.829	1.028	1.108	1.167	1.117
Y (m)	1.078	0.867	0.420	0.366	1.073	0.911	0.417	0.368	1.078	0.911
Z (m)	0.028	0.030	0.028	0.028	0.028	0.030	0.026	0.028	0.028	0.030
RX (deg)	2.745	2.639	2.065	1.811	2.731	2.616	1.886	1.804	2.745	2.639
RY (deg)	0.057	0.062	0.053	0.055	0.057	0.064	0.051	0.055	0.057	0.064
RZ (deg)	0.482	0.485	0.601	0.584	0.480	0.444	0.570	0.580	0.601	0.584

Tabella 12-21 – Moti delle navi in condizioni operative con 4 navi

Tensione	Nave sinistra 1		Nave dritta 1		Nave sinistra 2		Nave dritta 2		Massimi	
	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM
T (kN)	642	627	308	307	704	673	319	346	704	673

Tabella 12-22 – Tensioni dei cavi delle navi in condizioni operative con 4 navi

Forza	Nave sinistra 1		Nave dritta 1		Nave sinistra 2		Nave dritta 2		Massimi	
	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM	Max	MPM
F (kN)	0	258	1721	1696	0	440	1766	1686	1766	1696

Tabella 12-23 – Forze sui fender in condizioni operative con 4 navi



La seguente tabella riporta i risultati della verifica dei criteri di Tabella 9-3. La verifica è effettuata calcolando il fattore di utilizzo (UF), cioè il rapporto tra il valore massimo ottenuto e il valore ammissibile.

Componente	UF
Tensione catena	0.43
Carico radiale cerniere	0.41
Tensione cavo	1.69
Carico parabordo	0.71

Tabella 12-24 – Verifica dei criteri in condizioni operative con 4 navi



12.3 IMPATTO DELLA NAVE DURANTE L'APPROCCIO

Moto	Modulo 1	Modulo 2	Modulo 3	Modulo 4	Massimi
	Max	Max	Max	Max	Max
X (m)	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Y (m)	0.054	0.039	0.061	0.122	0.122
Z (m)	0.004	0.001	0.003	0.014	0.014
RX (deg)	0.193	0.193	0.195	0.196	0.196
RY (deg)	0.003	0.001	0.004	0.009	0.009
RZ (deg)	0.037	0.033	0.034	0.044	0.044

Tabella 12-25 – Moti dei moduli dovuti all'impatto della nave durante l'approccio

Rotazione	Mod. 1 - Mod. 2	Mod. 2 - Mod. 3	Mod. 3 - Mod. 4	Massimi
	Max	Max	Max	Max
RY (deg)	0.002	0.005	0.006	0.006

Tabella 12-26 – Rotazioni relative tra moduli dovute all'impatto della nave durante l'approccio

Accelerazione	Modulo 1	Modulo 2	Modulo 3	Modulo 4	Massimi
	Max	Max	Max	Max	Max
AX (m/s ²)	0.015	0.007	0.009	0.014	0.015
AY (m/s ²)	0.106	0.049	0.065	0.119	0.119
AZ (m/s ²)	0.019	0.018	0.018	0.021	0.021

Tabella 12-27 – Accelerazioni sui moduli dovute all'impatto della nave durante l'approccio

Tensione	Modulo 1	Modulo 2	Modulo 3	Modulo 4	Massimi
	Max	Max	Max	Max	Max
T (kN)	758	307	631	1612	1612

Tabella 12-28 – Tensioni delle catene dei moduli dovute all'impatto della nave durante l'approccio



Forza	Mod. 1 - Mod. 2	Mod. 2 - Mod. 3	Mod. 3 - Mod. 4	Massimi
	Max	Max	Max	Max
Fx (kN)	2309	4228	3614	4228
Fy (kN)	319	246	267	319
Fz (kN)	411	554	502	554
Fr (kN)	2309	4231	3624	4231

Tabella 12-29 – Forze sulle cerniere dovute all’impatto della nave durante l’approccio – Punto P

La seguente tabella riporta i risultati della verifica dei criteri di Tabella 9-3. La verifica è effettuata calcolando il fattore di utilizzo (UF), cioè il rapporto tra il valore massimo ottenuto e il valore ammissibile.

Componente	UF
Tensione catena	0.20
Carico radiale cerniere	0.43

Tabella 12-30 – Verifica dei criteri nel caso di impatto della nave durante l’approccio

Lo spostamento trasversale in corrispondenza del parabordo (ultimo avanti a dritta del Modulo 4) è mostrato nel grafico sotto.

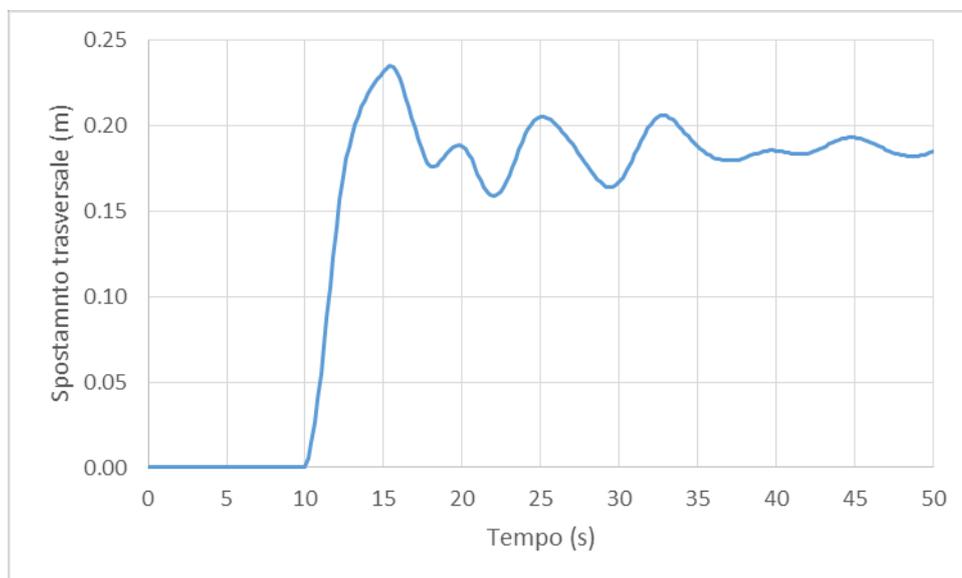


Figura 12-2 – Andamento dello spostamento trasversale durante l’impatto della nave

Il massimo spostamento è pari a 0.235 m.



12.4 RIEPILOGO DEI RISULTATI

Nelle tabelle seguenti sono riportati i massimi ottenuti nei diversi scenari e i massimi assoluti.

Scenario →	Estremo	Oper. 2 navi	Oper. 4 navi	Impatto	Massimi
Moto					
X (m)	0.240	0.163	0.177	0.001	0.240
Y (m)	0.265	0.126	0.135	0.122	0.265
Z (m)	0.151	0.088	0.074	0.014	0.151
RX (deg)	0.666	0.478	0.588	0.196	0.666
RY (deg)	0.216	0.115	0.131	0.009	0.216
RZ (deg)	0.057	0.035	0.032	0.044	0.057

Tabella 12-31 – Moti dei moduli – Riepilogo

Scenario →	Estremo	Oper. 2 navi	Oper. 4 navi	Impatto	Massimi
Rotazione					
RY (deg)	0.303	0.175	0.203	0.006	0.303

Tabella 12-32 – Rotazioni relative tra moduli – Riepilogo

Scenario →	Estremo	Oper. 2 navi	Oper. 4 navi	Impatto	Massimi
Accelerazione					
AX (m/s ²)	0.081	0.042	0.038	0.015	0.081
AY (m/s ²)	0.268	0.155	0.149	0.119	0.268
AZ (m/s ²)	0.335	0.247	0.213	0.021	0.335

Tabella 12-33 – Accelerazioni sui moduli – Riepilogo

Scenario →	Estremo	Oper. 2 navi	Oper. 4 navi	Impatto	Massimi
Tensione					
T (kN)	4303	3015	3505	1612	4303

Tabella 12-34 – Tensioni delle catene dei moduli – Riepilogo



Scenario →	Estremo	Oper. 2 navi	Oper. 4 navi	Impatto	Massimi
Forza					
Fx (kN)	7368	3946	4012	4228	7368
Fy (kN)	613	436	629	319	629
Fz (kN)	1976	1282	1275	554	1976
Fr (kN)	7375	3945	4028	4231	7375

Tabella 12-35 – Forze sulle cerniere – Punto P – Riepilogo

Scenario →	Estremo	Oper. 2 navi	Oper. 4 navi	Impatto	Massimi
Moto					
X (m)	-	1.334	1.167	-	1.334
Y (m)	-	1.116	1.078	-	1.116
Z (m)	-	0.030	0.030	-	0.030
RX (deg)	-	2.794	2.745	-	2.794
RY (deg)	-	0.062	0.064	-	0.064
RZ (deg)	-	0.612	0.601	-	0.612

Tabella 12-36 – Moti delle navi – Riepilogo

Scenario →	Estremo	Oper. 2 navi	Oper. 4 navi	Impatto	Massimi
Tensione					
T (kN)	-	643	704	-	704

Tabella 12-37 – Tensioni dei cavi delle navi – Riepilogo

Scenario →	Estremo	Oper. 2 navi	Oper. 4 navi	Impatto	Massimi
Forza					
F (kN)	-	1748	1766	-	1766

Tabella 12-38 – Forze sui fender – Riepilogo



La seguente tabella riporta i risultati della verifica dei criteri di Tabella 9-3. La verifica è effettuata calcolando il fattore di utilizzo (UF), cioè il rapporto tra il valore massimo ottenuto e il valore ammissibile.

Scenario →	Estremo	Oper. 2 navi	Oper. 4 navi	Impatto	Massimi
Componente	UF				
Tensione catena	0.53	0.37	0.43	0.20	0.55
Carico radiale cerniere	0.75	0.40	0.41	0.43	0.75
Tensione cavo	0.00	1.54	1.69	0.00	1.69
Carico parabordo	0.00	0.70	0.71	0.00	0.71

Tabella 12-39 – Verifica dei criteri – Riepilogo



12.5 SENSITIVITÀ SUI CORPI MORTI

Dai risultati riportati al paragrafo 12.4 emerge che il caso più critico è il caso estremo, e in particolare i valori massimi si verificano per il caso C4 (onda e corrente da 150 deg e vento da 135 deg).

Nelle tabelle seguenti sono riportati i massimi ottenuti nei diversi casi (base, S1 e S2, si veda paragrafo 9.5) e i massimi assoluti per questo caso.

I massimi riportati sono i massimi tra quelli ottenuti durante la simulazioni e quelli ottenuti in accordo con la distribuzione probabilistica adottata (MPM, paragrafo 9.6).

Caso →	Base	S1	S2	Massimi
Moto				
X (m)	0.240	0.200	0.172	0.240
Y (m)	0.232	0.265	0.308	0.308
Z (m)	0.144	0.143	0.145	0.145
RX (deg)	0.588	0.588	0.645	0.645
RY (deg)	0.216	0.216	0.215	0.216
RZ (deg)	0.055	0.056	0.059	0.059

Tabella 12-40 – Moti dei moduli – Sensitività

Caso →	Base	S1	S2	Massimi
Rotazione				
RY (deg)	0.303	0.303	0.300	0.303

Tabella 12-41 – Rotazioni relative tra moduli – Sensitività

Caso →	Base	S1	S2	Massimi
Accelerazione				
AX (m/s ²)	0.078	0.087	0.073	0.087
AY (m/s ²)	0.263	0.254	0.265	0.265
AZ (m/s ²)	0.311	0.311	0.308	0.311

Tabella 12-42 – Accelerazioni sui moduli – Sensitività

Caso →	Base	S1	S2	Massimi
Tensione				
T (kN)	4303	3885	3962	4303



Tabella 12-43 – Tensioni delle catene dei moduli – Sensitività

Caso →	Base	S1	S2	Massimi
Forza				
Fx (kN)	6988	7273	7319	7319
Fy (kN)	598	593	583	598
Fz (kN)	1976	2056	2121	2121
Fr (kN)	6999	7219	7264	7264

Tabella 12-44 – Forze sulle cerniere – Punto P – Sensitività

Caso →	Base	S1	S2	Massimi
Forza				
Fh (kN)	3715	3770	3834	3834

Tabella 12-45 – Forza orizzontale all'ancora – Sensitività

Caso →	Base	S1	S2	Massimi
Angolo				
α_{MIN} (deg)	49.8	49.2	47.8	49.8
α_{MAX} (deg)	74.3	74.7	75.9	75.9
$\alpha_{\text{MAX}} - \alpha_{\text{MIN}}$ (deg)	24.6	25.5	28.1	28.1

Tabella 12-46 – Angolo verticale della catena al chain stopper – Sensitività

La seguente tabella riporta i risultati della verifica dei criteri di Tabella 9-3. La verifica è effettuata calcolando il fattore di utilizzo (UF), cioè il rapporto tra il valore massimo ottenuto e il valore ammissibile.

Caso →	Base	S1	S2	Massimi
Componente	UF			
Tensione catena	0.53	0.48	0.49	0.53
Carico radiale cerniere	0.72	0.74	0.74	0.74

Tabella 12-47 – Verifica dei criteri – Sensitività



13 CONCLUSIONI

Dai risultati ottenuti e presentati nel paragrafo 12, si può concludere che il sistema proposto è idoneo e in conformità con le normative internazionali applicabili per ciò che concerne i carichi agenti sul sistema di ormeggio del terminale.

È possibile, inoltre, concludere che i moti e le accelerazioni dei moduli sono assai ridotti e quindi non vi sono criticità legate all'operatività del terminale e la sicurezza delle persone.

Le tensioni nelle catene di ormeggio dei moduli sono sempre ben al di sotto di quelle ammissibili e la condizione più gravosa risulta essere quella nello scenario estremo (caso C4).

I massimi carichi radiali sulle cerniere si verificano nei casi di condizioni meteo-marine estreme (caso C4, senza navi ormeggiate) in cui sono maggiori i moti dei moduli e quindi gli sforzi trasmessi tra di loro.

I parabordi selezionati sono idonei a mantenere le navi ormeggiate nelle condizioni meteo-marine anche con periodo di ritorno di 10 anni. Le tensioni delle linee di ormeggio delle navi risultano essere oltre quella ammissibile (ma inferiori a quella di rottura), tuttavia va sottolineato che: 1) lo studio e l'ottimizzazione del layout di ormeggio delle navi sarà fatto nel progetto definitivo e 2) le condizioni meteo-marine operative selezionate sono sicuramente molto gravose e pertanto fortemente conservative; in ogni caso i limiti operativi sono dipendono dalle linee di ormeggio delle navi per le condizioni limiti ambientali onerose considerate e non dal sistema di ancoraggio del pontile galleggiante.

Dal paragone tra i risultati ottenuti in condizioni operative con 2 e 4 navi mostrano che l'impatto di due navi aggiuntive sul comportamento dinamico del terminale non è sostanziale. Le tensioni massime sul sistema di ormeggio dei moduli aumentano del 16% mentre le forze sulle cerniere rimangono pressoché invariate, confermando il fatto che esse sono determinate dai moti dei moduli (scarsamente influenzati dalle navi).

L'analisi di sensitività sui corpi morti delle catene indica che le due soluzioni alternative (riduzione del peso lineare e riduzione della lunghezza del tratto di catena con i "clump weight") forniscono risultati molto vicini alla soluzione base. La soluzione con minor peso lineare (10 t/m) ovviamente è la meno idonea per ciò che riguarda la riduzione dei moti dei moduli, tuttavia anche in questo caso essi si mantengono molto contenuti.

I carichi orizzontali all'ancora non subiscono variazioni significative. Confrontando Tabella 12-43 e Tabella 12-45 si nota come non vi sia una gran riduzione della tensione al "chain stopper" e all'ancora. Questo è dovuto alla notevole inclinazione (angolo α) della catena e alla sua ridotta lunghezza.

Data la geometria delle catene di ormeggio la sua rigidità è elevata per cui, un piccolo spostamento orizzontale dell'attacco della catena al "chain stopper" causa una notevole variazione dell'angolo di attacco della catena. Questo è evidenziato in Tabella 12-46 dove si vede che gli angoli α variano anche di circa +/- 15 gradi rispetto all'angolo nominale.



APPENDICE

Allegato il file elettronico: *Appendice_TR_14_2.xlsx*