

# AVAMPORTO GALLEGGGIANTE BOCCA DI LIDO TERMINAL PASSEGGERI



2013 - 2015

ALLEGATO 3



**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](mailto: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 3**

*Nuovo Terminal Crociere di Venezia – Soluzione Galleggiante*

*Analisi di Stabilità e Robustezza Longitudinale*

TIPO DOCUMENTO: Relazione Tecnica

| <i>DOCUMENTO N.</i> | <i>REVISIONE</i> | <i>DATA</i> | <i>PREPARATO DA</i> | <i>CONTROLLATO DA</i> |
|---------------------|------------------|-------------|---------------------|-----------------------|
| TR-14-1             | 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.....                 | 7  |
| 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 dei moduli galleggianti.....      | 12   |
| 7.1    | Generale .....                                | 12   |
| 7.2    | Dimensioni principali .....                   | 12   |
| 7.3    | Casse di zavorra .....                        | 13   |
| 7.4    | Pesi e zavorra .....                          | 14   |
| 7.5    | Sezione maestra.....                          | 15   |
| 7.6    | Riassunto dei dati principali .....           | 16   |
| 8      | Metodologia e criteri.....                    | <b>Errore. Il segnalibro non è definito.</b> |
| 8.1    | Generale .....                                | 17   |
| 8.2    | Stabilità a scafo integro.....                | 17   |
| 8.2.1  | Stabilità statica .....                       | 17   |
| 8.2.2  | Stabilità dinamica.....                       | 17   |
| 8.3    | Stabilità in falla.....                       | 18   |
| 8.4    | Robustezza longitudinale .....                | 18   |
| 9      | Software .....                                | 20   |
| 10     | Modellazione.....                             | 21   |
| 10.1   | Forze idrostatiche .....                      | 21   |
| 10.2   | Specchi liquidi .....                         | 21   |
| 10.3   | Forza del vento .....                         | 21   |
| 11     | Risultati.....                                | 22   |
| 11.1   | Stabilità a scafo integro.....                | 22   |
| 11.1.1 | Stabilità statica .....                       | 22   |
| 11.1.2 | Stabilità dinamica.....                       | 23   |
| 11.2   | Stabilità in falla.....                       | 24   |



|      |                                |    |
|------|--------------------------------|----|
| 11.3 | Robustezza longitudinale ..... | 25 |
| 12   | Conclusioni .....              | 26 |



## 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 dimensionato per l'ormeggio di quattro navi da crociera fino a 120,000 tonnellate di stazza lorda. Va tuttavia sottolineato che, qualora 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 rendendo, in tal modo, l'agibilità del terminal indipendente dalle chiusure del Mose. 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 DOCUMENTO

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 la stabilità e la robustezza longitudinale dei moduli che compongono il terminal.

Lo studio e le verifiche sono condotte in accordo con le più rilevanti normative nazionali e internazionali applicabili.

Considerando che i moduli hanno un'ampia riserva di stabilità e che si tratta di un progetto di massima, alcune verifiche sono condotte usando metodologie semplificate.

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.





### 3 SIMBOLI, ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

#### 3.1 SIMBOLI

|             |  |
|-------------|--|
| $A_L$       | Area laterale                                    |
| $B$         | Larghezza  |
| $D$         | Altezza di costruzione                           |
| $GM_T$      | Altezza metacentrica trasversale                 |
| $GZ$        | Braccio di stabilità                             |
| $H$         | Altezza, Altezza d'onda                          |
| $I_{xx}$    | 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     |
| $J$         | Momento d'inerzia della sezione maestra          |
| $L$         | Lunghezza  |
| $l_w$       | Braccio del momento sbandante del vento          |
| $LCG$       | Coordinata longitudinale del centro di gravità   |
| Oxyz        | Sistema di riferimento locale dei corpi          |
| $T$         | Immersione media                                 |
| $TCG$       | Coordinata trasversale del centro di gravità     |
| $V$         | Volume   |
| $VCG$       | Coordinata verticale del centro di gravità       |
| $V_w$       | Velocità del vento (media oraria)                |
| $W$         | Weight   |
| $WL$        | Water level                                      |
| $W_{fondo}$ | Modulo di resistenza rispetto al fondo           |
| $W_{ponte}$ | Modulo di resistenza rispetto al ponte           |
| $Z_{AN}$    | Coordinata verticale dell'asse neutro            |
| $\lambda$   | Lunghezza d'onda                                 |
| $\theta$    | Angolo di sbandamento                            |
| $\phi$      | Angolo di assetto                                |
| $\sigma$    | Stress   |
| $\Delta$    | Dislocamento                                     |

#### 3.2 ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

|      |   |
|------|---|
| DNV  | Det Norske Veritas                        |
| IMO  | International Maritime Organization       |
| Max. | Massimo                                   |
| Min. | Minimo                                    |
| Rif. | Riferimento                               |
| RINA | Registro Italiano Navale                  |
| SF   | Safety Factor                             |
| SI   | Sistema Internazionale di unità di misura |



Nuovo Terminal Crociere di Venezia – Soluzione Galleggiante  
Analisi di Stabilità e Robustezza Longitudinale  
*Relazione Tecnica*

SOLAS

Safety Of Life At Sea



## 4 RIFERIMENTI

### 4.1 DOCUMENTI DI PROGETTO

- [1] Technital, “Relazione Meteomarina e Morfologica”, 25/09/02
- [2] Raffaele Nicolosi, TR-14-2, ““Nuovo Terminal Crociere di Venezia – Soluzione Galleggiante – Analisi Dinamica del Sistema”, Rev. 0, 01/11/2014

### 4.2 STANDARD E NORMATIVE

- [3] DNV, “Rules for Marine Operations – Pt.1 Ch. 2 Planning of Operations”, 1996
- [4] IMO, Resolution A.749(18), “Code on Intact Stability for All Types of Ships Covered by IMO Instruments”, adopted on 4 November 1993
- [5] IMO, Resolution MSC.281(85), “Explanatory Notes to the SOLAS Chapter II-1 Subdivision and Damage Stability Regulations”, adopted on 4 December 2008
- [6] IMO, Resolution MSC.1/Circ. 1200, “Interim Guidelines for alternative assessment of the weather criterion”, 24 May 2006
- [7] RINA, “Rules for the Classification of Ships”, Part B, Chapter 3, Section 2 and Part E, Chapter 19, Section 2, Effective from 1 January 2012
- [8] RINA, “Norme per la Verifica delle Sistemazioni per il Trasporto di Carichi Concentrati sul Ponte di Coperta di Pontoni Destinati alla Navigazione Marittima”, 1 giugno 1988

### 4.3 LETTERATURA TECNICA

- [9] Ultramarine, Inc., “Reference Manual for MOSES”, July 9 2012



## 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 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 DEI MODULI GALLEGGIANTI

### 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.

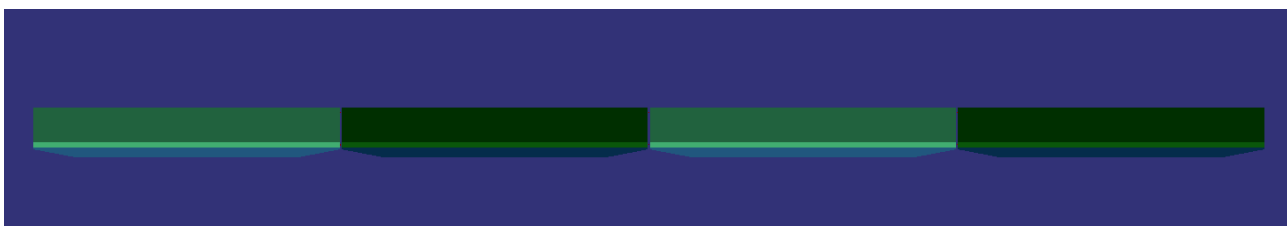


Figura 7-1 – Configurazione del terminal galleggiante

Per maggiori dettagli sui sistemi di ormeggio, cerniere e comportamento dinamico del sistema si rimanda a Rif. [2].

### 7.2 DIMENSIONI PRINCIPALI

I moduli galleggianti sono semplici pontoni di forma scatolare con poppa e prua leggermente sfinite, come mostrato in Figura 7-2.

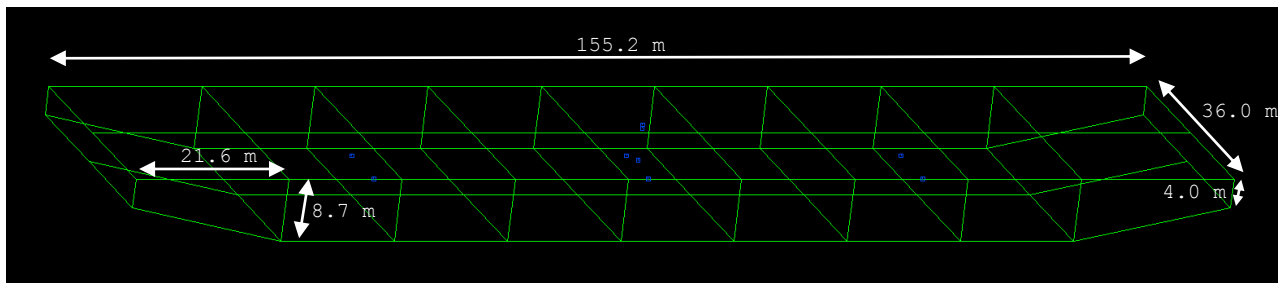


Figura 7-2 – Dimensioni principali dei moduli

I moduli dovranno essere tali per cui tutte le aperture sul ponte devono essere stagne e mantenute chiuse durante il normale esercizio.

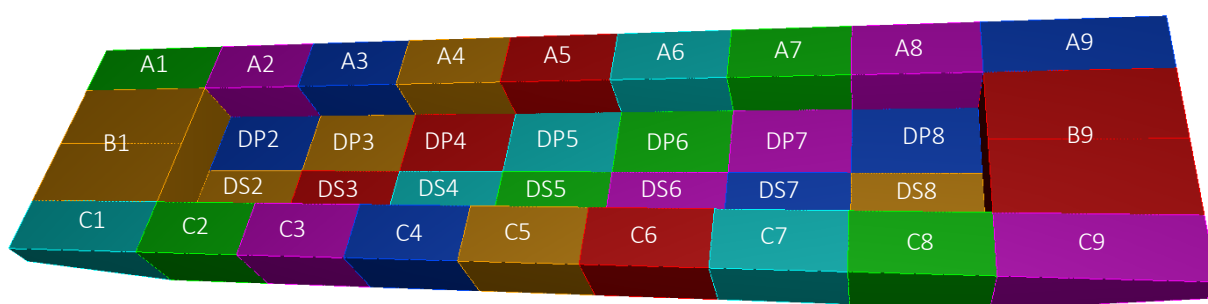


### 7.3 CASSE DI ZAVORRA

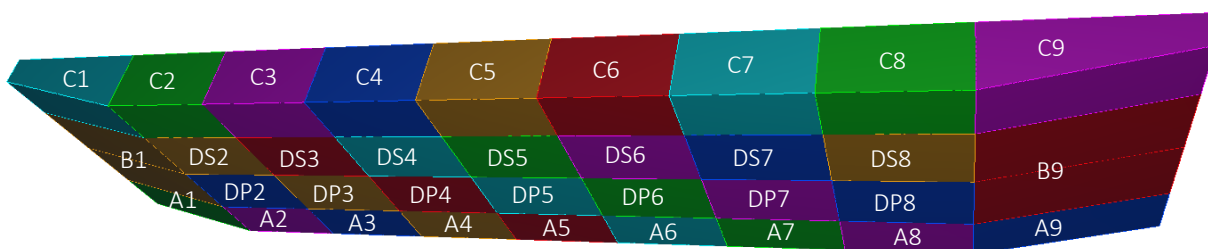
Il modulo è provvisto di 34 casse di zavorra:

- 14 sul fondo;
- 14 laterali (7 a dritta e 7 a sinistra);
- 3 a poppa;
- 3 a prua.

L'identificazione delle casse è mostrata nelle due figure seguenti.



*Figura 7-3 – Casse di zavorra (1/2)*



*Figura 7-4 – Casse di zavorra (2/2)*

Geometrie e capacità delle casse sono dati in Tabella 7-1.



| Cassa | L (m) | B (m) | H (m) | V (m <sup>3</sup> ) |
|-------|-------|-------|-------|---------------------|
| A1    | 21.60 | 8.00  | 8.70  | 1097.3              |
| A2    | 16.00 | 8.00  | 8.70  | 1113.6              |
| A3    | 16.00 | 8.00  | 8.70  | 1113.6              |
| A4    | 16.00 | 8.00  | 8.70  | 1113.6              |
| A5    | 16.00 | 8.00  | 8.70  | 1113.6              |
| A6    | 16.00 | 8.00  | 8.70  | 1113.6              |
| A7    | 16.00 | 8.00  | 8.70  | 1113.6              |
| A8    | 16.00 | 8.00  | 8.70  | 1113.6              |
| A9    | 21.60 | 8.00  | 8.70  | 1097.3              |
| C1    | 21.60 | 8.00  | 8.70  | 1097.3              |
| C2    | 16.00 | 8.00  | 8.70  | 1113.6              |
| C3    | 16.00 | 8.00  | 8.70  | 1113.6              |
| C4    | 16.00 | 8.00  | 8.70  | 1113.6              |
| C5    | 16.00 | 8.00  | 8.70  | 1113.6              |
| C6    | 16.00 | 8.00  | 8.70  | 1113.6              |
| C7    | 16.00 | 8.00  | 8.70  | 1113.6              |
| C8    | 16.00 | 8.00  | 8.70  | 1113.6              |
| C9    | 21.60 | 8.00  | 8.70  | 1097.3              |

| Cassa | L (m) | B (m) | H (m) | V (m <sup>3</sup> ) |
|-------|-------|-------|-------|---------------------|
| B1    | 21.60 | 20.00 | 8.70  | 2743.2              |
| B9    | 21.60 | 20.00 | 8.70  | 2743.2              |
| DP2   | 16.00 | 10.00 | 1.00  | 160.0               |
| DP3   | 16.00 | 10.00 | 1.00  | 160.0               |
| DP4   | 16.00 | 10.00 | 1.00  | 160.0               |
| DP5   | 16.00 | 10.00 | 1.00  | 160.0               |
| DP6   | 16.00 | 10.00 | 1.00  | 160.0               |
| DP7   | 16.00 | 10.00 | 1.00  | 160.0               |
| DP8   | 16.00 | 10.00 | 1.00  | 160.0               |
| DS2   | 16.00 | 10.00 | 1.00  | 160.0               |
| DS3   | 16.00 | 10.00 | 1.00  | 160.0               |
| DS4   | 16.00 | 10.00 | 1.00  | 160.0               |
| DS5   | 16.00 | 10.00 | 1.00  | 160.0               |
| DS6   | 16.00 | 10.00 | 1.00  | 160.0               |
| DS7   | 16.00 | 10.00 | 1.00  | 160.0               |
| DS8   | 16.00 | 10.00 | 1.00  | 160.0               |

Tabella 7-1 – Geometria e capacità delle casse di zavorra

#### 7.4 PESI E ZAVORRA

I pesi a bordo si possono suddividere in:

- 1) scafo nudo;
- 2) sovrastrutture;
- 3) persone;
- 4) impianti e macchinari;
- 5) zavorra.

I primi 4 sono stati stimati in 9850 t (di cui 5850 di scafo nudo), con un VCG di 6.5 m. L'immersione di progetto è di 6 metri. Il riempimento delle casse si zavorra è in modo tale che il livello d'acqua all'interno delle casse sia tale per cui eventuali falle comportano variazioni di immersione, angoli di assetto e sbandamento minimi. Nella seguente tabella sono riportati i valori di riempimento percentuale, peso e livello d'acqua interno (rispetto alla chiglia) in ciascuna cassa. Il riempimento massimo è posto pari al 98.5%.





| Cassa | %     | W (t)  | WL (m) |
|-------|-------|--------|--------|
| A1    | 62.10 | 698.5  | 6.29   |
| A2    | 61.19 | 698.5  | 5.32   |
| A3    | 61.19 | 698.5  | 5.32   |
| A4    | 98.50 | 1124.3 | 8.57   |
| A5    | 98.50 | 1124.3 | 8.57   |
| A6    | 98.50 | 1124.3 | 8.57   |
| A7    | 61.19 | 698.5  | 5.32   |
| A8    | 61.19 | 698.5  | 5.32   |
| A9    | 62.10 | 698.5  | 6.29   |
| C1    | 62.10 | 698.5  | 6.29   |
| C2    | 61.19 | 698.5  | 5.32   |
| C3    | 61.19 | 698.5  | 5.32   |
| C4    | 98.50 | 1124.3 | 8.57   |
| C5    | 98.50 | 1124.3 | 8.57   |
| C6    | 98.50 | 1124.3 | 8.57   |
| C7    | 61.19 | 698.5  | 5.32   |
| C8    | 61.19 | 698.5  | 5.32   |
| C9    | 62.10 | 698.5  | 6.29   |

| Cassa | %     | W (t)  | WL (m) |
|-------|-------|--------|--------|
| B1    | 60.00 | 1687.1 | 6.16   |
| B9    | 60.00 | 1687.1 | 6.16   |
| DP2   | 98.50 | 161.6  | 0.99   |
| DP3   | 98.50 | 161.6  | 0.99   |
| DP4   | 98.50 | 161.6  | 0.99   |
| DP5   | 98.50 | 161.6  | 0.99   |
| DP6   | 98.50 | 161.6  | 0.99   |
| DP7   | 98.50 | 161.6  | 0.99   |
| DP8   | 98.50 | 161.6  | 0.99   |
| DS2   | 98.50 | 161.6  | 0.99   |
| DS3   | 98.50 | 161.6  | 0.99   |
| DS4   | 98.50 | 161.6  | 0.99   |
| DS5   | 98.50 | 161.6  | 0.99   |
| DS6   | 98.50 | 161.6  | 0.99   |
| DS7   | 98.50 | 161.6  | 0.99   |
| DS8   | 98.50 | 161.6  | 0.99   |

Tabella 7-2 – Piano di zavorra

Il peso totale dell'acqua di zavorra è pari a 20763 t con un VCG di 3.362 m.

È utile notare che i pesi dello scafo nudo ed in particolare dell'acqua di zavorra sono molto maggiori rispetto a quelli di sovrastrutture, macchinari, persone ecc. Di conseguenza, eventuali modifiche di questi ultimi possono essere facilmente bilanciate da piccole variazioni del piano di zavorra.

## 7.5 SEZIONE MAESTRA

Da un primo dimensionamento della sezione maestra Figura 7-5 sono calcolati i seguenti valori da utilizzare per la verifica della robustezza longitudinale:

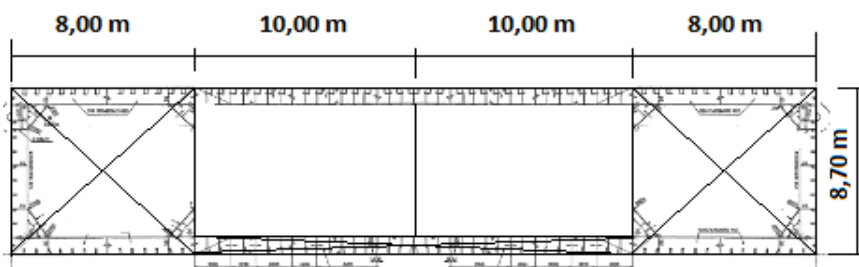


Figura 7-5 – Sezione maestra

| Dato               | Valore | Unità          |
|--------------------|--------|----------------|
| J                  | 48.261 | m <sup>4</sup> |
| W <sub>fondo</sub> | 11.383 | m <sup>3</sup> |
| W <sub>ponte</sub> | 10.820 | m <sup>3</sup> |
| Z <sub>AN</sub>    | 4.240  | m              |

Tabella 7-3 – Dati di robustezza della sezione maestra

È verosimile assumere che l'acciaio utilizzato è di tipo S235 (cioè con tensione di snervamento pari a 235 MPa). Si noti che si è conservativamente escluso il contributo delle sovrastrutture.

#### 7.6 RIASSUNTO DEI DATI PRINCIPALI

Tabella 7-4 riassume i dati principali dei moduli utilizzati per l'analisi dinamica.

| Dato            | Valore  | Unità            |
|-----------------|---------|------------------|
| L               | 155.200 | m                |
| B               | 36.000  | m                |
| D               | 8.700   | m                |
| T               | 6.000   | m                |
| GM <sub>T</sub> | 16.970  | m                |
| Δ               | 30615.5 | t                |
| LCG             | 77.600  | m                |
| TCG             | 0.000   | m                |
| VCG             | 4.370   | m                |
| I <sub>xx</sub> | 3.790E5 | t·m <sup>2</sup> |
| I <sub>yy</sub> | 1.279E6 | t·m <sup>2</sup> |
| I <sub>zz</sub> | 1.295E6 | t·m <sup>2</sup> |

Tabella 7-4 – Caratteristiche principali dei moduli

Si fa notare che l'altezza metacentrica tiene conto degli specchi liberi delle casse di zavorra.



## METODOLOGIA E CRITERI

### 7.7 GENERALE

L'analisi di stabilità e robustezza è svolta attraverso analisi statiche prendendo in esame un solo modulo e con la metodologia cosiddetta "free trim". Essa, contrariamente a quella "fixed trim", il calcolo dell'equilibrio del galleggiante nelle diverse condizioni è realizzato considerando anche variazioni di immersione media e assetto.

L'analisi è svolta usando il software MOSES (paragrafo 8).

Non sono considerati i vincoli dovuti al sistema di ormeggio e le cerniere di connessione tra moduli.

Non essendovi specifiche normative di stabilità per moli galleggianti, si è fatto riferimento a quelle per le navi. Tale scelta è da considerarsi senza dubbio ultraconservativa.

### 7.8 STABILITÀ A SCAFO INTEGRO

Lo studio della stabilità a scafo integro è svolto in accordo con le normative IMO (Rif. [3]) e RINA (Rif. [6]) applicabili (esse prevedono gli stessi criteri).

#### 7.8.1 Stabilità statica

I criteri sulla stabilità statica sono quelli riportati nelle seguenti sezioni della normativa RINA:

- Part B, Chapter 3, Section 2 (Hull and Stability – Stability – Intact Stability);
- Part E, Chapter 19, Section 2 (Service Notations – Non-Propelled Units – Hull and Stability).

#### 7.8.2 Stabilità dinamica

La stabilità dinamica è verificata con il Criterio Meteorologico contenuto nella normativa RINA in Part B, Chapter 3, Section 2.

Esso consiste nel verificare che la nave, in mare tempestoso, soggetta all'azione di un vento costante ( $l_{w1}$ ) che produce un angolo di sbandamento  $\theta_0$  e sottoposta ad un rollio di ampiezza definita ( $\theta_1$ ), abbia una sufficiente riserva di stabilità tale da sopportare, senza capovolgersi, il sopraggiungere di una raffica di vento che produca un ulteriore momento inclinante uguale a 1.5 volte il momento dovuto al vento costante ( $l_{w2}$ ).

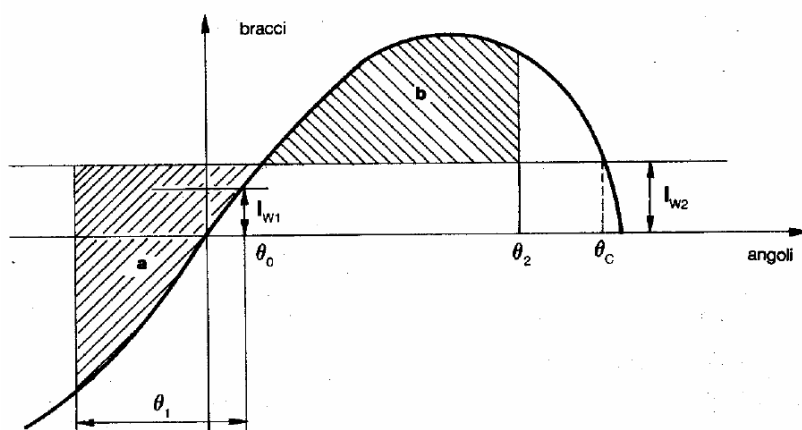




Figura 0-1 – Schema del Criterio Meteorologico

Si suppone che la forza del vento sia applicata sulla superficie laterale esposta (sia della nave che del carico eventualmente sistemato in coperta), abbia la stessa direzione del vento ed agisca perpendicolarmente al piano di simmetria longitudinale della nave, nel centro geometrico della predetta superficie esposta.

Con riferimento al diagramma di Figura 0-1, si ritiene che la nave abbia un'adeguata stabilità, ai fini del presente criterio, quando si verifica la seguente condizione:

$$\frac{\text{Area } b}{\text{Area } a} \geq 1$$

Per maggiori informazioni sul calcolo delle diverse quantità si rimanda a Rif. [7].

È necessario osservare che le formule per il calcolo dell'angolo di rollio ( $\theta_1$ ) riportate in tale normativa non sono rigorosamente applicabili al galleggiante in oggetto e tale angolo dovrebbe essere calcolato usando metodi alternativi e sperimentali come richiesto dall'IMO e descritto in Rif. [6] e come sarà fatto per il progetto definitivo. Tuttavia, in questa fase del progetto, si ritiene che una valutazione usando tali formulazioni con i valori assunti delle aree esposte, fornisca un'indicazione certa e conservativa.

#### 7.9 STABILITÀ IN FALLA

La stabilità in falla delle navi deve essere in accordo con la normativa SOLAS, e in particolare è analizzata usando il metodo probabilistico (Rif. [5]). Tale metodo è di complessa implementazione e eccessivamente dettagliato per una fase di progetto come quella attuale.

Lo studio è quindi svolto in modo semplificato, valutando la perdita di stabilità (riduzione di altezza metacentrica GM e variazione della curva dei bracci di stabilità GZ) e configurazione di galleggiamento (immersione media, angoli di assetto e sbandamento) considerando un compartimento allagato alla volta. L'analisi è svolta per tutti i compartimenti esterni (tutti le casse di zavorra).

Questo metodo è tutt'ora suggerito dal DNV per la verifica della stabilità dei pontoni adibiti al trasporto in mare di carichi in coperta (Rif. [3]).

#### 7.10 ROBUSTEZZA LONGITUDINALE

La verifica della robustezza longitudinale è svolta, in questa fase, in modo semplificato, calcolando le tensioni sul fondo e sul ponte di coperta in corrispondenza della sezione maestra (sezione centrale) con i massimi momenti flettenti e confrontandole con quelle ammissibili.

I momenti flettenti sono valutati in tre condizioni:

- 1) in acqua tranquilla;
- 2) in onda regolare.

La seconda condizione è considerata sia per onda inarcante (cresta dell'onda in mezzeria) che insellante (cresta dell'onda all'estrema poppa e estrema prua).

Questa metodologia era lo standard nell'ingegneria per la progettazione delle navi e lo è tuttora per la verifica dei pontoni per il trasporto di manufatti (Rif. [8]). Essa viene comunemente usata per la verifica preliminare della robustezza. Ovviamente, per il progetto definitivo si farà l'analisi strutturale per tutte le



condizioni di carico possibili e per le condizioni di mare reale agenti sul terminal sia per la fase di trasporto dal cantiere al luogo di installazione sia in esercizio per le varie condizioni di carico, in accordo con la metodologia indicata dalle normative applicabili.

La lunghezza d'onda è posta conservativamente pari alla lunghezza del modulo (in modo da massimizzare il momento flettente in mezzzeria), l'altezza pari a 1.86 volte l'altezza significativa massima.

Per queste verifiche si è assunta l'altezza significativa massima con periodo di ritorno 1000 anni e tratta da Rif. [1], cioè 2.5 m e pertanto l'onda massima è pari 4,65m.



## 8 SOFTWARE

L'analisi è condotta usando il software MOSES, sviluppato da Ultramarine (Rif. [9], per maggiori informazioni si visiti il sito [www.ultramarine.com](http://www.ultramarine.com)).

MOSES è un programma molto usato nell'industria offshore per:

- analisi statica e dinamica di strutture offshore (sistemi di ormeggio, piattaforme fisse, boe, FPSO ecc.);
- analisi di operazioni in mare come trasporti (piano di zavorra, calcolo delle accelerazioni agenti sul carico, ecc.) installazioni (sollevamenti, upending di jacket, floatover, ecc.), loadout, ecc.

Il software include quattro moduli principali: idrostatico, idrodinamico, analisi dinamica nel dominio della frequenza e del tempo e strutturale.

Il modulo idrostatico (il solo usato per questo studio) consente di calcolare la condizioni di equilibrio di corpi galleggianti, piani di zavorra, riduzione di stabilità per effetto degli specchi liberi, e consente di svolgere analisi di stabilità e robustezza longitudinale.

Il secondo modulo permette di calcolare le proprietà idrodinamiche delle strutture usando la teoria potenziale 2D o 3D e l'equazione di Morrison.

Il terzo risolve le equazioni del moto di uno o più corpi soggetti all'azione degli agenti meteo-marini e forze dovute all'accoppiamento meccanico con altri corpi (linee di ormeggio, ecc.).

L'ultimo permette di fare un'analisi strutturale attraverso un solutore ad elementi finiti 2D o 3D.



## 9 MODELLAZIONE

I calcoli si riferiscono alle analisi statiche usando il software MOSES descritto al paragrafo 8.

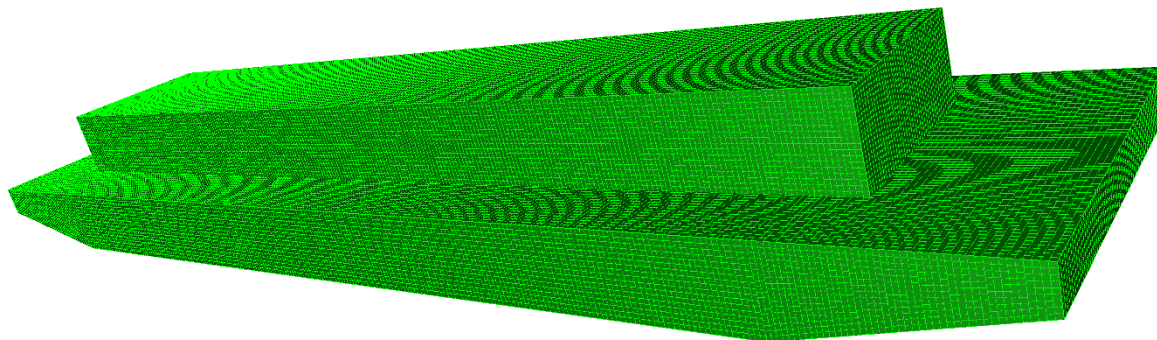


Figura 9-1 – Screenshot del modello MOSES

La superficie esterna del modulo e le cisterne interne sono modellate attraverso pannelli di lato di lunghezza massima di 0.5 m.

### 9.1 FORZE IDROSTATICHE

Le forze idrostatiche sono calcolate automaticamente da MOSES calcolando il contributo di pressione su ciascun pannello e suddividendo lo stesso nel caso in cui sia solo parzialmente sommerso.

### 9.2 SPECCHI LIQUIDI

MOSES consente di calcolare automaticamente la riduzione di stabilità per effetto degli specchi liquidi delle casse di zavorra e le analisi fatte ne tengono conto.

### 9.3 FORZA DEL VENTO

Le forze del vento sono calcolate da MOSES sommando la forza di drag agente su ciascun pannello e assumendo un coefficiente di drag pari a 1. Le forze del vento agiscono solo sui pannelli (o la porzione di dei pannelli) emersi. Conservativamente si è assunto un profilo verticale del vento costante.

Per tenere in considerazione il contributo delle sovrastrutture esse sono state conservativamente modellate con le seguenti dimensioni:

| Dato | Valore  | Unità |
|------|---------|-------|
| L    | 125.000 | m     |
| B    | 20.000  | m     |
| H    | 9.000   | m     |

Tabella 9-1 – Dimensioni delle sovrastrutture

E' stato assunto un profilo verticale del vento costante.



## 10 RISULTATI

### 10.1 STABILITÀ A SCAFO INTEGRO

#### 10.1.1 Stabilità statica

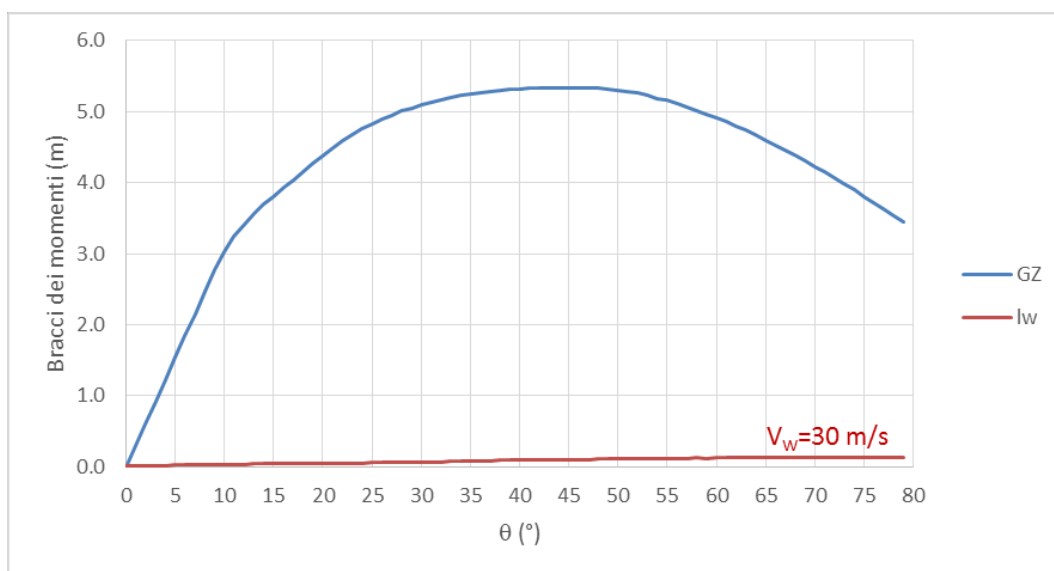


Figura 10-1 – Curva dei bracci di stabilità (scafo integro) e del momento sbandante per un vento di 30 m/s

| Requisito (RINA e IMO)   | Valore ottenuto           |
|--|---------------------------|
| L'area sottesa alla curva del GZ fino a $\theta=30^\circ$ deve essere almeno 0.055 m <sup>2</sup> rad                                  | 1.766 m <sup>2</sup> rad  |
| L'area sottesa alla curva del GZ fino a $\theta=40^\circ$ deve essere almeno 0.090 m <sup>2</sup> rad                                  | 2.680 m <sup>2</sup> rad  |
| L'area sottesa alla curva del GZ tra $\theta=30^\circ$ e $\theta=40^\circ$ deve essere almeno 0.030 m <sup>2</sup> rad                 | 1.007 m <sup>2</sup> rad  |
| GZ deve essere almeno pari a 0.20 m per $\theta$ maggiore o uguale a $30^\circ$  | 5.34 m                    |
| Il massimo GZ deve verificarsi per $\theta$ maggiore o uguale a $25^\circ$   | $45^\circ$                |
| GM deve essere maggiore o uguale a 0.15 m  | 16.97 m                   |
| L'area sottesa alla curva del GZ fino al massimo GZ deve essere almeno 0.080 m <sup>2</sup> rad  | 3.145 m <sup>2</sup> rad  |
| L'angolo $\theta$ di equilibrio ottenuto con un vento di 30 m/s deve essere inferiore all'angolo per cui immerge metà del bordo libero | $0.07^\circ < 4.29^\circ$ |
| Il campo di stabilità deve essere di almeno $15^\circ$   | $> 80^\circ$              |

Tabella 10-1 – Risultati dell'analisi di stabilità statica a scafo integro





### 10.1.2 Stabilità dinamica

In Figura 10-2 è riassunta l'applicazione del Criterio Meteorologico per il caso in esame.

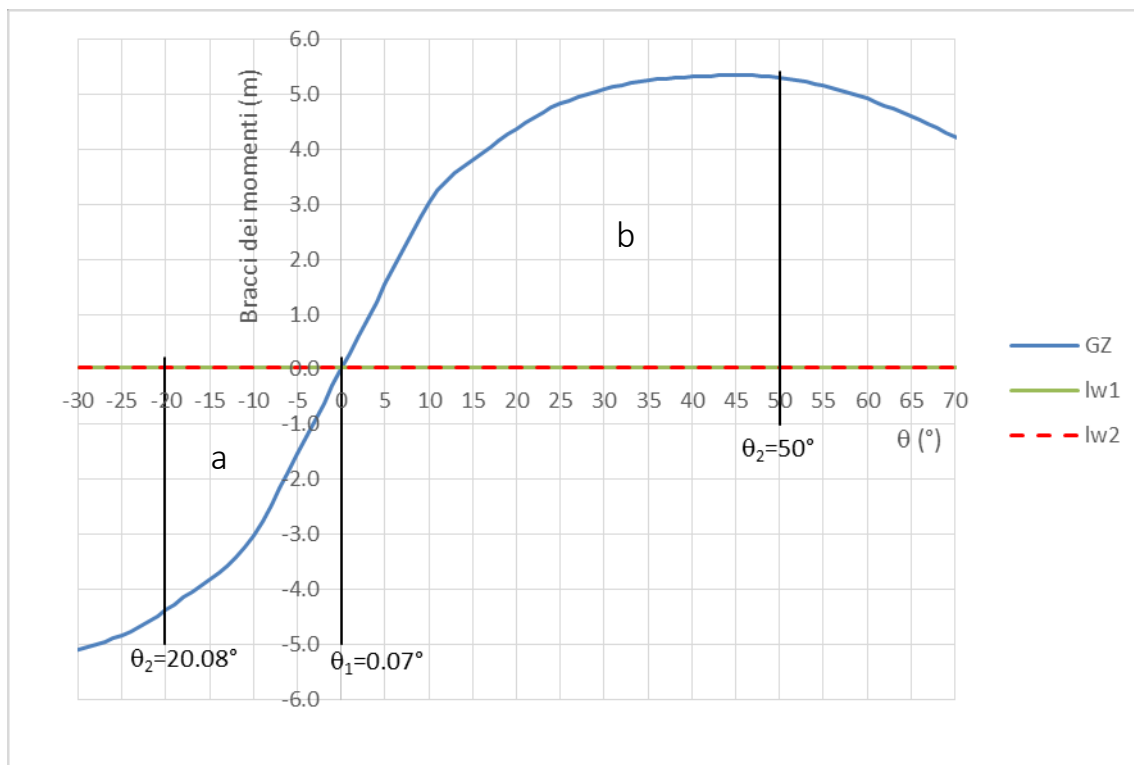


Figura 10-2 –Criterio Meteorologico applicato al modulo

Il rapporto tra le aree risulta:

$$\frac{\text{Area } b}{\text{Area } a} = 3.88$$

che è molto maggiore rispetto al rapporto minimo richiesto pari a 1.

Dai valori calcolati per i due criteri di calcolo e dal confronto con i requisiti minimi imposti dalle normative vigenti, si evince la robustezza del progetto ovvero gli ampi margini di sicurezza esistenti nei dimensionamenti strutturali.



## 10.2 STABILITÀ IN FALLA

Il seguente grafico riporta le curve dei bracci di stabilità per la condizione di scafo integro e le diverse condizioni di falla. Per motivi di simmetria sono riportati solo i risultati con i seguenti compartimenti allagati: A, A2, A3, A4, A5, B1, DP2, DP3, DP4, DP5.

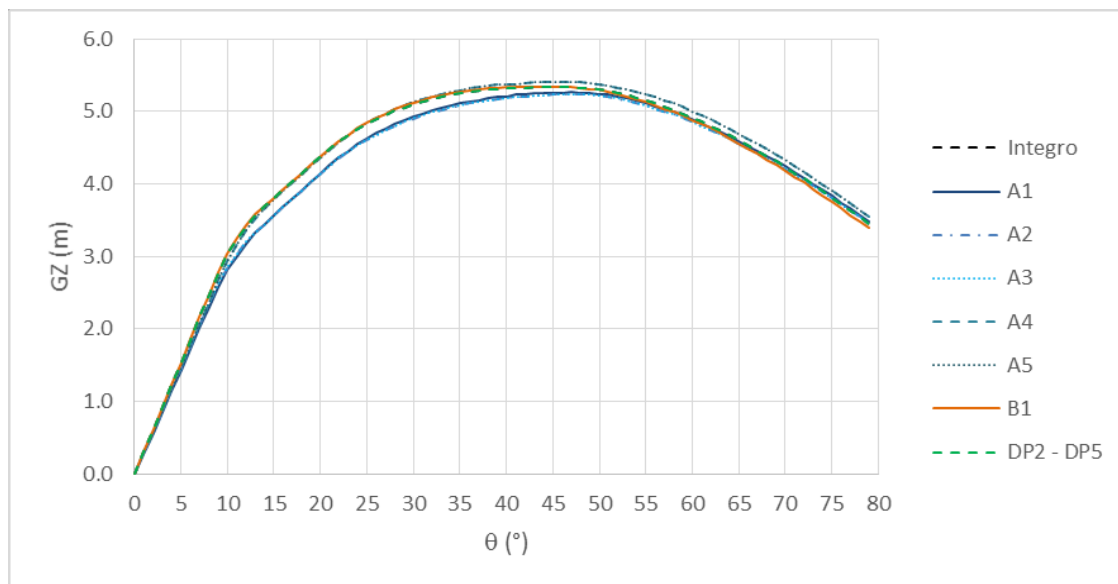


Figura 10-3 –Variazione della curva dei bracci di stabilità in Falla

Le altezze metacentriche e le condizioni di galleggiamento all'equilibrio per i diversi casi sono riportate nella seguente tabella.

| Compartimento allagato | $GM_T$ (m) | T (m) | $\theta$ (°) | $\phi$ (°) |
|------------------------|------------|-------|--------------|------------|
| A1                     | 15.83      | 5.99  | 0.10         | 0.02       |
| A2                     | 16.08      | 6.01  | -0.16        | -0.02      |
| A3                     | 16.07      | 6.02  | -0.15        | -0.02      |
| A4                     | 16.60      | 5.94  | 0.56         | 0.03       |
| A5                     | 16.60      | 5.94  | 0.55         | 0.00       |
| B1                     | 17.02      | 5.99  | 0.00         | 0.03       |
| DP2                    | 17.02      | 6.00  | 0.00         | 0.00       |
| DP3                    | 17.02      | 6.00  | 0.00         | 0.00       |
| DP4                    | 17.02      | 6.00  | 0.00         | 0.00       |
| DP5                    | 17.02      | 6.00  | 0.00         | 0.00       |

Tabella 10-2 – Dimensioni delle sovrastrutture



Come si può dedurre dalla tabella il terminal risulta praticamente insensibile ad eventuali falle tra l'altro estremamente improbabili.

### 10.3 ROBUSTEZZA LONGITUDINALE

La seguente figura riporta i momenti flettenti nelle tre condizioni descritte al paragrafo 7.10.

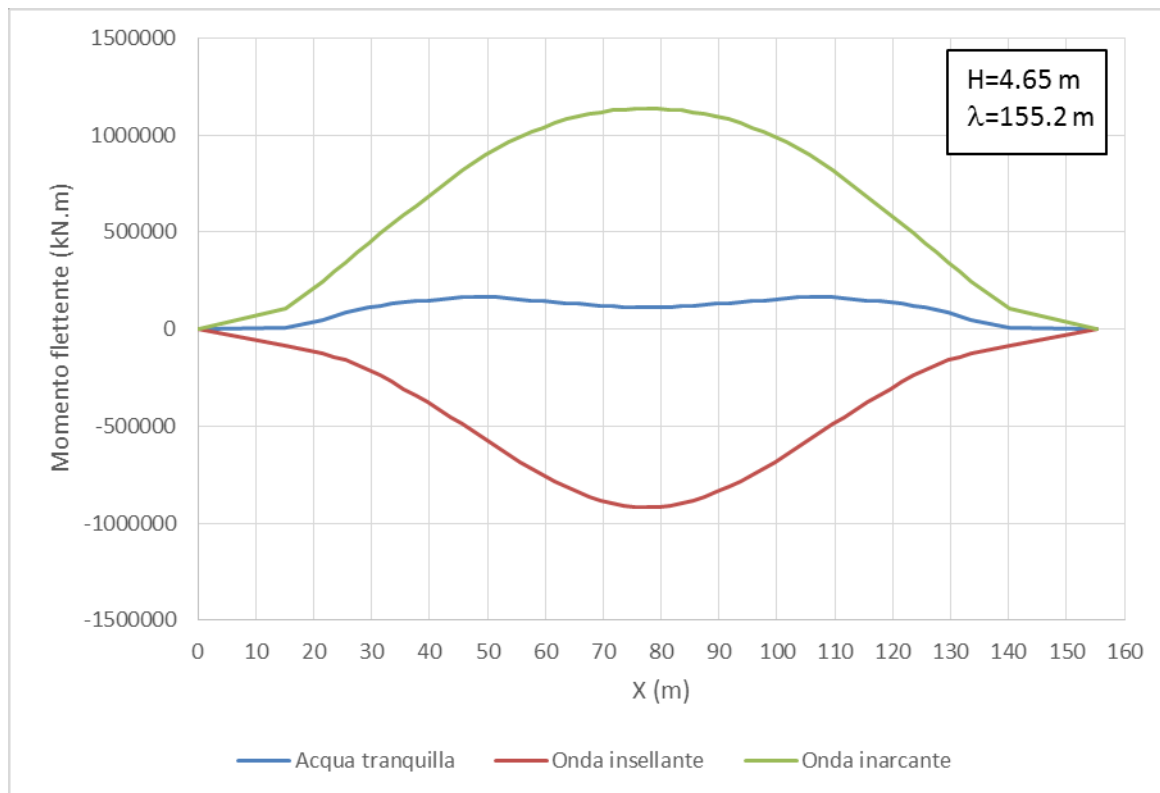


Figura 10-4 – Momenti flettenti lungo il modulo in acqua calma e onda

Sul fondo e il ponte di coperta della sezione maestra, usando i moduli di resistenza di Tabella 7-3, risultano i seguenti sforzi normali e fattori di sicurezza SF (rapporto tra la tensione ottenuta e quella di snervamento):

| Condizione      | Momento flettente (kN·m) | $\sigma_{\text{fondo}}$ (MPa) | $\sigma_{\text{ponte}}$ (MPa) | Min. SF |
|-----------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------|
| Acqua calma     | 110284                   | 10                            | 10                            | 0.04    |
| Onda insellante | -918991                  | 81                            | 85                            | 0.36    |
| Onda inarcante  | 1135262                  | 100                           | 105                           | 0.45    |

Tabella 10-3 – Momenti flettenti e stress nel fondo e ponte della sezione maestra

I margini di resistenza della sezione maestra nelle condizioni estreme sono assolutamente ampi da garantire una progettazione definitiva del tutto robusta.



## 11 CONCLUSIONI

Dai risultati ottenuti e presentati nel paragrafo 10, si può concludere che:

- 1) il modulo proposto è largamente idoneo per ciò che concerne la stabilità in stato di scafo integro;
- 2) eventuali falle non comportano una sostanziale variazione della configurazione di galleggiamento e delle caratteristiche di stabilità rispetto al caso di scafo integro;
- 3) la robustezza longitudinale del modulo è sufficiente e gli stress massimi sul fondo e il ponte di coperta della sezione maestra (105 MPa) sono abbondantemente al di sotto di valori critici.
- 4) I dati preliminari dimostrano una robustezza dei moduli tale che ogni singolo modulo può essere utilizzato per i convenzionali trasporti marini tipici del campo offshore in caso di dismissione del terminal, ma ne consente, con le opportune modifiche all'ancoraggio e ai sistemi di vincolo tra i moduli, l'impiego come terminal con la stessa configurazione anche in zone con fondale diverso e condizioni meteo più onerose come ad esempio fuori dalle bocche di porto.