



Tecnologia delle Costruzioni ed Allestimento Navale

Vincenzo Piscopo

Anno Accademico 2022/23

Pagina intenzionalmente in bianco

Nota dell'autore

Il presente manuale ha lo scopo di fornire un ausilio didattico snello, ma auspicabilmente efficace, agli studenti dei corsi di laurea triennale ad orientamento professionale in "Conduzione del mezzo navale", triennale in "Scienze nautiche, aeronautiche e meteo-oceanografiche" e magistrale in "Scienze e Tecnologie della navigazione". La strutturazione in capitoli segue fedelmente la distribuzione temporale e contenutistica delle lezioni tenute nell'Anno Accademico di riferimento. Si ringrazia lo studente Gianluigi Ferrara iscritto al corso di laurea magistrale in "Scienze e Tecnologie della navigazione" per aver fornito gli appunti delle lezioni tenute nell'Anno Accademico 2019/20, prezioso ausilio per la stesura del manuale.

Pagina intenzionalmente in bianco

Sommario

I. Classificazione delle navi e nomenclatura di base	8
I.1 Introduzione	8
I.2 Classificazione delle navi	8
I.2.1 Mezzo di sostentamento	8
I.2.2 Estensione della navigazione	9
I.2.3 Mezzo di propulsione	10
I.2.4 Tipologia di servizio	10
I.3 Dimensioni principali dello scafo	11
II. Layout esemplari delle navi.....	13
II.1 Navi portarinfuse solide	13
II.1.1 Generalità	13
II.1.2 Tipologia di carichi trasportati e fattore di stivaggio.....	13
II.1.3 Elementi morfologici fondamentali	15
II.1.4 Classificazione	17
II.1.5 Il Canale di Panama.....	17
II.1.6 Lo stretto di Suez.....	18
II.2 Navi portarinfuse liquide	19
II.2.1 Generalità	19
II.2.2 Elementi morfologici fondamentali	20
II.2.3 Classificazione	20
II.3 Navi portacontenitori.....	21
II.3.1 Generalità	21
II.3.2 Elementi morfologici fondamentali	22
II.3.3 Classificazione	22
II.4 Navi gasiere	23
II.4.1 Generalità	23
II.4.2 Elementi morfologici fondamentali	23
II.5 Navi chimichiere.....	25
II.5.1 Generalità	25
II.5.2 Classificazione	26
II.6 Navi traghetto	27
II.6.1 Generalità	27
III. Materiali da scafo.....	28
III.1 Prova di trazione.....	28
III.1.1 Generalità	28
III.1.2 Dimensioni e forma dei provini.....	28
III.1.3 Diagramma forza-allungamento	29
III.1.4 Diagramma tensione-deformazione	30
III.1.5 Esecuzione della prova	31
III.2 Prova di resilienza	31
III.2.1 Generalità	31
III.2.2 Dimensioni e forma dei provini.....	32
III.2.3 Esecuzione della prova	33
III.2.4 Temperatura di prova	34
III.3 Prove di durezza	35
III.3.1 Prova di durezza Brinell.....	35
III.3.2 Prova di durezza Vickers	36
III.3.3 Prova di durezza Rockwell	37
III.4 Acciai e leghe leggere di interesse navale	38
III.4.1 Cenni sul processo di lavorazione	38
III.4.2 Classificazione degli acciai da scafo.....	38
III.4.3 Composizione chimica degli acciai da scafo	39
III.4.4 Saldabilità degli acciai da scafo	40

III.4.5	Classificazione delle leghe leggere.....	41
III.4.6	Caratteristiche meccaniche delle leghe leggere di interesse navale	42
III.5	Materiali compositi di interesse navale.....	43
III.5.1	Classificazione	43
III.5.2	Fibre e matrici.....	43
III.5.3	Metodi di fabbricazione.....	45
III.5.4	Grado di impregnazione	46
III.5.5	Gli stratificati	46
III.6	Saldature di interesse navale.....	48
III.6.1	Classificazione	48
III.6.2	Saldatura ossiacetilenica.....	49
III.6.3	Saldatura all'arco con elettrodo rivestito	50
III.6.4	Saldatura all'arco sotto gas	51
III.6.5	Tipologie e designazioni delle saldature	52
III.6.6	Difetti e controlli dei cordoni di saldatura	54
IV.	Lo scafo in acciaio	56
IV.1	Elementi morfologici fondamentali.....	56
IV.1.1	Generalità.....	56
IV.1.2	Sistemi strutturali	56
IV.1.3	Strutture del fondo	58
IV.1.4	Strutture del ponte	62
IV.1.5	Compartimentazione longitudinale della nave	62
IV.2	Sezioni maestre tipiche	64
IV.2.1	Navi da carico generale	64
IV.2.2	Navi portarinfuse solide	65
IV.2.3	Navi portacontenitori	66
IV.2.4	Navi traghetto	67
IV.3	Disegni strutturali di una nave bulk carrier.....	68
IV.3.1	Vista longitudinale	68
IV.3.2	Sezione ordinaria.....	69
IV.3.3	Sezione rinforzata	71
IV.3.4	Paratia corrugata	73
V.	Analisi dei carichi e degrado strutturale	75
V.1	Il momento flettente verticale	75
V.1.1	La caratteristica di sollecitazione.....	75
V.1.2	La formula di Navier della flessione retta.....	76
V.1.3	Il modulo di resistenza di trave-nave	77
V.1.4	Teorema dei momenti statici.....	78
V.1.5	Teoremi dei momenti di inerzia	79
V.2	Modulo di resistenza di profilati con striscia di fasciame	80
V.2.1	Ferro piatto con striscia di fasciame associato	80
V.2.2	Ferro a T con striscia di fasciame associato	81
V.2.3	Piatto a bulbo con striscia di fasciame associato	81
V.2.4	Modulo di corrugazione.....	82
V.3	Modulo di resistenza di sezioni scatolari composte	83
V.3.1	Sezione scatolare composta/1	83
V.3.2	Sezione scatolare composta/2	84
V.3.3	Sezione scatolare composta/3	85
V.3.4	Sezione scatolare composta/4	86
V.4	Modulo di resistenza della sezione maestra	87
V.4.1	La sollecitazione di momento flettente verticale	87
V.4.2	Tensioni primarie di trave-nave	89
V.4.3	Modulo di resistenza di trave-nave.....	90
V.5	Piano di carico e contenimento delle sollecitazioni	91
V.5.1	Il piano di carico	91

V.5.2	Tensioni ammissibili di trave-nave	93
V.6	La corrosione dello scafo in acciaio	94
V.6.1	La cella galvanica	94
V.6.2	La serie galvanica degli elementi in acqua di mare	95
V.6.3	Tecniche di prevenzione della corrosione	97
V.6.4	Stima della massa complessiva di anodi sacrificali	98
V.6.5	Degrado e sostituzione delle strutture navali	99
V.6.6	Evoluzione temporale del processo di corrosione	100
V.6.7	Principio di calcolo a spessore netto	102
VI.	Impianti oleodinamici e dell'aria compressa	105
VI.1	Impianti oleodinamici	105
VI.1.1	Timonerie elettroidrauliche	105
VI.1.2	Impianti ausiliari di coperta	108
VI.2	Impianti dell'aria compressa	111
VI.2.1	Generalità	111
VI.2.2	Produzione trattamento e distribuzione	111
VI.2.3	Separatore di condensa	112
VI.2.4	Impianto di deumidificazione con sistema di preraffreddamento	113
VI.2.5	Impianto di deumidificazione con sistema di filtraggio multistadio	114
VI.2.6	Impianto di deumidificazione con sistema di filtraggio per assorbimento	114
VI.2.7	Impianto di deumidificazione con sistema di filtraggio per adsorbimento	116
VI.2.8	Impianto di deumidificazione per refrigerazione	117
VI.2.9	Impianto di deumidificazione con linea by-pass di emergenza	117

I. Classificazione delle navi e nomenclatura di base

I.1 Introduzione

La definizione di nave viene fornita all'interno del Codice della Navigazione, dove all'articolo 136 si definisce nave *qualsiasi costruzione destinata al trasporto per acqua anche a scopo di rimorchio, pesca, diporto o altro scopo*. In base all'estensione della navigazione, in accordo al predetto articolo, le navi si classificano in **maggiori** e **minori**. Tutte le navi *maggiori* sono abilitate alla navigazione d'altura, ovvero ad una navigazione che si svolge oltre le 20 miglia nautiche dalla costa. Le navi *minori*, invece, sono adibite a navigazioni più ridotte di tipo costiero e comunque entro le 20 miglia nautiche dalla costa. Tale classificazione è ulteriormente dettagliata all'articolo 302 del Codice della Navigazione. Partendo da tali definizioni è possibile classificare le navi in funzione di 4 elementi caratterizzanti, ovvero: *il tipo di sostentamento, l'estensione della navigazione, il tipo di mezzo di propulsione e il servizio cui la nave è destinata*.

I.2 Classificazione delle navi

I.2.1 Mezzo di sostentamento

La classificazione per sostentamento si basa sul rispetto dell'equazione di equilibrio alla traslazione verticale della nave. In base alla struttura di tale equazione, una carena si definisce **dislocante** (Fig. I.1 (a)) se la sua galleggiabilità è assicurata esclusivamente dalla spinta idrostatica di carena. In tal caso è soddisfatta l'equazione:

$$\Delta = \rho \nabla \quad (I.1)$$

dove: Δ è il dislocamento della nave in t, ρ è la densità dell'acqua di mare pari a 1.025 Kg/m³ e ∇ è il volume della carena immersa in m³. Tale equazione risulta sempre valida quando la nave è ferma o la sua velocità è ridotta. Al crescere della velocità si genera una componente aggiuntiva, detta spinta idrodinamica, tale da modificare la precedente equazione come segue:

$$\Delta = \rho \nabla(v) + S(v) \quad (I.2)$$

In tal caso il volume della carena immersa dipende dalla velocità v della nave dal momento che al crescere della velocità si genera una componente di spinta idrodinamica S . Al crescere della velocità la componente idrodinamica aumenta e pertanto si associa una corrispondente riduzione dell'aliquota idrostatica con conseguente riduzione del volume della carena immersa. La variazione del volume di carena si ottiene riducendo l'immersione e variando l'assetto della nave. Tutte le navi per le quali la componente idrodinamica risulta essere significativa, benché minore rispetto a quella idrostatica, si definiscono **navi dislocanti veloci (High Speed Craft)**, come riportato in Fig. I.1 (b). Affinché una nave sia classificata come HSC la velocità massima v_{max} deve soddisfare la seguente disequazione:

$$v_{max}(kn) \geq 7.16 \Delta(t)^{1/6} \quad (I.3)$$

Nell'ambito delle carene veloci si definiscono **carene plananti (planing hull)** quelle carene per le quali la componente di spinta idrodinamica è prevalente a quella idrostatica. Si definiscono **unità subacquee (underwater unit)** tutte quelle unità atte ad operare sotto la superficie dell'acqua per le quali vale la relazione:

$$\Delta = \rho \nabla_C \quad (1.4)$$

dove ∇_C è il dislocamento complessivo della nave, come riportato in Fig. 1.1 (c). Si tratta di una condizione di equilibrio indifferente. Infine, le **unità semisommersibili (SWATH)** sono dotate di una ridotta area della figura di galleggiamento che consente una rapida variazione dell'immersione.



(a) Nave dislocante



(b) Nave dislocante veloce



(c) Unità subacquea



(d) Unità semisommersibile

Figura 1.1

1.2.2 Estensione della navigazione

Il tipo di navigazione si classifica primariamente in due tipologie:

- **Navigazione Internazionale:** deve avvenire fra porti di Stati diversi;
- **Navigazione Nazionale:** deve avvenire tra porti dello stesso Stato.

In base all'estensione della navigazione, quella Internazionale si classifica in:

- **Lunga:** senza limiti dalla costa;
- **Breve:** a non più di 200 miglia nautiche da un porto sicuro;
- **Costiera:** entro 20 miglia nautiche dalla costa.

Quella Nazionale invece si classifica in:

- **Senza limiti:** senza limiti dalla costa;
- **Costiera:** entro 20 miglia nautiche dalla costa;
- **Litoranea:** entro 6 miglia nautiche dalla costa;

- **Locale:** entro 3 miglia nautiche dalla costa.

In aggiunta alle predette tipologie si aggiunge la classe delle **navigazioni speciali** che consentono alle navi di poter operare in ambiti più estesi rispetto alle navigazioni di tipo nazionale senza dover ottemperare ai maggiori requisiti richiesti per le navigazioni internazionali. Un tipico esempio è la navigazione **Mediterranea**.

I.2.3 Mezzo di propulsione

In base al mezzo di propulsione le navi si classificano in diverse tipologie in funzione del sistema di propulsione primario che può essere a combustione interna, elettrico, a turbina, a gas, eolica etc. Si definiscono galleggianti le unità prive di mezzi di propulsione propria che possono essere movimentate solo da unità **rimorchiatori** o unità **spintori**. Queste ultime si classificano in **chiatte (barge)** o **pontoni (pontoon)** in funzione della diversa modalità di trasporto del carico pagante che nel primo caso è allocato nelle stive del carico, mentre nel secondo è ammassato sul ponte di coperta.

I.2.4 Tipologia di servizio

La classificazione per servizio è nata dalla specializzazione delle unità navali. Antecedentemente agli anni '70 il trasporto via mare era garantito da navi da carico generali all'interno delle quali venivano diverse unità merceologiche. Successivamente per ottemperare alle diverse esigenze commercio globale sono state studiate e costruite vari tipologie di navi che si sono adattate a specifiche unità merceologiche. Tutti i prodotti che non hanno bisogno di un trasporto specifico vengono trasportati sulle "nuove navi da carico generale", ovvero le unità **portacontenitori (containership)** la cui peculiarità è quella di trasportare un elevato numero di prodotti all'interno di unità modulari detti *containers*.

La classificazione per servizio delle navi risulta essere fortemente variata a partire dagli anni '70, dal momento che la filosofia progettuale delle navi pre-anni '70 si basava sulla condizione per cui erano le merci ad adattarsi alla nave. Successivamente agli anni '70 si è avuta una specializzazione via via crescente delle unità navali in accordo ad una nuova filosofia secondo cui sono le navi a adattarsi al tipo di carico trasportato. Secondo la classificazione attuale per tipologia di servizio le navi sono suddivise in 3 grandi categorie:

- **Navi Passeggeri:** sono adibite al trasporto di più di 12 persone oltre l'equipaggio o in taluni casi al trasporto misto di persone e mezzi su gomma (Fig. I.2(a));
- **Navi da Carico:** sono specializzate per il trasporto di una o più unità merceologiche specifiche. Tra le categorie prevalenti si annoverano le *Oil Tanker*, adibite al trasporto di idrocarburi o di prodotti raffinazione petrolifera (Fig. I.2(b)), *Bulk Carrier*, adibite al trasporto di carichi solidi alla rinfusa (Fig. I.2(c)), *Chemical Tanker*, adibite al trasporto prodotti chimici alla rinfusa, *Containership* ovvero le moderne navi da carico generale (Fig. I.2(d)), *Car-carrier Ship* (adibite al trasporto di veicoli su gomma).
- **Navi Speciali:** rientrano in tale categoria tutte le unità navali il cui scopo prevalente non è il trasporto di cose o persone, ma l'esecuzione di una o più

attività in mare. Tra le diverse tipologie si annoverano le *Navi da Pesca (Fishing Vessel)*, le *Navi da ricerca (Research Ship)*, *Tug Vessel (Rimorchiatori)* etc.



(a) Nave passeggeri



(b) Nave da carico liquido alla rinfusa



(c) Nave da carico liquido alla rinfusa



(d) Nave portacontaineri

Figura I.2

I.3 Dimensioni principali dello scafo

In base alla lunghezza della nave, si definiscono 3 grandezze di riferimento (Fig. I.3):

- **Lunghezza fuori tutto L_{OA} (Length overall):** lunghezza massima della nave misurata sul piano di simmetria tra le estremità poppiera e prodiera dello scafo;
- **Lunghezza tra le perpendicolari L_{BP} (Length between perpendiculars):** lunghezza della nave misurata sul piano di simmetria tra la perpendicolare avanti e la perpendicolare addietro;
- **Lunghezza al galleggiamento L_{WL} (Length on Waterline):** lunghezza della nave misurata sul piano di simmetria al galleggiamento di pieno carico.
- **Perpendicolare Avanti (Forward perpendicular):** è la retta verticale appartenente al piano di simmetria della nave e passante per l'intersezione del galleggiamento di pieno carico con il dritto di prora.
- **Perpendicolare Addietro (Afterward perpendicular):** è la retta verticale appartenente al piano di simmetria e passante per l'asse di rotazione del timone.
- **Larghezza (Moulded breadth):** larghezza convenzionale di una nave misurata in corrispondenza del ponte coperto (Fig I.4).
- **Altezza di costruzione (Moulded depth):** distanza verticale tra il punto più basso della carena, detto chiglia, e l'intersezione tra il fianco e il ponte della nave, quest'ultimo detto orlo a murata.

Una volta determinata l'altezza di costruzione della nave è possibile definire due ulteriori grandezze geometriche tra loro complementari, ovvero:

- **Immersione di progetto (*Moulded draught*):** massima immersione operativa della nave;
- **Bordo libero (*Freeboard*):** distanza verticale minima tra l'orlo a murata e l'immersione massima o di progetto della nave. Tale grandezza rappresenta una riserva di galleggiabilità della nave in caso di eventi di falla dovuti a collisione o incaglio che generano una sovra immersione della carena rispetto all'immersione di progetto. Il calcolo del bordo libero è regolamentato da una convenzione internazionale detta *International Load Line Convention del 1966* applicabile a tutte le navi battenti bandiera dei paesi aderenti alla convenzione stessa.

Si rammenta, infine, che per garantire lo smaltimento dell'acqua eventualmente accumulatasi sul ponte coperta, lo stesso non è normalmente piano ma inclinato verso le murate. Pertanto, essendo il ponte coperto più alto a centro nave che a murata, si definisce **bolzone (*camber*)** la distanza verticale tra l'orlo a murata e il ponte di coperta in corrispondenza del piano di simmetria della nave.

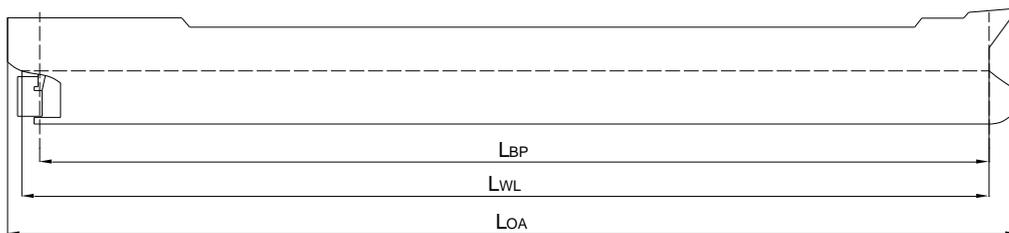


Figura I.3

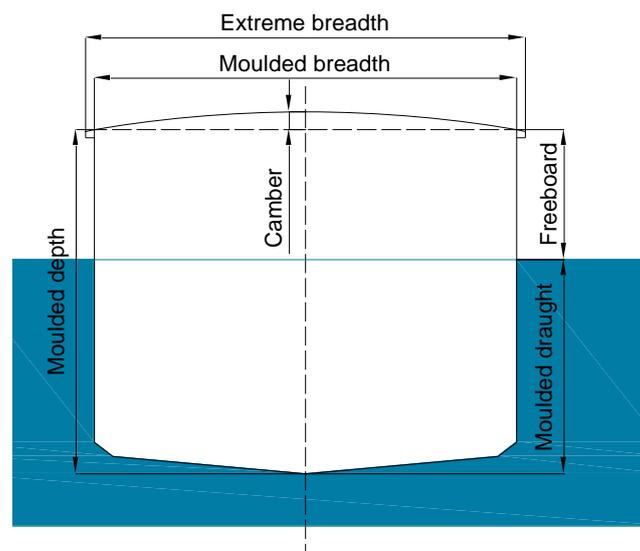


Figura I.4

II. Layout esemplari delle navi

II.1 Navi portarinfuse solide

II.1.1 Generalità

Si definiscono **portarinfuse solide (bulk carrier)** le navi da carico adibite al trasporto di carichi solidi alla rinfusa all'interno delle stive del carico. Tali navi sono un evidente esempio della specializzazione in funzione del carico trasportato, dal momento che il loro layout consente esclusivamente il trasporto di carichi alla rinfusa scorrevoli tra cui: granaglie, cemento, carbone, fosfato e minerali di ferro. Il primo elemento caratterizzante la morfologia generale di tali navi è la presenza di ampie aperture sul ponte coperta per consentire la rapida e semplice immissione del carico pagante all'interno delle stive. Tali aperture sono chiuse in navigazione mediante dei sistemi stagni detti boccaporte.



Figura II.1

II.1.2 Tipologia di carichi trasportati e fattore di stivaggio

I carichi solidi scorrevoli sono caratterizzati da un parametro detto **angolo di natural declivio** del materiale, dal momento che tali carichi, se disposti su un piano orizzontale, tendono ad assumere una condizione di riposo caratterizzata da una morfologia tronco-conica. L'angolo che la generatrice del cono forma con l'orizzontale si definisce angolo di natural declivio del materiale. Tale valore oscilla normalmente tra 20° e 35° per le tipologie merceologiche più diffusamente trasportate a bordo delle navi bulk carrier e condiziona un aspetto del layout strutturale di tali navi, come dettagliato nel seguito. Qualora la nave sia adibita al trasporto di più unità merceologiche, si assume normalmente un valore di riferimento di tale parametro pari a 30° .

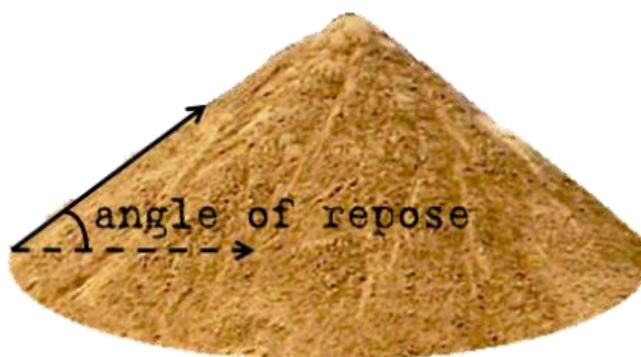


Figura II.2

Per caratterizzare la quantità di carico complessivamente trasportabile dalle portarinfuse solide si introduce un parametro detto **fattore di stivaggio** che si misura in m^3/t . Tale parametro indica i m^3 di stiva necessari per imbarcare una tonnellata di carico pagante. Ovviamente, bassi valori del fattore di stivaggio indicano il trasporto di carichi pesanti e poco voluminosi; al contrario, elevati valori del fattore di stivaggio indicano il trasporto di carichi ingombranti ma poco pesanti. L'introduzione di tale parametro consente inoltre di suddividere tutte le navi da carico, indipendentemente dai prodotti trasportati in due grandi categorie:

- **Navi da portata:** sono caratterizzate da bassi valori del fattore di stivaggio che risulta generalmente inferiore a $2 \text{ m}^3/\text{t}$;
- **Navi da volume:** sono caratterizzate da elevati valori del fattore di stivaggio che risulta normalmente superiore a $2 \text{ m}^3/\text{t}$. Tutte le navi bulk carrier rientrano nella classe delle navi da portata. Infatti, il fattore di stivaggio dei carichi scorrevoli oscilla tra un valore minimo prossimo a $0.3 \text{ m}^3/\text{t}$ per i minerali di ferro e un valore massimo prossimo a $1.7 \text{ m}^3/\text{t}$ per le granaglie.

Oltre al fattore di stivaggio, le varie unità merceologiche trasportate sono suddivise in tre gruppi in accordo all'*International Maritime Solid Bulk Cargoes Code*:

- **Gruppo A:** sostanze soggette a un possibile fenomeno di liquefazione allorquando il tasso di umidità all'interno delle stive del carico supera un valore limite detto *Transportable Moisture Limit*, con effetti dannosi per la stabilità trasversale della nave. Appartengono a tali categorie i minerali a base di rame, il nichel, lo zinco e il carbone;
- **Gruppo B:** appartengono a tale categoria prodotti chimici alla rinfusa potenzialmente, infiammabili, radioattivi o corrosivi. Tale tipologia di materiali è tuttavia scarsamente presente per tale tipologia di navi;
- **Gruppo C:** rientrano in tale categoria tutte le unità merceologiche non appartenenti alle categorie precedenti. Tale tipologia di carico è particolarmente diffusa per le navi bulk carrier.

Si definisce, infine, **portata massima trasportabile o portata lorda (dead weight)** della nave la somma del carico pagante trasportato e di tutti i consumabili di bordo. Tale grandezza si misura in tonnellate e si indica con l'acronimo DWT. La quantità massima di carico pagante trasportabile dalla nave si definisce netweight e si indica con l'acronimo NWT.

II.1.3 Elementi morfologici fondamentali

Gli elementi morfologici fondamentali delle portarinfuse solide sono cinque, ovvero:

- Ponte di coperta discontinuo dotato di ampie boccaporte scorrevoli per facilitare le operazioni di imbarco - sbarco del carico pagante;
- Disposizione delle sovrastrutture della nave all'estrema poppa;
- Ponte di coperta longitudinalmente continuo solo in corrispondenza dei camminamenti laterali di dritta e sinistra. Tali camminamenti sono connessi tra loro mediante porzioni di ponte ubicate tra una boccaporta e quella contigua dette cross deck;
- Numero di stive del carico normalmente dispari per motivi di assetto longitudinale della nave. Le stive sono generalmente numerate in modo progressivo da prora verso poppa;
- Fianchi a murata verticale e forme di carena piene per incrementare la capacità di carico della nave e, dunque, la sua portata massima trasportabile.

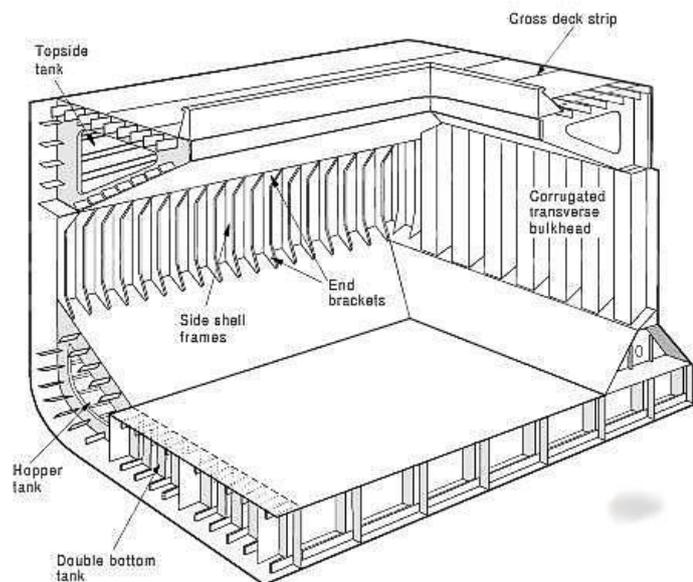


Figura II.3

Inoltre, le stive del carico sono caratterizzate da un piano di appoggio orizzontale detto **cielo del doppio fondo** che non solo costituisce il fondo della stiva del carico ma involupa superiormente un volume stagno detto doppiofondo della nave. All'interno del doppiofondo vengono normalmente imbarcati i consumabili, in particolare nafta leggera o pesante. Il fondo della stiva si connette al fianco mediante una superficie subverticale generalmente inclinata di 45° rispetto all'orizzontale detto scivolo basso. Tale elemento racchiude superiormente un ulteriore volume stagno detto **cassa bassa (hopper tank)**. Superiormente le strutture del fianco e del ponte sono collegate tra loro mediante un ulteriore elemento subverticale detto scivolo alto. Lo scivolo alto racchiude inferiormente un ulteriore volume stagno detto **cassa alta (top side tank)**. L'inclinazione dello scivolo alto sull'orizzontale è normalmente pari all'angolo di natural declivio del carico trasportato. Qualora la nave è adibita al trasporto di più unità merceologiche, l'inclinazione dello scivolo alto è assunta pari a 30° .

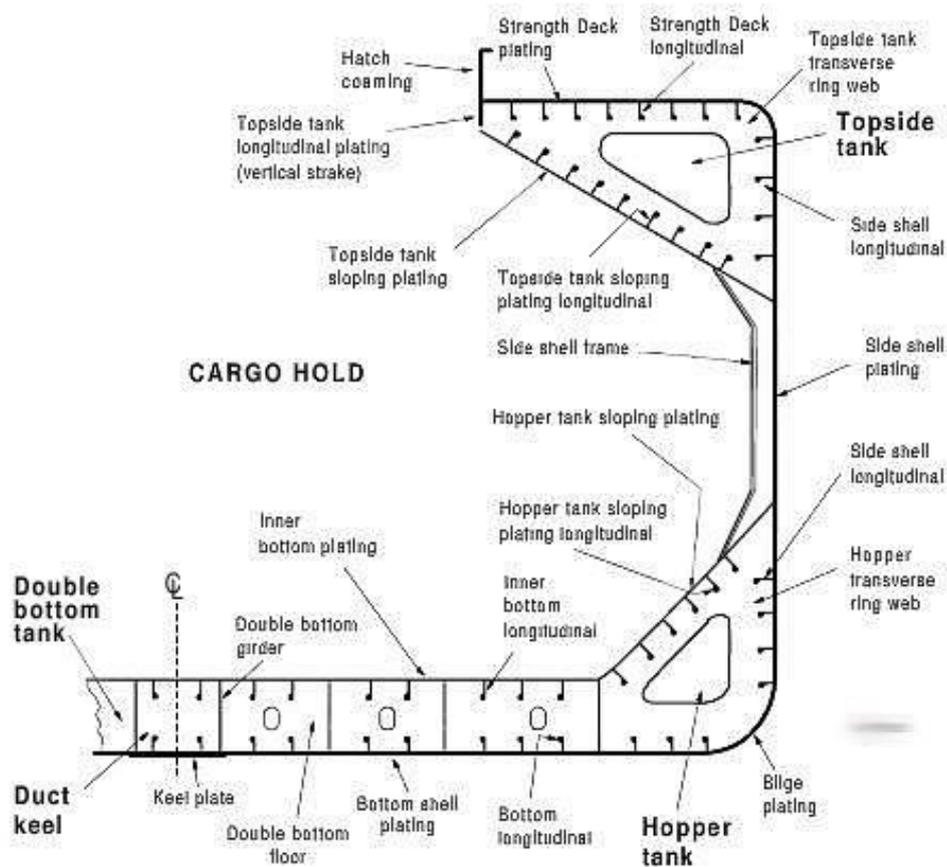


Figura II.4

Il ruolo dello scivolo basso è quello di consentire l'addensamento del carico scorrevole verso il centro della stiva facilitando in tal modo le relative operazioni di sbarco. Lo scivolo alto, invece, consente di evitare la formazione di volumi di stiva vuoti durante le operazioni di imbarco del carico pagante, aumentando in tal modo la capacità di carico della nave e garantendo la saturazione completa del volume nominale della stiva. Affinché la stiva del carico sia omogeneamente riempita è necessario che l'inclinazione dello scivolo alto sia quanto più prossima all'angolo di natural declivio del carico pagante. Si sottolinea che durante la navigazione il carico subisce ulteriori fenomeni di assestamento nella stiva realizzando nella parte superiore dei volumi vuoti. Per tale motivo, le stive del carico vengono caricate in hopper over load, ovvero saturando anche il volume delimitato dalle mastre delle boccaporte.

Ogni stiva del carico è separata da quella contigua mediante una **paratia trasversale stagna (transverse bulkhead)**. Quest'ultima è collegata inferiormente al fondo della stiva mediante un elemento trapezoidale detto **caissonetto basso** e superiormente al ponte di coperta mediante un ulteriore elemento strutturale detto **caissonetto alto**.

I volumi del doppiofondo sono normalmente adibiti allo stoccaggio di idrocarburi (nafta pesante). I volumi delle casse alte e basse ospitano normalmente acqua di mare, detta **acqua di zavorra (ballast water)**, imbarcata per appesantire la nave incrementandone il dislocamento quando la stessa viaggia priva di carico pagante. Si rammenta infatti che tutte le navi bulk-carrier effettuano normalmente il viaggio di partenza con carico pagante e il viaggio di ritorno prive di carico utile. Essendo inoltre

tali navi da portata, è necessario incrementare l'immersione per migliorare le caratteristiche di stabilità trasversale, garantire un adeguato battente idrostatico sul propulsore e ottimizzare le caratteristiche di tenuta della nave al mare.

II.1.4 Classificazione

Le navi rinfusiere solide si classificano in due grandi categorie:

- **General purpose dry bulk carrier:** rinfusiere solide di natura generalista, a loro volta suddivise in due tipologie principali ovvero bulk carrier adibite al trasporto generalista di rinfuse solide e ore carrier adibite al solo trasporto di minerali alla rinfusa;
- **Specialized dry bulk-carrier:** navi specializzate nel trasporto di unità merceologiche specifiche, tra cui si annoverano le timber carrier per il trasporto di legnami sfusi e le cement carrier per il trasporto di cemento.

In funzione delle caratteristiche dimensionali e della portata lorda tali navi si classificano nelle seguenti categorie:

- **Mini Bulk Carrier:** navi di piccole dimensioni con DWT compreso tra 3000-24000 t normalmente adibite a navigazione costiera in taluni casi con appoggio di navi maggiori;
- **Handysize:** navi con DWT tra 24000-35000 t che possono entrare sostanzialmente in tutti i porti;
- **Handymax:** navi con DWT fino a 50000 t che a causa della loro immersione sono sottoposte ad alcune limitazioni in merito all'ingresso in porto;
- **Panamax:** navi particolarmente diffuse con DWT fino a 80000 t le cui dimensioni sono prossime ai valori limite per il passaggio attraverso le chiuse del canale di Panama.
- **Capesize:** navi con DWT fino a 180000 t e parametri dimensionali che non consentono il passaggio attraverso il Canale di Panama. In tale categoria si annoverano due sottocategorie: le navi **Suezmax** e **Kamsarmax**. Le prime sono caratterizzate da una immersione massima non superiore a 20.0 m, che consente l'attraversamento del canale di Suez. Le seconde hanno parametri dimensionali al limite per l'ingresso nel porto di Kamsar in Guinea Equatoriale;
- **Very Large Bulk Carrier:** navi con DWT superiore a 180000t, tra cui si distinguono 3 sottocategorie: navi **Malaccamax**, **Dunkirkmax**, **Newcastlemax**. Le prime hanno un'immersione massima di 20.0 m che consente il transito attraverso lo stretto di Malacca. Le seconde e le terze hanno una larghezza massima rispettivamente di 45.0 e 47.0 m per consentirne l'ingresso nei porti di Dunkirk in Francia e Newcastle in Australia.

II.1.5 Il Canale di Panama

Le portarinfuse solide di tipo Panamax hanno parametri dimensionali al limite per il passaggio attraverso le chiuse del canale di Panama. Il canale di Panama è una linea d'acqua artificiale che connette l'Ocean Atlantico con l'Ocean Pacifico attraverso l'istmo di Panama, consentendo alle navi che transitano tra le coste orientali e occidentali del Nord America di accorciare la navigazione di circa 15000 km. La

costruzione del canale, lungo 77 km, fu terminata nell'agosto del 1914. Il canale è dotato di un sistema di chiuse che consentono alle navi di superare un dislivello di circa 26 m in corrispondenza del lago Gatun. L'attraversamento del canale dura tra 8 e 10 ore. I parametri dimensionali delle navi devono essere compatibili con le dimensioni delle chiuse attraverso cui devono transitare.

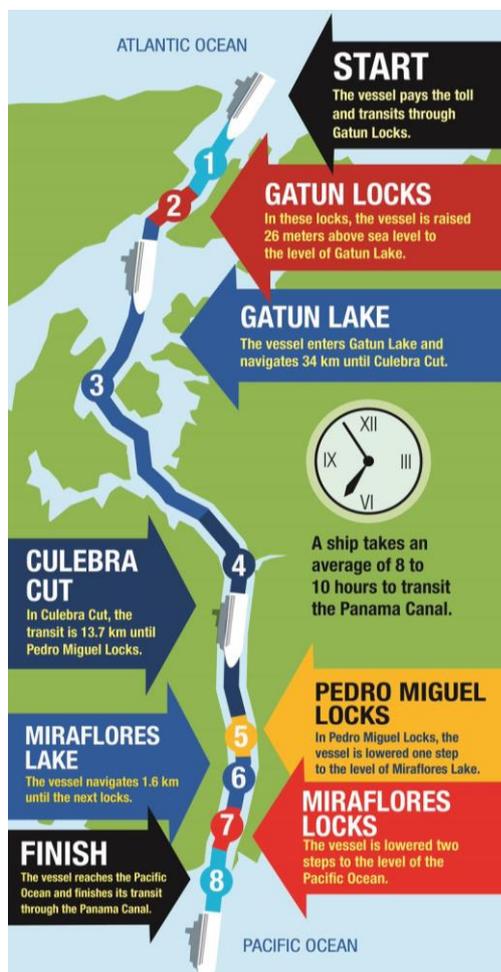


Figura II.5

Parametri	Chiusa	Nave
Lunghezza (m)	304.8	294.0
Larghezza (m)	33.5	32.3
Profondità/immersione (m)	12.5	12.0

Tabella II.1

II.1.6 Lo stretto di Suez

Le portarinfuse solide di tipo Suezmax hanno parametri dimensionali al limite per il passaggio attraverso il canale di Suez. Il canale di Suez è una via d'acqua artificiale lunga circa 200 km che collega a sud Suez sul Mar Rosso con Porto Said sul Mar Mediterraneo. Il canale fu inaugurato il 17 novembre 1869 ed ha subito nel corso della storia diverse vicende tra cui la nazionalizzazione da presidente egiziano Nasser il 26 luglio 1956 e la chiusura dal 1967 al 5 giugno 1975 in seguito alla Guerra dei sei giorni tra Israele da una parte, Egitto Siria e Giordania dall'altra. Il canale ha inoltre subito un'importante opera di ampliamento, inaugurata il 6 agosto 2015, che attualmente consente il transito di due navi transitanti in direzione opposta. Il tempo medio di percorrenza è di circa 15 h. Le navi in transito devono soddisfare un requisito dimensionale in termini di area della sezione trasversale immersa che non deve eccedere il limite di 1006 m² unitamente ad una immersione massima di 20.1 m. Inoltre,

la distanza verticale tra il piano di galleggiamento della nave e il punto più alto delle sovrastrutture non deve eccedere il valore limite di 68.0 m per consentire alle navi in transito il passaggio sotto il Suez Canal Bridge posto 70.0 m al di sopra del livello dell'acqua nel canale.



Figura II.6

II.2 Navi portarinfuse liquide

II.2.1 Generalità

Le navi **portarinfuse liquide (oil tanker)** sono navi adibite al trasporto di greggio o di prodotti della raffinazione petrolifera. Nel primo caso tali navi si definiscono crude oil tanker, mentre nel secondo caso product oil tanker. Alcuni aspetti morfologici tra cui le sovrastrutture poste a poppa, le forme di carena piene e un numero dispari di stive del carico sono comuni alla precedente tipologia. Tuttavia, a differenza delle navi bulk carrier si caratterizzano per la presenza di un ponte di coperta privo di aperture per l'immissione del carico pagante in stiva.

Tali navi si caratterizzano, inoltre, per la presenza di un **doppio scafo continuo** in corrispondenza delle stive del carico, in accordo all'Annex I della Marpol 73/78, al fine di prevenire possibili sversamenti in mare di greggio in seguito ad eventi di collisione o incaglio. Tale requisito strutturale è diventato obbligatorio per tutte le navi in seguito ad alcuni disastri ecologici causati da grandi navi cisterna tra cui si ricordano:

- **Torrey Canyon (1967):** incaglio al largo delle isole di Scilly con sversamento in mare di 60000 t di greggio;

- **Amoco Cadiz (1978):** collisione al largo della costa bretone con sversamento in mare di 230000 t di greggio;
- **Exxon Valdez (1989):** incaglio al largo delle coste dell'Alaska con sversamento in mare di 36000 t di greggio.



Figura II.7

II.2.2 Elementi morfologici fondamentali

Il layout generale di tale tipologia di navi prevede alcuni elementi morfologici tipici. In particolare le stive del carico sono separate dai fasciami del fondo mediante un volume stagno detto doppio fondo e lateralmente dai fasciami del fianco mediante un ulteriore volume stagno detto doppio fianco. L'unione del doppio fondo e doppio fianco realizza il doppio scafo della nave. Le stive del carico sono inoltre suddivise longitudinalmente mediante una o due paratie longitudinali di stiva per limitare problematiche prevalentemente legate alla stabilità trasversale della nave.



Figura II.8

II.2.3 Classificazione

In base ai parametri dimensionali tipici, tali navi sono suddivise in 5 categorie:

- **Panamax:** navi con DWT fino a 80000t che possono transitare attraverso il canale di Panama;

- **Aframax:** navi con *DWT* fino a 120000t normalmente caratterizzate per la loro economicità operativa secondo il sistema di classificazione *AFRA* della compagnia Shell Oil;
- **Suezmax:** navi con *DWT* fino a 200000t e dimensioni al limite per il passaggio attraverso il canale di Suez.
- **VLCC (Very Large Crude Carrier):** navi con *DWT* fino a 320000t normalmente adoperate per il trasporto di greggio in navigazioni internazionali lunghe;
- **ULCC (Ultra Large Crude Carrier):** navi con *DWT* fino a 550000t oggi poco presenti.

II.3 Navi portacontenitori

II.3.1 Generalità

Si definiscono **navi portacontenitori (containership)** le navi adibite al trasporto di carico pagante di diversa natura e variamente imballato all'interno di unità modulari dette **contenitori (container)**. Tali navi rappresentano l'evoluzione delle navi da carico pre-anni '50, dal momento che il trasporto in unità modulari consente di: (i) ridurre il tempo richiesto per le operazioni di imbarco/sbarco del carico pagante, (ii) incrementare la capacità di carico della nave e (iii) uniformare le modalità di trasporto dopo lo sbarco in porto del carico pagante nell'ottica di una movimentazione di tipo intermodale delle merci



Figura II.9

Il contenitore è una unità di carico parallelepipedica, avente una sezione trasversale larga 8' e alta 8'6'' e lunghezza variabile tra 20' e 40', diffusamente utilizzato per i trasporti intermodali soprattutto nei paesi economicamente avanzati. Il contenitore più comune in ambito navale è il **20' heavy tested container for heavy goods**, avente una lunghezza di 20', un peso proprio di 2400 kg, un peso netto trasportabile di 28080 kg e dunque una massa lorda massima di 30480 kg. Tenendo conto della variabilità delle unità merceologiche trasportate, la capacità delle navi portacontenitori si misura in **TEU (Twenty-foot Equivalent Unit)** ovvero in base al numero massimo di contenitori trasportabili di lunghezza pari a 20'.



Figura II.10

II.3.2 Elementi morfologici fondamentali

Le stive del carico delle navi portacontenitori presentano boccaporte di ampie dimensioni che si estendono trasversalmente per la quasi totalità della larghezza della nave. Le navi sono dotate di un doppiofondo continuo che funge da base per i contenitori e di un doppiofianco all'interno del quale sono disposti dei camminamenti longitudinali. La parte superiore del doppiofianco è irrigidita con diaframmi trasversali per incrementare la robustezza longitudinale della nave. All'interno delle stive sono disposti dei binari verticali, detti baie, che fungono da guida per l'impilaggio dei contenitori e che consentono di evitare qualunque spostamento del carico. Le dimensioni della sezione trasversale sono multipli interi della larghezza del contenitore, dal momento che tali unità trasportano carichi di tipo modulare aventi dimensioni standard e dunque volumi di stiva che non siano in grado di ospitare una singola unità di carico sarebbero del tutto inutilizzabili.

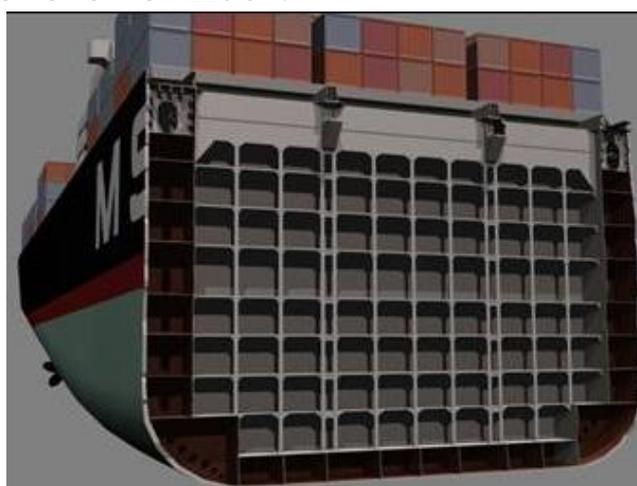


Figura II.11

II.3.3 Classificazione

In base al numero di contenitori trasportati, tali navi si classificano in:

- **Panamax:** sono navi costruite prevalentemente negli anni '80 con una capacità di carico normalmente compresa tra 3000 e 4000 TEU;
- **Post-panamax:** sono navi costruite prevalentemente negli anni '90 con una capacità di carico normalmente compresa tra 4000 e 5000 TEU;

- **Suezmax:** sono navi costruite prevalentemente negli anni duemila con una capacità di carico normalmente compresa tra 5000 e 10000 TEU;
- **Post-suezmax:** sono le navi di ultima generazione con una capacità di carico normalmente compresa tra 10000 e 20000 TEU.

II.4 Navi gasiere

II.4.1 Generalità

Si definiscono **navi gasiere (liquefied gas carrier)** le unità che trasportano idrocarburi gassosi liquefatti a bassa temperatura, ad elevata pressione o mediante una combinazione delle due tecniche. Il carico pagante è trasportato all'interno di serbatoi strutturali indipendenti dallo scafo aventi geometria sferica, cilindrica, bilobata o prismatica. Tali navi si classificano in due grandi categorie:

- **LNG (Liquefied natural gas) carrier:** trasportano il gas naturale, ovvero una miscela di metano con frazioni superiori al 95% ed altri idrocarburi tra cui l'etano ed il propano. Tali navi, dette metaniere, trasportano il carico alla sua temperatura di ebollizione di -163°C in corrispondenza della quale la densità è di circa 0.5 t/m^3 ;
- **LPG (Liquefied petroleum gas) carrier:** trasportano il gas di petrolio, ovvero una miscela di propano, butano e in percentuale minore di propano. La densità del prodotto varia tra 0.58 e 0.97 t/m^3 . Se trasportato a temperatura ambiente, il gas di petrolio è trasportato ad una pressione di circa 17 bar. Se trasportato a pressione atmosferica, invece, è trasportato ad una temperatura di circa -48°C .



Figura II.12

II.4.2 Elementi morfologici fondamentali

In accordo all'*International Gas Carrier Code*, i serbatoi per lo stoccaggio del gas liquefatto si classificano nelle seguenti categorie, di cui le prime due sono le più diffuse:

- **Cisterne indipendenti:** sono completamente autoportanti e non sono di tipo strutturale né contribuiscono alla robustezza dello scafo. Si classificano in tre diversi tipi (A, B e C) in funzione della pressione di progetto del gas liquefatto. Le cisterne di tipo A sono progettate per una pressione massima di 0.7 bar e, pertanto, i carichi sono sempre refrigerati. Le cisterna è separata dallo scafo

esterno mediante una intercapedine generalmente riempita di materiale isolante. Le cisterne di tipo B sono simili a quelle di tipo A ma hanno normalmente forma sferica e generalmente una delle due calotte è posizionata al di sopra del ponte di coperta della nave. Le cisterne di tipo C sono progettate per una pressione massima generalmente superiore a 2 bar e normalmente compresa tra 5 e 7 bar. Si caratterizzano per una forma tipicamente bilobata. La superficie interna della cisterna è anche detta *barriera primaria*, mentre i fasciami del doppioscavo sono anche detti *barriera secondaria*.

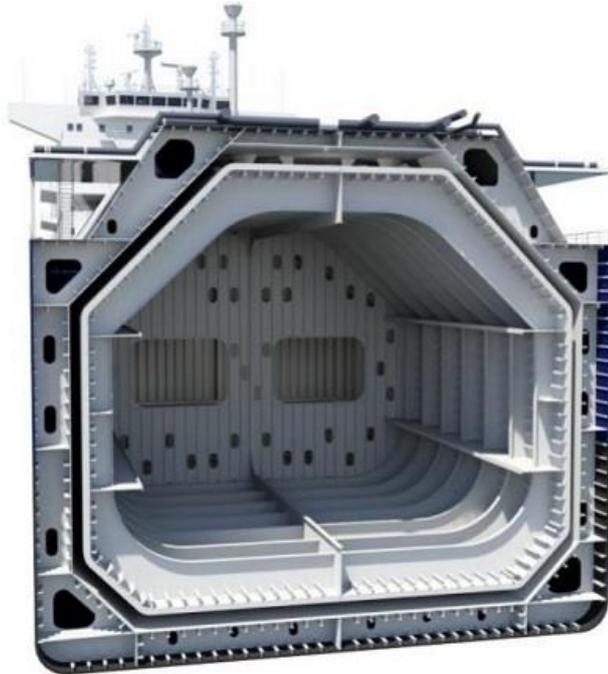


Figura II.12

- **Cisterne membranali:** tale cisterne presentano una barriera primaria molto sottile, detta membrana, che è in grado di sopportare espansioni o contrazione termiche senza generare sollecitazioni sulla trave-nave. Tali cisterne sono supportate dal sistema di isolamento presente tra la barriera primaria (membrana) e quella secondaria (scafo interno della nave). Esistono due diverse tipologie, che prendono il nome dai produttori che le hanno sviluppate, ovvero: (i) *Gaz Transport* e (ii) *Technigaz*. Il primo sistema è costituito da una barriera primari di *Invar* avente spessore pari a 0.5-0.7 mm, collegata ad un prima barriera di materiale isolante di spessore 200-230 mm. Successivamente è presente un secondo strato di *Invar* e un secondo strato isolante di spessore variabile tra 200 e 300 mm. Si rammenta che l'*Invar* è una lega metallica composta principalmente da ferro (64%) e nichel (36%) con tracce di carbonio e cromo, particolarmente adoperata per il trasporto di materiali criogenici grazie al suo basso coefficiente di dilatazione termica. Il sistema a membrana della *Technigaz*, invece, presenta una barriera primaria di spessore pari a circa 1.2 mm in acciaio inossidabile con configurazione a nido d'ape per consentire l'espansione e la contrazione della membrana stessa. Successivamente è presente uo strato isolante in poliuretano di spessore pari a circa 160 mm rinforzati con pannelli in

fibra di vetro o in alluminio, a loro volta ancorati alle strutture del fianco interno della nave.

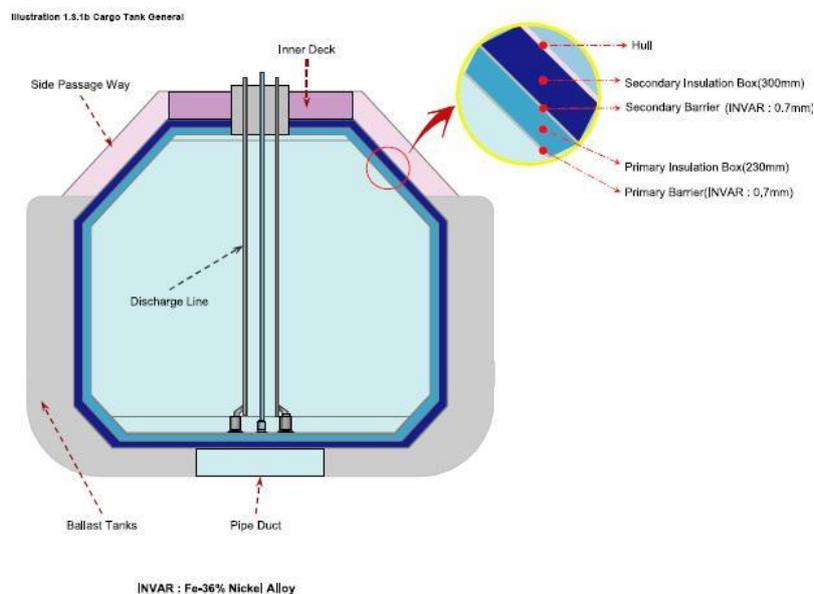


Figura II.13

- **Cisterne semimembranali:** sono una variazione delle precedenti, dal momento che la barriera primaria è più spessa rispetto a quella presente nel sistema a membrana. In particolare tale tipologie di cisterna è autoportante quando vuota ma non lo è in condizioni di caricazione, dal momento che le elevate pressioni indotte dal carico pagante provocano una deformazione della barriera primaria che, attraverso lo strato isolante, è trasferita alle strutture della nave.
- **Cisterne integrali:** sono cisterne di tipo strutturale generalmente non ammesse allorquando la temperatura di stoccaggio del carico in stiva è al di sotto di -10°C .

II.5 Navi chimichiere

II.5.1 Generalità

Si definiscono **navi chimichiere** (*chemical tanker*) le navi specializzate per il trasporto di prodotti chimici alla rinfusa, il cui sviluppo risale ai primi anni '50. Le merci trasportate sono spesso pericolose in quanto infiammabili, nocive per la salute del personale o capaci di inquinare l'ambiente. Pertanto, tali navi sono sottoposte a specifiche normative attinenti il layout complessivo delle stive del carico, i materiali adoperati e i requisiti impiantistici, dettagliate nell'*International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Dangerous Chemicals in Bulk* (IBC Code). In base al grado di rischio per la salute umana o l'ambiente marino, i prodotti chimici sono classificati in 4 categorie, in base al loro livello di rischio, valutato in termini di bioaccumulo e contaminazione, danni alle risorse viventi, pericolo per la salute umana, riduzione delle amenità:

- **Categoria X:** sostanze ad elevato rischio;
- **Categoria Y:** sostanze a moderato rischio;
- **Categoria Z:** sostanze a basso rischio;

- **Categoria OS:** sostanze per cui non sono previsti particolari requisiti strutturali o gestionali della nave.



Figura II.14

II.5.2 Classificazione

In funzione del livello di pericolosità dei prodotti trasportati, le navi chimichiere si classificano in tre diverse tipologie, con livello decrescente di sicurezza:

- **ST1:** navi dotate di doppiosc scafo continuo in corrispondenza delle stive del carico;
- **ST2:** navi dotate di doppiosc scafo continuo in corrispondenza delle stive del carico con larghezza del doppiosc fianco minore rispetto a quella della categoria precedente;
- **ST3:** navi per le quali non è previsto il doppiosc scafo.

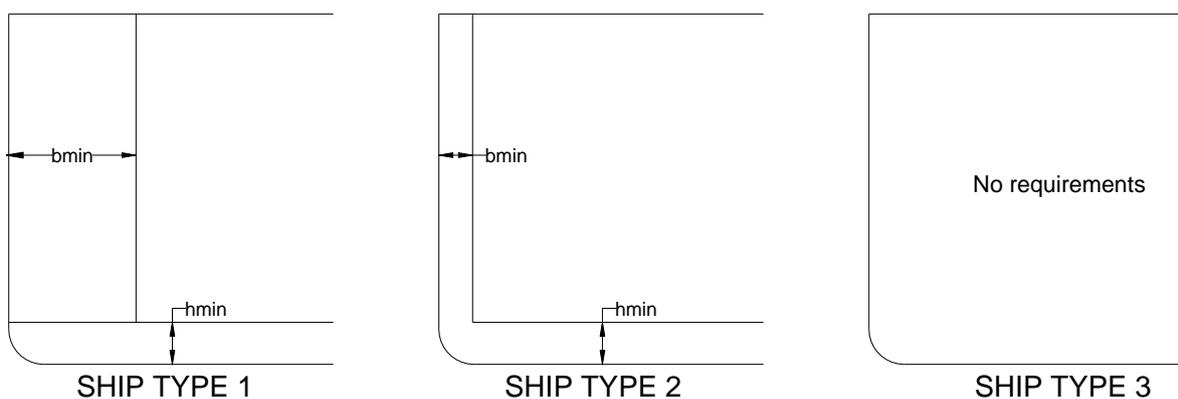


Figura II.15

	Categoria 1	Categoria 2	Categoria 3
Doppio fianco	$b_{min} = \min \left\{ 11.5; \frac{B}{5} \right\}$	$b_{min} = 0.76 \text{ m}$	N.R.
Doppiofondo	$h_{min} = \max \left\{ 0.76; \min \left\{ 6.0; \frac{B}{15} \right\} \right\}$		N.R.

Tabella II.2

II.6 Navi traghetto

II.6.1 Generalità

Si definiscono **navi traghetto (ro-ro/pax ship)** le navi adibite al trasporto misto di passeggeri e veicoli su gomma. La capacità di carico si valuta in termini di numero massimo di passeggeri trasportabili e metri lineari di veicoli imbarcabili all'interno dei ponti garage. L'acronimo «ro-ro» significa *roll-on/roll-off* ad indicare la tipologia di movimentazione dei carichi su gomma. Questi ultimi sono normalmente imbarcati su più ponti, in funzione del carico-asse dei veicoli e dell'altezza massima di interponte. In genere gli autoarticolati sono disposti sui ponti inferiori sia perché in grado di sostenere carichi superiori, sia per incrementare la stabilità statica della nave. Le auto, invece, sono disposte normalmente sui ponti superiori. Le sovrastrutture, invece, ospitano in genere i ponti passeggeri.



Figura II.16

III. Materiali da scafo

III.1 Prova di trazione

III.1.1 Generalità

Si definisce caratteristica meccanica di un materiale l'insieme delle sue proprietà che ne caratterizzano il comportamento sotto l'azione di un sistema di forze di tipo statico o dinamico. La quasi totalità delle prove meccaniche viene eseguita su un campione di materiale da testare di forma opportuna detto **provino** che viene normalmente distrutto al termine della prova. In base alla modalità di applicazione del carico, le prove meccaniche si classificano in 3 grandi tipologie:

- **Prove statiche:** il carico viene incrementato in modalità quasi statica, ovvero molto lentamente nel tempo. A tale tipologia di prove appartiene la prova di trazione;
- **Prove dinamiche:** il carico è normalmente di natura impulsiva, ovvero viene incrementato molto rapidamente nel tempo. A tale tipologia di prove appartiene la prova di resilienza;
- **Prove cicliche:** il carico viene variato periodicamente nel tempo in modulo e direzione per testare la capacità del materiale a resistere a carichi variabili nel tempo. A tale tipologia di prove appartengono tutte le prove a fatica.

Tutte le prove meccaniche vengono eseguite ad una temperatura nominale di 20 °C in accordo ad uno specifico standard realizzativo dettagliato normalmente dalle norme UNI EN ISO.

III.1.2 Dimensioni e forma dei provini

Lo scopo della prova, normata dalla UNI EN ISO 6892-1:201, è quello di determinare il diagramma tensione-deformazione del materiale di cui è realizzato il provino. La macchina è costituita da due morse ad azionamento meccanico all'interno delle quali si agganciano le estremità del provino.



Figura III.1

I provini adoperati nella prova di trazione presentano un tratto a sezione trasversale costante di lunghezza L_c . All'interno del tratto a sezione costante è presente un secondo tratto, detto **tratto utile**, di lunghezza L_0 sul quale sono posti degli estensimetri per monitorare l'allungamento del provino sotto l'azione di un carico assiale di intensità crescente. All'estremità del provino sono posizionati due ringrossi, detti **teste**, connessi al tratto a sezione costante mediante raggi di raccordo per evitare concentrazioni di tensione in seguito alla variazione della sezione resistente del provino.

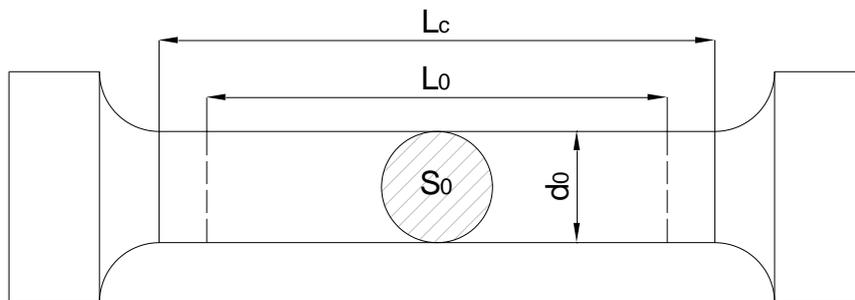


Figura III.2

Le dimensioni della sezione trasversale del provino e del tratto utile sono normalmente dipendenti. Pertanto, un provino si definisce proporzionale allorché la lunghezza del tratto utile L_0 è pari a:

$$L_0 = k\sqrt{S_0}$$

avendo indicato con S_0 l'area della sezione trasversale del provino e con k una costante uguale a 5.65 o 11.30. Poiché $S_0 = \pi d_0^2/4$, la precedente relazione può essere riscritta come segue:

$$\begin{aligned} L_0 &= 5d_0 \quad (k = 5.65) \\ L_0 &= 10d_0 \quad (k = 11.30) \end{aligned}$$

Inoltre devono essere soddisfatte le due seguenti condizioni:

$$\begin{aligned} L_c &\geq L_0 + \frac{d_0}{2} \\ r &\geq 0.75d_0 \end{aligned}$$

avendo indicato con r il raggio di raccordo tra il tratto a sezione costante e le teste.

III.1.3 Diagramma forza-allungamento

Lo scopo della prova è quello di costruire il diagramma di forza-allungamento del provino $F - \Delta L$, sottoponendo ad un carico via via crescente e misurando l'allungamento del tratto utile. Le teste del provino vengono fissate ai morsetti di serraggio della macchina di prova e il carico viene lentamente incrementato. In Figura III.3 è rappresentato un diagramma forza-allungamento $F - \Delta L$ tipico di un materiale a comportamento duttile, sul quale sono evidenziati i seguenti punti caratteristici:

- **Carico al limite di proporzionalità F_l :** fino a tale valore sussiste una relazione lineare $F = k\Delta L$ tra il carico applicato e l'allungamento del provino. Arrestando la prova ad un valore del carico immediatamente inferiore a quello al limite di proporzionalità, il provino ritorna nella sua configurazione indeformata;
- **Carico al limite di snervamento superiore F_{eH} :** tale valore rappresenta il carico oltre il quale le deformazioni del provino diventano permanenti. Dopo il

raggiungimento di tale valore, si nota una rapida diminuzione ed una successiva oscillazione del carico, legata a contrazioni elementari del materiale. Inoltre si formano sulla superficie esterna del provino delle striature inclinate a 45° rispetto alla direzione di applicazione del carico, dette linee di Lüders, in corrispondenza delle quali avverrà la rottura del provino;

- **Carico al limite di snervamento inferiore F_{eL}** : è il valore minimo del tratto oscillante prima dell'ulteriore incremento delle caratteristiche meccaniche in ambito plastico;
- **Carico massimo o di rottura F_M** : è il carico massimo raggiunto dal provino dopo il quale si fa una diminuzione del carico dovuta al fenomeno della strizione, ovvero alla riduzione locale della sezione trasversale. Pertanto, in seguito alla strizione la forza necessaria per produrre ulteriori allungamento risulta minore di quella richiesta qualora la sezione si mantenesse costante;
- **Carico ultimo F_U** : è il carico in corrispondenza del quale si verifica la rottura del provino.

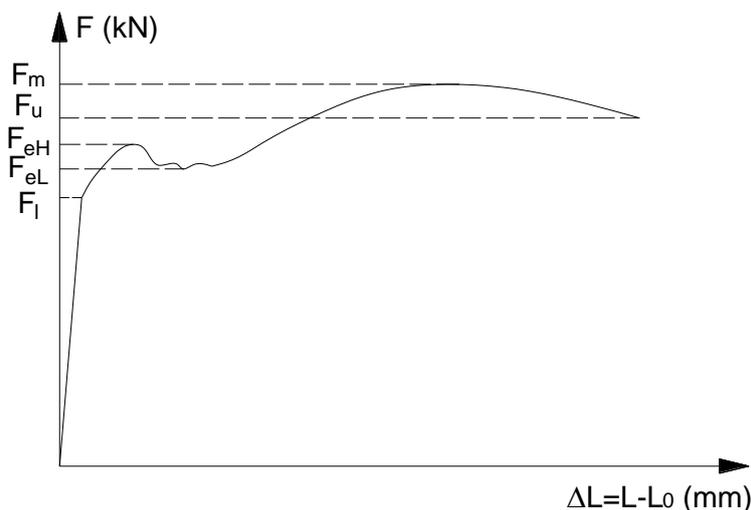


Figura III.3

III.1.4 Diagramma tensione-deformazione

Il diagramma $F - \Delta L$ si ricava sperimentalmente ma non consente di ottenere informazioni soltanto sul materiale dal momento che gli allungamenti assoluti ΔL dipende dalla lunghezza iniziale del provino L , mentre l'entità dei carichi assiali da applicare per rompere il provino dipende all'area della sua sezione trasversale S_0 . Per rendere la prova indipendente dalle caratteristiche geometriche del provino e dipendente esclusivamente dalle caratteristiche meccaniche del materiale con cui è realizzato il provino si definiscono due parametri aggiuntivi:

- **Tensione o carico unitario $\sigma = \frac{F}{S_0}$** : è il rapporto tra la forza applicata e l'area della sezione indeformata del provino;
- **Deformazione $\varepsilon = \frac{L-L_0}{L_0}$** : è il rapporto tra l'allungamento del provino, valutato sotto l'azione di una assegnata forza applicata, e la lunghezza della configurazione indeformata.

Dopo aver fatto tali sostituzioni il diagramma $F - \Delta L$ si trasforma nel diagramma $\sigma - \varepsilon$ (tensione-deformazione). Tutti i carichi precedentemente introdotti possono essere similmente riportati nel nuovo diagramma sigma-epsilon sostituendo alla parola carico la parola tensione. Inoltre, la relazione di linearità valida fino al carico al limite di proporzionalità viene riscritta come segue:

$$F = k\Delta L \Rightarrow \sigma = E\varepsilon$$

avendo indicato con E il **modulo di Young** del materiale, pari a 208 GPa per gli acciai da scafo.

III.1.5 Esecuzione della prova

Le modalità di esecuzione della prova sono di due tipi:

- **Controllo della velocità di incremento del carico unitario:** il carico unitario viene progressivamente incrementato con una velocità dipendente dal modulo di Young del materiale, come indicato in Tabella 1;
- **Controllo della velocità di deformazione del provino:** l'incremento del carico viene variato con continuità monitorando la velocità di deformazione del provino che non deve superare assegnati valori limite, come indicato in Tabella 2.

Modulo di Young	MPa/s	
	min	max
<150 GPa	2	20
≥150 GPa	6	60

Tabella III.1

Carichi unitari	m/s
fino a F_{eH}	0.00025
oltre F_{eH}	0.00670

Tabella III.2

III.2 Prova di resilienza

III.2.1 Generalità

La prova di resilienza viene svolta in accordo alla norma UNI EN ISO 148-1 e ha come scopo quello di studiare la resilienza dei materiali, ovvero la resistenza a rottura fragile per orto-flessione. La prova consiste nel rompere con un solo colpo una provetta intagliata in mezzeria e poggiata su due sostegni. L'energia assorbita, espressa in J, è un indice della resistenza agli urti del materiale ovvero della sua resilienza. Tale parametro è fortemente dipendente dalla temperatura. In generale, quanto più è bassa la temperatura di prova tanto più il materiale diventa fragile, ovvero tanto minore risulta la quantità di energia necessaria per romperlo.

La prova di resilienza viene eseguita con una macchina di prova detta pendolo di Charpy che nella sua configurazione di massima è costituito da: (1) un basamento dotato di un sistema di fermo del provino; (2) un'asta incernierata e dotata di martello alla sua estremità e (3) una scala graduata per misure angolari.

La prova consiste nel lasciar libero il sistema asta-coltello che impattando contro il provino ne provoca la rottura. In seguito alla rottura tale sistema supera il provino e giunge in una nuova configurazione a quota minore rispetto alla precedente. Lo scopo della prova è quello di valutare l'energia assorbita dal provino durante l'urto che in assenza di cause dissipative esterne, è pari alla variazione di energia potenziale del

sistema asta-coltello tra la posizione iniziale prima dell'urto e la posizione finale dopo l'urto.



Figura III.4

III.2.2 Dimensioni e forma dei provini

Per stimolare la rottura fragile del provino che si manifesta attraverso la propagazione della frattura all'interno del materiale, lo stesso deve essere opportunamente realizzato e deve avere un intaglio nella sua sezione di mezzeria, posizionato al lato opposto rispetto a quello da dove viene inizialmente urtato. I provini hanno una lunghezza di 55 mm e una sezione trasversale di area pari a 100 mm².

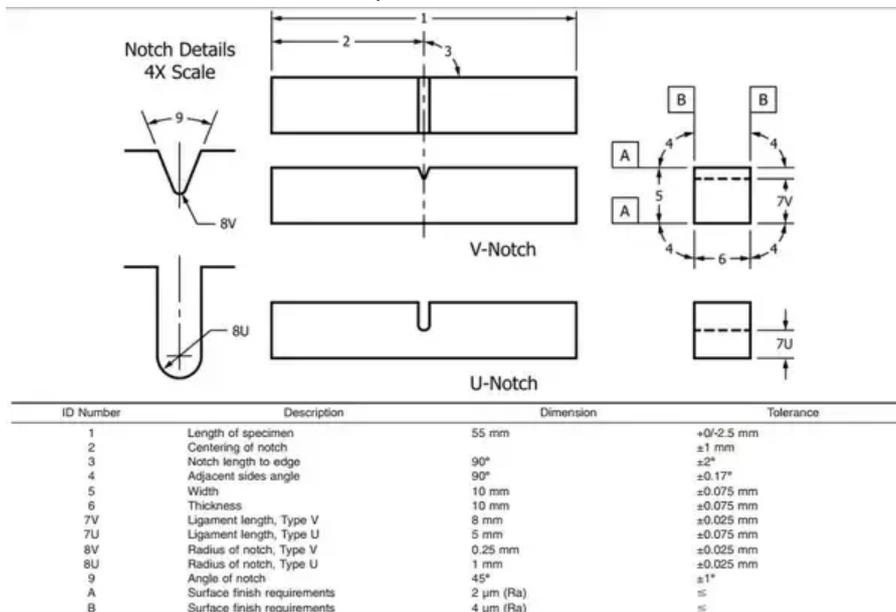


Figura III.5

Come detto gli stessi sono intagliati in corrispondenza della sezione di mezzeria con un taglio a V o ad U. La geometria dell'intaglio presenta le seguenti caratteristiche:

- **Intaglio a V (V Notch):** l'angolo di apertura dell'intaglio è 45° con una profondità massima di 2 mm. La sezione trasversale si riduce da 100 mm² a 80 mm² in corrispondenza della sezione di intaglio;

- **Intaglio ad U (U Notch):** ha una profondità di 5 mm e un raggio di raccordo al fondo dell'intaglio di 1 mm. La sezione trasversale si riduce da 100 mm² a 50 mm².

III.2.3 Esecuzione della prova

La prova viene eseguita come dettagliato di seguito:

- L'asta girevole ha in posizione di riposo il baricentro ad una altezza corrispondente alla posizione del provino;
- Si porta l'asta ad una altezza h' e si fissa ad un fermo (*starting position*);
- Si posiziona la provetta sugli appositi appoggi facendo in modo che la faccia intagliata sia rivolta dalla parte opposta a quella da cui batte il martello;
- Si lascia libero il sistema asta-martello che in caduta libera andrà a rompere la provetta e raggiunta l'altezza massima h (*end of swing*) continuerà ad oscillare;
- Le oscillazioni successive del sistema asta-martello vengono smorzate con un freno elettromagnetico.

Calcolando la differenza tra l'energia iniziale (*starting position*) e quella finale (*end of swing*) è possibile determinare l'energia assorbita dal provino durante l'urto ritenendo trascurabili eventuali perdite dovute a fenomeni di natura dissipativa quali l'attrito.

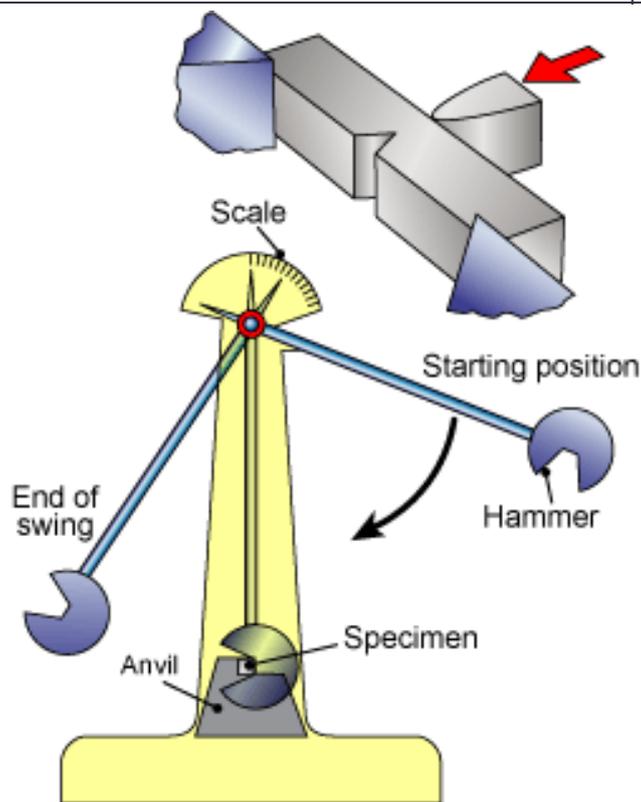


Figura III.6

Per calcolare l'energia assorbita dal sistema durante l'urto con il provino si assume un sistema di riferimento con origine in corrispondenza del punto di impatto del coltello con il provino, dal momento che le variazioni di quota e dunque le variazioni di energia potenziale sono indipendenti dal sistema di riferimento scelto. Le quote h' e h saranno quelle del sistema asta-coltello in corrispondenza del quale è applicata la forza peso. Indicando con M la massa del sistema, l'energia del sistema prima dell'urto e quindi in corrispondenza della *starting position* è puramente potenziale ed è pari a $U_i = mgh'$.

Similarmente nella posizione finale *end of swing* l'energia associata al sistema asta-coltello è di natura esclusivamente potenziale ed è pari a $U_f = mgh$. Assumendo che siano nulle le forze dissipative esterne, l'energia K assorbita durante l'urto misura la resilienza del provino:

$$K = U_i - U_f = mg(h' - h)$$

Indicando con β l'angolo che il sistema asta-martello forma con la verticale nel punto di escursione massima dopo l'urto, letto mediante la scala angolare graduata di cui è dotata la macchina, e indicando con l la lunghezza dell'asta, si ricava che:

$$K = mg[h' - l(1 - \cos\alpha)]$$

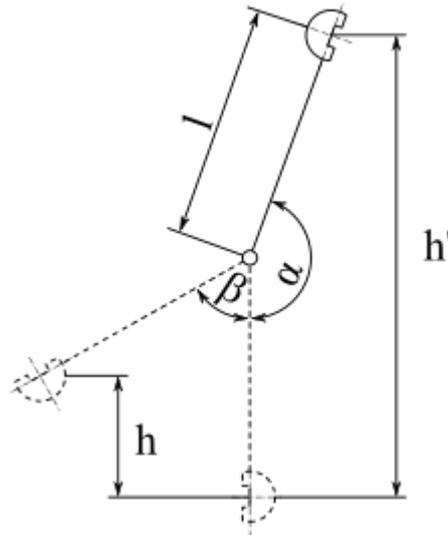


Figura III.7

III.2.4 Temperatura di prova

La resilienza K , calcolata in accordo alla precedente relazione, viene seguita dalle lettere U o V a seconda che il provino abbia intaglio a U o a V. Normalmente le prove vengono eseguite a temperatura ambiente $(23\pm 5)^\circ\text{C}$. Per prove a temperature differenti da quella ambiente il provino deve essere immerso nel mezzo di raffreddamento/riscaldamento per un tempo sufficiente al raggiungimento della temperatura di prova e non devono trascorrere più di 5 s tra il prelevamento a temperatura controllata e l'esecuzione della prova.

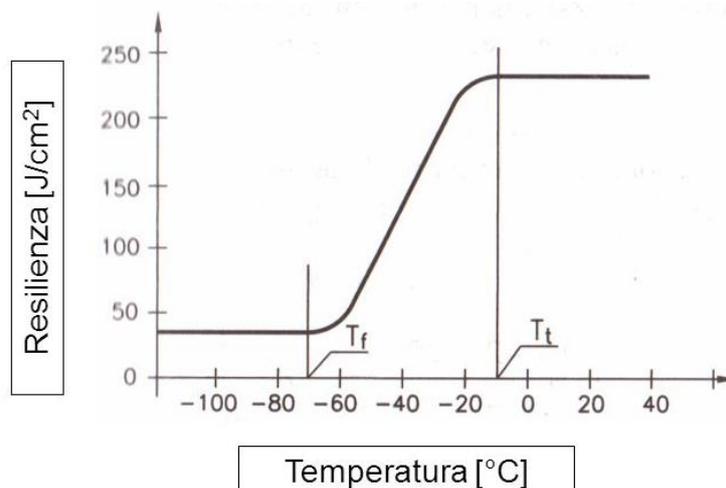


Figura III.8

La resilienza specifica, misurata come rapporto tra l'energia assorbita dal provino durante l'urto e l'area della sua sezione trasversale, dipende dalla temperatura come mostrato in Figura III.8. All'interno del diagramma che mostra la dipendenza della resilienza dalla temperatura è possibile individuare 2 temperature di riferimento, T_f e T_f che suddividono il campo termico in 3 intervalli. Se $T < T_f$ il materiale tende a rompersi per comportamento fragile; se $T > T_f$ la resilienza è elevata e il materiale tenderà a rompersi in modalità duttile. Per valori intermedi si ha un campo di transizione in cui la resilienza del materiale aumenta linearmente con la temperatura.

III.3 Prove di durezza

Lo scopo della prova è la determinazione della resistenza superficiale di un materiale quando sottoposto ad un carico assiale di compressione mediante utilizzo di un penetratore meccanico. Le principali prove di durezza sono la **Brinell**, **Vickers** e **Rockwell**. Le prime due sono molto simili tra loro e si distinguono esclusivamente per i valori del carico applicato e per la geometria dell'elemento penetratore. La terza prova invece è di natura completamente differente dalle prime due.

III.3.1 Prova di durezza Brinell

La prova di durezza Brinell, definita dalla norma UNI EN ISO 6506-1, si esegue misurando la superficie S dell'impronta in mm^2 di un penetratore sferico sotto l'azione di un carico F misurato in N:

$$HBW = 0.102 \frac{F}{S}$$

Il penetratore è costituito da una sfera di metallo duro e ha un diametro normalmente pari a 1, 2.5, 5 o 10 mm. Se possibile si usa il penetratore di diametro 10 mm in modo da ottenere un'impronta sufficientemente ampia. Dal momento che le dimensioni dell'impronta dipendono dal carico applicato, la forza F viene fissata sulla base della seguente relazione:

$$F = \frac{kD^2}{0.102}$$

dove la costante k dipende dal tipo di materiale, in accordo alla Tabella III.3.

Materiale	K [N/mm ²]
Leghe di stagno e piombo	1
Leghe di alluminio	5
Leghe di rame	10
Acciai	30
Leghe di nichel	30
Leghe di titanio	30

Tabella III.3

Il carico viene applicato come riportato in Figura III.9 come dettagliato di seguito:

- Il carico viene incrementato fino al raggiungimento del valore prescelto in un tempo variabile tra 2 e 8 s;
- Il carico viene mantenuto al valore nominale per un tempo variabile tra 10 e 15 s;

- Il carico viene eliminato rapidamente per passare alla successiva analisi dell'impronta sul provino.



Figura III.9

Riguardando l'impronta sul provino come una calotta sferica di diametro D uguale a quello del penetratore, indicando con h la profondità dell'impronta e con d il suo diametro, si ricava che:

$$S = \pi Dh$$

essendo l'altezza h funzione dei due diametri:

$$h = \frac{1}{2}\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)$$

Da tali relazioni si ricava l'espressione classica della durezza Brinell:

$$HBW = 0.102 \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

III.3.2 Prova di durezza Vickers

La prova di durezza Vickers, definita dalla norma UNI EN ISO 6507-1, si esegue in maniera simile alla precedente e la durezza del materiale si misura mediante la relazione:

$$HV = 0.102 \frac{F}{S}$$

A differenza della precedente prova, il penetratore è costituito da un diamante avente la forma di una piramide retta a base quadrata con angolo diedro* di 136° . La prova viene eseguita in maniera analoga alla precedente ma in tal caso non esiste una relazione diretta per la stima del carico F che deve solo variare nell'intervallo compreso tra 1.961 e 980.7 N. Per quanto attiene la superficie dell'impronta si misurano le due diagonali d_1 e d_2 sulla superficie del provino e se ne calcola la media geometrica.

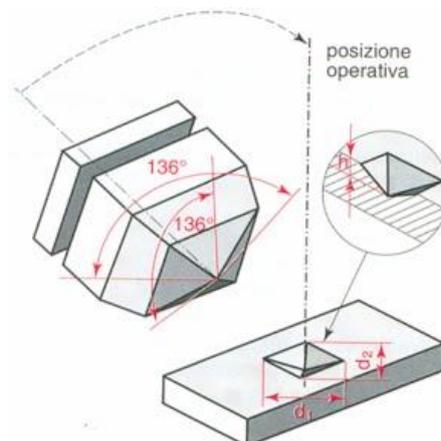


Figura III.10

Pertanto, la durezza Vickers si calcola mediante la relazione:

$$HV = 0.1891 \frac{2F}{d^2}$$

III.3.3 Prova di durezza Rockwell

La prova di durezza Rockwell, definita dalla norma UNI EN ISO 6508-1, è completamente diversa dalle precedenti dal momento che il provino è sottoposto ad un carico in due tempi mediante un penetratore, ovvero:

- Si sottopone il provino ad un precarico F_0 e si misura la profondità dell'impronta;
- Si sottopone il provino ad un carico aggiuntivo F_1 ;
- Si elimina il carico aggiuntivo e si misura la profondità dell'impronta in presenza del solo precarico F_0 .

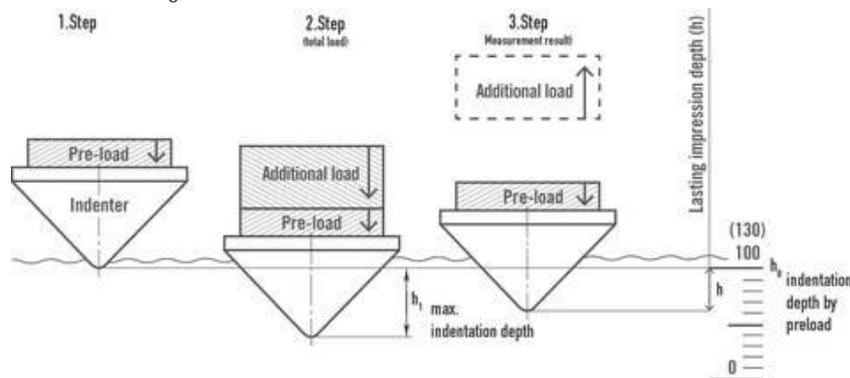


Figura III.11

Indicando con: N un parametro fisso che dipende dal tipo di prova Rockwell effettuata, h l'aumento residuo della profondità di penetrazione sotto il precarico F_0 dopo l'eliminazione del carico aggiuntivo, S un parametro di riferimento dipendente dal tipo di prova effettuata, la durezza Rockwell si misura mediante la relazione:

$$HR = N - \frac{h}{S}$$

Esistono varie scale di durezza Rockwell che dipendono sostanzialmente dal tipo di penetratore adoperato, nonché dal carico addizionale in aggiunta al precarico. Le scale maggiormente adoperate sono la B e la C i cui valori di riferimento sono indicati in Tabella III.4. In funzione del tipo di scala di misura adoperata, si aggiunge la relativa lettera al simbolo HR .

Scala Rockwell	Penetratore	F_0 (N)	F_1 (N)	S (mm)	N
B	Sfera in acciaio di diametro 1.587 mm, ovvero 1/16 di pollice.	98.07	882.6	0.002	130
C	Cono di diamante con angolo diedro 120°	98.07	1373.0	0.002	100

Tabella III.4

Si rammenta che i valori di durezza calcolati mediante le diverse prove precedentemente descritte sono diversi tra loro. Normalmente i valori ottenuti con le prime due prove di durezza sono molto prossimi dal momento che le prove hanno la stessa modalità di svolgimento e le relazioni costitutive sono simili. Al contrario, i valori ottenuti mediante la prova di durezza Rockwell non sono confrontabili con i precedenti.

III.4 Acciai e leghe leggere di interesse navale

III.4.1 Cenni sul processo di lavorazione

Si definisce acciaio una lega ferro-carbonio (Fe-C) con un tenore di carbonio minore del 2%, oltre ulteriori elementi con ridotti tenori. Si definisce ghisa una lega ferro-carbonio con un tenore di carbonio superiore al 2%.

L'acciaio è il materiale metallico di più vasto impiego nel settore navale dal momento che unisce al basso costo buone proprietà meccaniche. Si ottiene dal processo di affinazione della ghisa che, a sua volta, viene prodotta negli altoforni, dove a temperature dell'ordine di 1800-2000°C avviene il processo di carburazione dei minerali di ferro (magnetite, ematite, limonite, siderite), misti a carbon coke e ad elementi fondenti (materiali rocciosi di tipo calcareo con una bassa temperatura di fusione dell'ordine di 1200°C). In uscita dall'altoforno si genera prevalentemente ghisa, unitamente a gas poveri (riutilizzati per il riscaldamento dei forni) e loppe (prodotti a base di silice e calce riutilizzati per la produzione di cemento Portland che, a sua volta, viene impiegato per la produzione del calcestruzzo).

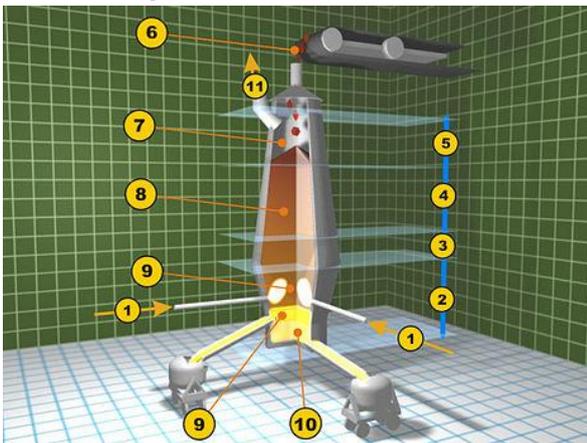


Figura III.12

Minerale	Composizione	Fe (%)	Densità (t/m ³)
Magnetite	Fe ₃ O ₄	72.4	5.0
Ematite	Fe ₂ O ₃	69.9	5.2
Limonite	2Fe ₂ O ₃ *2H ₂ O	59.8	3.7
Siderite	FeCO ₃	48.2	3.8

Tabella III.5

III.4.2 Classificazione degli acciai da scafo

Gli acciai da scafo di interesse navale sono suddivisi in due famiglie:

1. **Acciai ordinari (Normal Strength Steel o NSS):** sono caratterizzati da una tensione di snervamento R_{eH} pari a 235 MPa e sono ampiamente utilizzati per la realizzazione di tutti quegli elementi strutturali della trave-nave non particolarmente sollecitati;
2. **Acciai ad elevata resistenza (High Strength Steel o HSS):** sono caratterizzati da elevate tensioni di snervamento, normalmente pari a 315, 355 o 390 MPa, e sono normalmente adoperati per tutti quegli elementi strutturali particolarmente sollecitati, in particolare per le strutture del ponte e del fondo delle navi.

Sia gli acciai ordinari che quelli ad elevata resistenza sono allora volta suddivisi in **gradi**, in funzione della temperatura di esecuzione della prova di resilienza con pendolo Charpy. In particolare, ogni famiglia di acciai è suddivisa in 4 diversi gradi in funzione della temperatura di esecuzione della prova di resilienza, che varia da +20°C a -40°C per gli acciai ordinari e da 0°C a -60°C per gli acciai da elevata resistenza. Gli acciai

da scafo sono tutti caratterizzati da una densità pari a circa 7.85 t/m³ e un modulo di Young pari a 206 GPa. La Tabella III.6 riporta schematicamente la classificazione degli acciai da scafo di interesse navale, dove R_{eH} è la tensione di snervamento del materiale, R_m è la tensione massima o di rottura e ϵ_u è l'allungamento percentuale del provino in corrispondenza del carico ultimo.

Cat.	R_{eH} MPa	R_m MPa	ϵ_u %	Temperatura della prova di resilienza (°C)				
				20	0	-20	-40	-60
NSS	235	400-520	22	A	B	D	E	---
	315	440-590	22	---	AH32	DH32	EH32	FH32
HSS	355	490-620	21	---	AH36	DH36	EH36	FH36
	390	510-650	20	---	AH40	DH40	EH40	FH40

Tabella III.6

Gli acciai da scafo sono classificati mediante un codice alfanumerico, dove la lettera indica il grado dell'acciaio ed il numero, se presente, la tensione di snervamento in kgf/mm². Dalla Tabella III.6 si evince che complessivamente esistono 16 diverse tipologie di acciai da scafo, in funzione delle possibili combinazioni di tensione di snervamento e tenacità. Inoltre tanto più è elevato il grado dell'acciaio, ovvero tanto minore è la temperatura di esecuzione della prova di resilienza, tanto più l'acciaio risulta tenace. Gli acciai di alto grado sono normalmente adoperati per la realizzazione di quelle parti strutturali della nave che sono esposte a basse temperature come i fasciami del fianco nella zona permanentemente al di sopra del piano di galleggiamento e quelli del ponte coperta.

III.4.3 Composizione chimica degli acciai da scafo

Si è detto in precedenza che gli acciai sono leghe Fe-C con un tenore di C minore del 2%. In particolare gli acciai si dicono:

- **Acciai al carbonio (C)** se il tenore di manganese è < 1.0%;
- **Acciaio al carbonio-manganese (C-Mn)** se il tenore di manganese è compreso tra l'1.0% e l'1.7%.

Dalla Tabella III.7, rappresentativa della composizione chimica degli acciai da scafo di interesse navale, si deduce che gli acciai ordinari sono al carbonio, mentre quelli ad alta resistenza sono al carbonio-manganese. In entrambi i casi sono inoltre presenti tracce di silicio (Si), fosforo (P), zolfo (S) e alluminio (Al). Gli acciai ad elevata resistenza hanno inoltre ulteriori elementi di lega per migliorarne le caratteristiche meccaniche. Tutti gli elementi di lega producono, in funzione della loro concentrazione, effetti sulle caratteristiche meccaniche degli acciai e sulla loro saldabilità:

- **Carbonio (C):** aumenta la durezza e la resistenza del materiale, ma allo stesso tempo lo fragilisce e ne riduce la saldabilità. Pertanto gli acciai adoperati per impieghi strutturali che, in quanto tali, sono normalmente saldati, hanno tenori di carbonio non superiori allo 0.25%. Tenori maggiori sono utilizzati per la costruzione di organi meccanici non soggetti a saldatura;

- **Manganese (Mn):** produce effetti differenziati in funzione del suo tenore. In concentrazioni modeste migliora la resistenza e la tenacità del materiale. In concentrazioni elevate migliora la resistenza a rottura e all'usura;
- **Silicio (Si):** se presente in basse concentrazioni riduce l'effervescenza dell'acciaio, ovvero la formazione di ossidi di carbonio durante il processo di lavorazione. In elevate concentrazioni, invece, riduce la resilienza del materiale;
- **Fosforo (P) e zolfo (S):** sono impurità normalmente dannose in quanto riducono la resilienza del materiale;
- **Alluminio (Al), niobio (Nb) e vanadio (V):** riducono l'effervescenza e migliorano la resilienza del materiale;
- **Titanio (Ti), rame (Cu), cromo (Cr), nichel (Ni) e molibdeno (Mo):** migliorano le caratteristiche meccaniche del materiale, ma ne riducono leggermente la saldabilità. Tali elementi di lega sono presenti esclusivamente negli acciai HSS dove sono richieste caratteristiche meccaniche superiori.

Acciaio Grado	NSS				HSS	
	A	B	D	E	A,D,E	F
C _{max} %	0.21	0.21	0.21	0.18	0.18	0.16
Mn %	>2.5C	>0.80	>0.60	>0.70	0.90-1.60	
Si _{max} %	0.50	0.35	0.35	0.35	0.50	
P _{max} %			0.035		0.035	0.025
S _{max} %			0.035		0.035	0.025
Al _{min} %	---	---	0.015	0.015	0.015	
Nb %			---		0.02-0.05	
V %			---		0.05-0.10	
Ti _{max} %			---		0.02	
Cu _{max} %			---		0.35	
Cr _{max} %			---		0.2	
Ni _{max} %			---		0.40	0.80
Mo _{max} %			---		0.08	

Tabella III.7

III.4.4 Saldabilità degli acciai da scafo

La saldabilità dell'acciaio dipende prevalentemente dal tenore di carbonio e diminuisce all'aumentare di tale parametro. Questo è il motivo per cui il tenore di carbonio negli acciai da scafo è particolarmente basso. Gli altri elementi di lega producono in taluni casi un peggioramento delle caratteristiche di saldabilità del materiale, che può essere stimato mediante l'introduzione del **tenore di carbonio equivalente**:

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni + Cu}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{5}$$

Da tale relazione si evince che cromo, molibdeno e vanadio sono elementi che incidono particolarmente sulla saldabilità essendo caratterizzati da un fattore di riduzione pari a 1/5, al contrario nichel e rame producono effetti meno evidenti

essendo caratterizzati da un fattore di riduzione pari a 1/15. In funzione del tenore di carbonio equivalente si definiscono i campi di saldabilità riportati in Tabella III.8:

C_{eq} (%)	Saldabilità
≤0.4	Non sono richiesti trattamenti
0.4-0.6	Sono richiesti trattamenti di pre-riscaldamento
≥0.6	Sono richiesti trattamenti di pre e post-riscaldamento

Tabella III.8

III.4.5 Classificazione delle leghe leggere

Si definiscono **leghe leggere** le leghe formate da alluminio e ulteriori elementi tra cui: rame, magnesio, silicio, manganese e zinco. L'interesse per tali leghe è determinato dai seguenti fattori:

1. **basso peso specifico:** è possibile realizzare strutture più leggere rispetto a quelle in acciaio, dal momento che il peso specifico delle leghe leggere è pari a 2.75 t/m³ rispetto a 7.85 t/m³ degli acciai da scafo;
2. **buone proprietà criogeniche:** la resilienza di tali materiali è scarsamente dipendente dalla temperatura;
3. **buona resistenza alla corrosione:** tali materiali sono normalmente meno sensibili ai processi di corrosione in umido che interessano le strutture navali;
4. **ottima disponibilità:** l'alluminio è, dopo l'ossigeno e il silicio, l'elemento più diffuso in natura.

Tuttavia, a tali fattori positivi si associano alcune caratteristiche che ne limitano almeno in parte la diffusione:

1. **proprietà meccaniche ad elevate temperature:** l'alluminio puro ha un punto di fusione di 660°C, inferiore rispetto a quello dell'acciaio che è di circa 1400°C. Inoltre, le caratteristiche meccaniche iniziano a degradarsi già a partire da 200°C e questo fattore rappresenta una criticità in caso di incendio;
2. **ridotte caratteristiche meccaniche:** le leghe leggere hanno caratteristiche meccaniche inferiori rispetto all'acciaio e, pertanto, la riduzione in peso dovuta alla minore densità è in parte controbilanciata da un sovradimensionamento delle strutture in alluminio rispetto a quelle in acciaio;
3. **ridotta saldabilità:** le leghe leggere presentano maggiori criticità nel processo di saldatura con alterazione delle caratteristiche meccaniche nelle zone interessate dal processo termico di giunzione permanente.

Le **leghe leggere** sono classificate in 9 **serie**, caratterizzate da un codice numerico a quattro cifre in cui la prima cifra è quella indicativa della serie:

- **Serie 1000:** sono in alluminio puro al 99%. Presentano una modesta resistenza meccanica con un carico al limite di proporzionalità di circa 28 MPa e non sono pertanto usate per impieghi strutturali ma solo come rivestimenti protettivi in forma di placcatura;
- **Serie 2000:** sono leghe alluminio-rame-magnesio caratterizzate da buone caratteristiche meccaniche e sono diffuse soprattutto in ambito aeronautico;

- **Serie 3000:** sono leghe alluminio-manganese con bassa resistenza meccanica e buona resistenza alla corrosione. Non sono normalmente adoperate per impieghi strutturali;
- **Serie 4000:** sono leghe alluminio-silicio simili alle precedenti e normalmente non adoperate per impieghi strutturali;
- **Serie 5000:** sono leghe alluminio-magnesio, presentano buone caratteristiche meccaniche e buona resistenza alla corrosione anche in ambito marino e sono, pertanto, tra le più diffuse in ambito navale;
- **Serie 6000:** sono leghe alluminio-silicio-magnesio: sono simili alle precedenti, presentano una minore resistenza alla corrosione ma una migliore saldabilità. Anche queste sono molto diffuse in ambito navale;
- **Serie 7000:** sono leghe alluminio-zinco normalmente adoperate per applicazioni aerospaziali;
- **Serie 8000:** sono tutte le altre leghe non rientranti nelle categorie precedenti;
- **Serie 9000:** sono leghe di tipo sperimentale sostanzialmente non adoperate in applicazioni industriali di tipo comune.

III.4.6 Caratteristiche meccaniche delle leghe leggere di interesse navale

Le **leghe leggere** di più vasto impiego nelle applicazioni navali sono quelle alluminio-magnesio (Al-Mg) della serie 5000. In particolare, le leghe 5083 e 5086 presentano le migliori caratteristiche meccaniche e di resistenza alla corrosione. In particolare, la tensione al limite di proporzionalità è fortemente dipendente dalla condizione di tempra (*temper condition*) della lega. La condizione di tempra rappresenta l'insieme dei trattamenti termici eseguiti a valle del processo di formazione della lega. La tensione di snervamento varia normalmente tra 125 e 215 MPa ed è, pertanto, inferiore rispetto a quella degli acciai da scafo ordinari.

Lega	Condizione di tempra	Tensione di snervamento (MPa)
5083	O/H111	125
5083	H112	125
5083	H116	215
5083	H32/H321	215
5383	O/H111	145
5383	H116/H321	220
5383	H34	270
5086	O/H111	100
5086	H112	125
5086	H116	195
5086	H32/H321	185
5754	O/H111	85

Tabella III.9

- **O=ricottura** (dopo il processo di raffreddamento si riscalda il materiale a temperature comprese tra 350 e 380 °C per un tempo variabile tra 30 min e 4 ore e lo si raffredda ad aria);
- **H1=incrudimento** (il materiale viene deformato plasticamente a freddo per incrementarne la tensione di snervamento. I numeri successivi rappresentano il grado di indurimento per deformazione);
- **H2=incrudimento e parziale ricottura;**
- **H3=incrudimento ed invecchiamento ad alta temperatura** (il materiale viene sottoposto ad un ulteriore trattamento termico che ne aumenta la resilienza).

III.5 Materiali compositi di interesse navale

III.5.1 Classificazione

Si definisce **materiale composito** un materiale artificiale composto da due o più fasi componenti che restano divise tra loro da superfici identificabili. Una delle due fasi è detta **matrice** e conferisce la forma al manufatto. La seconda, immersa nella prima, è detta **rinforzo** e contribuisce prevalentemente alle caratteristiche meccaniche del materiale. In funzione della geometria del rinforzo i materiali compositi si classificano in:

- **compositi particellari:** il rinforzo è annegato in piccole particelle disposte in modo omogeneo all'interno della matrice (Figura III.13);
- **compositi fibrosi:** il rinforzo è disposto secondo direzioni prevalenti all'interno della matrice (Figura III.14).

In funzione del tipo di matrici i compositi si distinguono nelle seguenti categorie:

- **a matrice polimerica (termoplastica o termoindurente):** i polimeri più diffusi sono le resine poliesteri, epossidiche o fenoliche. Le resine termoplastiche possono essere rifuse e riformate, quelle termoindurenti invece non possono essere ulteriormente rifusi dopo che hanno subito il processo di indurimento (reticolazione);
- **a matrice metallica:** acciaio, alluminio, titanio;
- **a matrice ceramica:** nitruro di silicio.

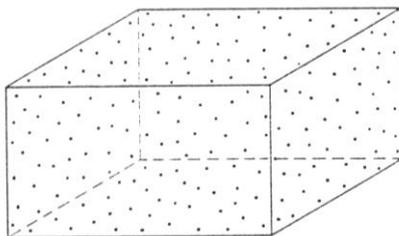


Figura III.13

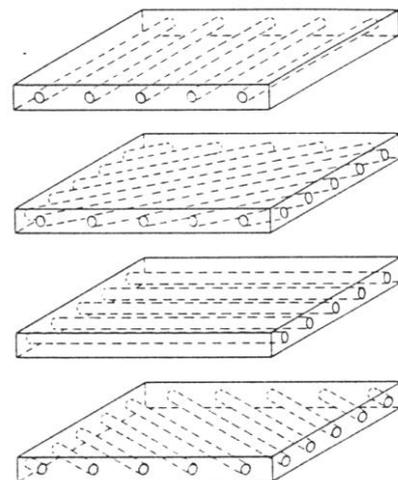


Figura III.14

III.5.2 Fibre e matrici

Come detto, le fibre garantiscono le opportune caratteristiche meccaniche ai materiali compositi. Queste ultime sono particolarmente elevate e nettamente migliori di quelle riscontrate in pezzi massicci realizzati con lo stesso materiale, grazie **all'effetto scala**. In altri termini, le piccole dimensioni dei filamenti di fibra, aventi normalmente un diametro tra 0.1 e 0.01 mm garantiscono la **sostanziale mancanza di difetti** con conseguente incremento delle relative caratteristiche meccaniche. In Tabella III.10 e Tabella III.11 sono dettagliati alcuni elementi caratteristiche delle principali fibre adoperate nel settore navale.

Fibre di vetro	Sono fabbricate mediante un processo di trafilatura. Sono normalmente avvolte su una bobina e ricoperte di appretto. Tale sostanza forma una guaina protettiva e favorisce la formazione di fasci di fibre e la successiva adesione di fibre e matrice.
Fibre di carbonio	Sono fabbricate mediante un processo di grafitizzazione di fibre organiche tessili tra cui in particolare il poliacrilonitrile. Sono caratterizzate da una elevata resistenza a trazione e le proprietà meccaniche sono scarsamente dipendenti dalla temperatura.
Fibre aramidiche	Sono fibre organiche normalmente conosciute con il marchio commerciale kevlar. A differenza delle precedenti le caratteristiche meccaniche si deteriorano sensibilmente con l'aumento della temperatura.

Tabella III.10

Fibre	ρ t/m ³	E GPa	σ_{UT} MPa	ϵ_{UT} %	Costo relativo
Vetro E	2.55	72	2400	3.0	1
Vetro R	2.50	88	3400	3.5	8
Fibre di carbonio HS	1.74-1.81	248-345	3100-4500	0.9-1.8	45-50
Fibre di carbonio HM	2.00-2.18	520-826	2100-2200	0.3-0.4	250-2700
Kevlar	1.45	124	2800	2.5	15

Tabella III.11

Le matrici, invece, hanno caratteristiche meccaniche modeste e conferiscono la forma al materiale composito. Le matrici di interesse navale sono sempre resine termoindurenti. In particolare per favorire il processo di indurimento (reticolazione) si aggiungono alle resine catalizzatori o induritori. In taluni casi si aggiungono anche acceleranti o inibitori che consentono di ridurre o aumentare il tempo di reticolazione della matrice. In Tabella III.11 e Tabella III.13 sono dettagliati alcuni elementi caratteristiche delle principali matrici adoperate nel settore navale.

Poliestere	Sono le più diffuse e sono normalmente adoperate in unione con le fibre di vetro. La reticolazione avviene normalmente a temperatura ambiente. Sono suddivise in due categorie: resine <u>ortoftaliche</u> e <u>isoftaliche</u> in funzione del reticolo cristallino. Le prime sono più economiche, mentre le seconde hanno migliori caratteristiche meccaniche e assorbono meno l'acqua.
Vinilestere	Sono simili alle precedenti, ma presentano una migliore resistenza agli urti e agli agenti chimici.
Epossidiche	Hanno caratteristiche meccaniche migliori delle resine poliesteri ed ottima capacità di adesione. Tuttavia presentano costi più elevati che le rendono utilizzate solo per prestazioni elevate, in unione con le fibre di carbonio.
Fenoliche	Hanno un elevato assorbimento di acqua e non sono adatte per superfici a contatto con ambienti umidi e, pertanto, sono scarsamente diffuse in ambito navale.

Tabella III.12

Fibre	ρ t/m ³	E GPa	σ_{UT} MPa	ϵ_{UT} %	Costo relativo
Poliestere ortoftaliche	1.23	3.2	65	2.0	0.9
Poliestere isoftaliche	1.21	3.6	60	2.5	1.0
Vinilestere	1.12	3.4	83	5.0	1.8
Epossidiche	1.20	3.0	85	5.0	2.3
Fenoliche	1.15	3.0	50	2.0	0.8

Tabella III.13

III.5.3 Metodi di fabbricazione

I metodi di fabbricazione degli scafi in materiale composito sono sostanzialmente di 3 tipi in funzione della diversa modalità di impregnazione delle fibre con le matrici:

- **Formatura per contatto a mano (*Hand lay-up process*):** è un processo a stampo aperto. All'interno dello stampo sono via via posizionati ed impregnati strati di rinforzo fino a raggiungere lo spessore desiderato. L'operazione di impregnazione è eseguita a mano con pennelli ed è seguita dalla rullatura per compattare il materiale ed espellere eventuali bolle d'aria. Lo stampo è inizialmente rivestito con resine impermeabili, dette *gel coat*, che oltre ad evitare l'impregnazione dello stratificato con acqua, migliorano la finitura superficiale esterna dello scafo. Gli strati sono posti sequenzialmente sullo stampo (mold) che, pertanto, garantisce la forma voluta al manufatto.

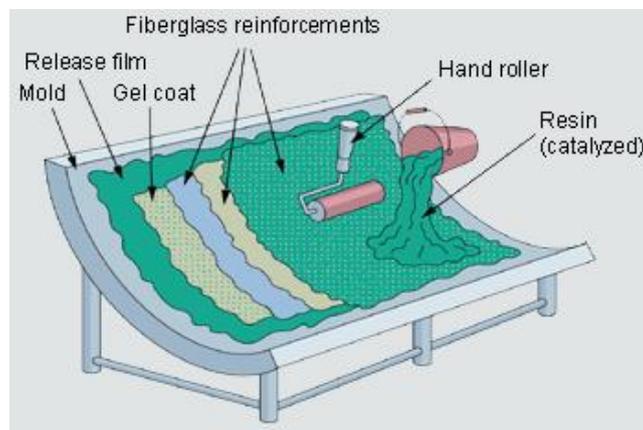


Figura III.15

- **Formatura per contatto a spruzzo (*Spray lay-up process*):** con questa tecnica di formatura, la fibra sminuzzata viene mescolata con la resina ed il catalizzatore e successivamente spruzzata all'interno dello stampo mediante una apposita pistola. Si procede successivamente alla rullatura. Con tale tecnica è possibile ridurre i costi della lavorazione, ma il controllo dello spessore dello stratificato è meno accurato rispetto alla tecnica precedente.

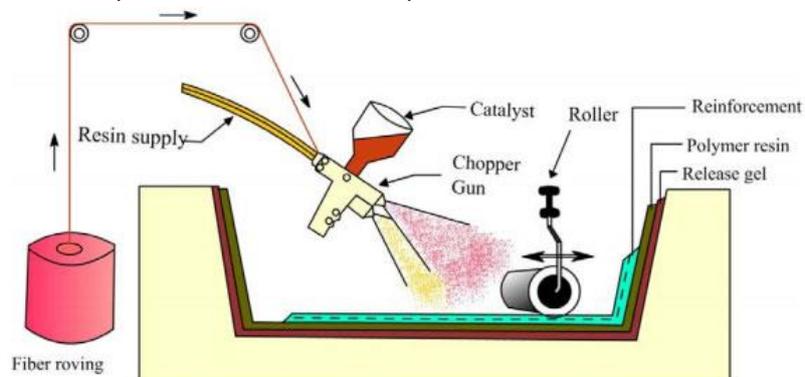


Figura III.16

- **Formatura con sacco sottovuoto (*Vacuum lay-up process*):** con questa tecnica di formatura lo stratificato viene ricoperto con un foglio di materiale plastico, detto sacco, sigillato al contorno; con una pompa si aspira l'aria creando pressoché il vuoto. Lo stratificato è pertanto sottoposto, durante la reticolazione,

alla pressione atmosferica che agendo uniformemente garantisce un elevato grado di impregnazione del rinforzo rispetto alle tecniche precedenti.



Figura III.17

III.5.4 Grado di impregnazione

I materiali compositi sono eterogeni, benché costituiti da fasi componenti (fibra e matrice) che invece possono ritenersi singolarmente omogenee e isotrope. A livello macroscopico i compositi possono essere trattati come materiali omogeneo e anisotropi (le caratteristiche meccaniche variano in funzione della direzione dei carichi applicati). Le proprietà meccaniche possono essere definite partendo dalle seguenti definizioni:

- v_c e w_c sono il volume e il peso del composito;
- v_f e w_f sono il volume e il peso del rinforzo;
- v_m e w_m sono il volume e il peso della matrice.

In assenza di vuoti valgono le due seguenti equazioni:

$$w_c = w_m + w_f \quad \text{e} \quad v_c = v_m + v_f$$

che possono essere riscritte come segue:

$$\frac{w_m}{w_c} + \frac{w_f}{w_c} = 1 \quad \text{e} \quad \frac{v_m}{v_c} + \frac{v_f}{v_c} = 1$$

I rapporti adimensionali precedenti si definiscono rispettivamente frazioni ponderali della matrice e della fibra e frazioni volumetriche della matrice e della fibra:

$$W_m + W_f = 1 \quad \text{e} \quad V_m + V_f = 1$$

Per gli scafi in vetroresina, ovvero realizzati con fibre di vetro E unite a resine poliestere, la frazione ponderale di matrice si definisce anche **grado di impregnazione** o **glass content** (g_c).

III.5.5 Gli stratificati

Sia i feltri che le stuoie sono caratterizzate da una assegnata grammatura (g/m^2) che misura il peso della fibra per unità di superficie ed è implicitamente un indice delle sue caratteristiche meccaniche. In ambito navale, soprattutto nella nautica da diporto, si ricorre generalmente alla vetroresina, dal momento che quest'ultima rappresenta uno dei materiali compositi aventi costo minore, anche se normalmente pari a 3-5 volte quello dell'acciaio ordinario. La maggior parte degli scafi sono realizzati mediante formatura per contatto a mano o a spruzzo alternando normalmente feltri e stuoie come di seguito specificato:

- **Feltri:** hanno grammature comprese tra 300 e 600 g/m², fibre lunghe tra 25 e 50 mm con gradi di impregnazione tra 0.25 e 0.30;
- **Stuoie:** hanno grammature comprese tra 400 e 800 g/m² con gradi di impregnazione tra 0.45 e 0.55. Normalmente non si adoperano grammature superiori a meno che non si adotti la tecnica di formatura sottovuoto, dal momento che risulterebbero di difficile impregnazione mediante le tecniche per contattato a mano o a spruzzo.

Si definisce sequenza di laminazione la successione di rinforzi e matrici che determina complessivamente il laminato. Generalmente la sequenza tipica si basa sull'alternanza di feltri e di stuoie. Le caratteristiche dello stratificato, ovvero la sua massa areica m in kg/m² e il suo spessore t in mm sono determinati mediante le seguenti relazioni:

$$m = \sum_{i=1}^n m_i \quad t = \sum_{i=1}^n t_i$$

avendo indicato con m_i e t_i la massa areica e lo spessore dell' i -ma lamina dello stratificato (unione di rinforzo e matrice). Tali grandezze si determinano mediante le seguenti relazioni:

$$m_i = \frac{p_i}{1000} \left(1 + \frac{1 - g_{c,i}}{g_{c,i}} \right) \quad t_i = \frac{1}{1000} \left(\frac{p_i}{\rho_f} + \frac{1 - g_{c,i}}{g_{c,i}} \frac{p_i}{\rho_m} \right)$$

dove:

- p_i è la grammatura dell' i -mo strato di rinforzo in g/m²;
- ρ_f è la densità del rinforzo in g/cm³, normalmente pari a 2.56 per scafi in vetroresina;
- ρ_m è la densità della matrice in g/cm³, normalmente pari a 1.20 per scafi in vetroresina;
- $g_{c,i}$ è il glass content dell' i -mo strato di rinforzo.

In Tabella III.14 è indicata una sequenza di laminazione tipo per uno stratificato di una imbarcazione in vetroresina con glass content medio pari a 0.48. Lo stratificato ha una massa areica totale pari a 9.585 kg/m² di cui 4.600 kg/m² sono del rinforzo e 4.585 kg/m² sono di matrice.

N	tipo	p_i g/m ²	t_i mm	m_i kg/m ²
1	MAT	300	0.388	0.625
2	R	500	0.647	1.042
3	MAT	300	0.388	0.625
4	R	500	0.647	1.042
5	MAT	300	0.388	0.625
6	R	500	0.647	1.042
7	MAT	300	0.388	0.625
8	R	500	0.647	1.042
9	MAT	300	0.388	0.625
10	R	500	0.647	1.042
11	MAT	300	0.388	0.625
12	MAT	300	0.388	0.625
		4600	5.951	9.585

Tabella III.14

III.6 Saldature di interesse navale

III.6.1 Classificazione

Si definisce **saldatura** il processo di giunzione permanente di due elementi, in genere metallici, mediante riscaldamento con o senza l'azione combinata della pressione, con o senza apporto di materiale metallico. Si definisce **saldabilità** l'attitudine di un materiale ad essere saldato con un altro materiale metallico di uguale o diversa composizione chimica. Lo specifico processo di saldatura dipende dalle proprietà fisiche dei materiali, dal loro campo di utilizzo e dagli impianti produttivi disponibili.

In base alla tipologia di materiale base, i processi di saldatura si classificano in due grandi tipologie:

- **Saldature autogene:** i materiali da saldare (*materiale base*) hanno la stessa composizione chimica;
- **Saldature eterogene:** i materiali da saldare (*materiale base*) hanno diversa composizione chimica.

In base al tipo di saldatura, le saldature autogene sono a loro volta suddivise in due grandi tipologie:

- **Saldature per fusione con metallo d'apporto:** i lembi dei materiali da saldare sono riscaldati fino alla temperatura di fusione e successivamente accostati per il processo di saldatura. Durante tale processo ulteriore materiale dello stesso tipo del materiale base (*metallo d'apporto*) viene fatto cadere a gocce all'interno del bagno di fusione per la realizzazione del cordone di saldatura;
- **Saldature per pressione:** i lembi dei materiali da saldare sono riscaldati fino alla temperatura di rammollimento e successivamente accostati per il processo di saldatura. La giunzione si realizza esercitando una opportuna pressione sui lembi da saldare senza l'aggiunta del metallo d'apporto.

La classificazione generale dei processi di saldatura è riportata in Tabella III.15.

Saldatura autogena	Saldatura per fusione con metallo d'apporto	A gas (o al cannello)	Utilizza come sorgente di calore una fiamma ossiacetilenica che viene ottenuta dal processo di combustione dell'acetilene con l'ossigeno. I due gas sono contenuti in due bombole separate da cui vengono fatti affluire in un apposito cannello terminante in un ugello, all'uscita del quale si realizza la combustione.
		All'arco	Utilizza come sorgente di calore un arco elettrico che viene fatto scoccare tra una pistola porta elettrodo ed il materiale base. L'arco elettrico consiste nel passaggio di elettricità in un gas divenuto conduttore a causa della ionizzazione delle particelle che lo compongono. Gli urti tra le particelle generano forti quantità di calore ed una intensa luminosità.
		All'idrogeno atomico (ossidrogeno)	Utilizza come sorgente di calore una fiamma ottenuta dal processo di combustione dell'idrogeno e dell'ossigeno. In particolare l'idrogeno inizia a bruciare allorché raggiunge la sua temperatura di autoignizione che, a pressione atmosferica, è di circa 120°C.

		Alla termite (alluminotermica)	Viene utilizzata prevalentemente per la saldatura autogena dei binari ferroviari e sfrutta la reazione chimica esotermica che si ottiene miscelando alluminio metallico e ossido di ferrico, innescata mediante rapido riscaldamento.
		Con fascio laser	Utilizza come sorgente di calore l'energia prodotta da un fascio di luce coerente. Il raggio laser consente di realizzare una saldatura sottile e profonda, particolarmente adatta per la meccanica di precisione. Tale tecnica è particolarmente adoperata nei processi di saldatura automatizzati e seriali tipici dell'industria automobilistica.
Saldatura autogena	Saldatura per pressione senza metallo d'apporto	A fuoco (o bollitura)	I lembi del materiale da saldare sono riscaldati alla fiamma fino al raggiungimento della temperatura di rammollimento o forgiatura. Tale tecnica è oramai disusata.
		Elettrica a resistenza	Si esercita, mediante un elettrodo metallico, una opportuna pressione su un'area limitata del materiale da saldare. Facendo transitare nell'elettrodo corrente, il calore generato provoca il riscaldamento del materiale da saldare. Tale processo è utilizzato per la produzione in serie dal momento che è caratterizzato da rapidi tempi di esecuzione
		Elettrica a scintillio	Sfrutta un procedimento simile al precedente ed è normalmente adoperata per la saldatura dei binari.
Saldatura eterogena	Saldobrasatura		Tale tecnica di saldatura è simile a quella autogena a gas, a meno del fatto che il materiale base non è portato alla temperatura di fusione. Si fa colare un materiale d'apporto avente punto di fusione inferiore a quello del metallo base. L'unione tra il metallo d'apporto, che svolge la funzione di legante, e il metallo base si ottiene grazie alla formazione di leghe di transizione.
	Brasatura	Forte	Tale tecnica si ottiene infiltrando tra le superfici sovrapposte dei due pezzi da collegare una lega brasante, ovvero una lega composta da metalli d'apporto con temperatura di fusione nettamente inferiore a quella degli elementi da saldare. La temperatura di fusione della lega brasante (ottone o piombo) varia tra 600 e 900°C. La saldatura ottenuta è caratterizzata da una buona resistenza meccanica.
		Dolce	Tale tecnica è simile alla precedente, a meno della composizione della lega brasante (stagno) e della sua temperatura di fusione che oscilla normalmente tra 150 e 300°C

Tabella III.15

III.6.2 Saldatura ossiacetilenica

Nella tecnica di **saldatura ossiacetilenica (oxyacetylene welding)** si adoperava come sorgente di calore la fiamma ossiacetilenica generata dalla combustione dell'acetilene (C₂H₂) con l'ossigeno (O₂) secondo la reazione chimica:



La reazione chimica è fortemente esotermica ovvero produce una notevole quantità di calore. Variando la concentrazione relativa di ossigeno e acetilene è possibile regolare la fiamma:

- **Fiamma riducente (*reducing flame*):** si ha un eccesso di acetilene con rapporto $O_2:C_2H_2$ pari a 0.9:1. È normalmente adoperata per la saldatura di leghe di alluminio;
- **Fiamma ossidante (*oxidizing flame*):** si ha un eccesso di ossigeno con rapporto $O_2:C_2H_2$ pari a 1,5:1. È normalmente adoperata per la saldatura di bronzo o rame;
- **Fiamma neutra (*neutral flame*):** i contenuti di ossigeno e acetilene sono uguali con rapporto $O_2:C_2H_2$ pari a 1:1. È normalmente adoperata per la saldatura di acciaio a basso tenore di carbonio.

Tale tecnica di saldatura è normalmente più lenta rispetto alle saldature ad arco e, pertanto, è adoperata solo per operazioni di riparazione. L'apporto di calore è relativamente modesto e non si presta a procedimenti di tipo automatico.

The Oxy-acetylene welding Flame

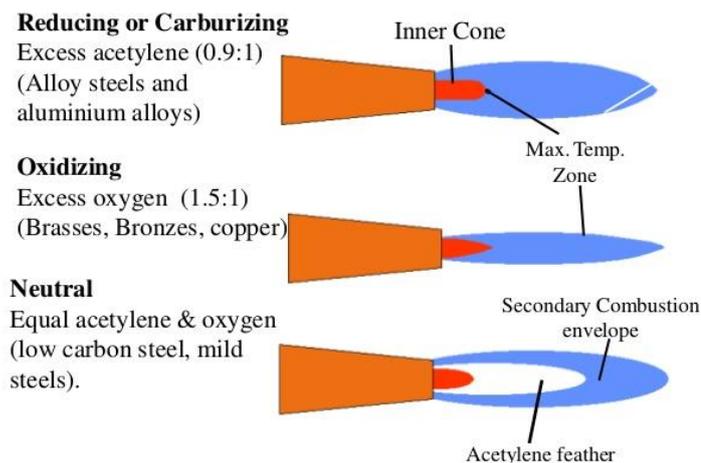


Figura III.18

III.6.3 Saldatura all'arco con elettrodo rivestito

Nella tecnica di **saldatura ad arco con elettrodo rivestito (*shielded metal arc welding*)** l'elettrodo, innestato in una pinza porta-elettrodo tenuta in mano dall'operatore, è costituito da una bacchetta avente un'anima metallica rivestita da una sostanza fondente, minerale o organica.

Durante il processo di saldatura, l'arco elettrico scocca tra l'estremità dell'elettrodo e il metallo base. L'elettrodo, a causa dell'elevato calore generato dall'arco elettrico, fonde. Il metallo cade a gocce all'interno del bagno di fusione mentre il rivestimento esterno:

- genera una atmosfera protettiva che evita la contaminazione del metallo fuso con l'ossigeno e l'azoto presente nell'atmosfera;
- reagendo con le impurità del metallo (zolfo e fosforo) forma una scoria, prima liquida e poi solida, sul bagno di fusione che risulta così protetto dal processo di ossidazione.

Tale tecnica di saldatura è estremamente versatile ed è pertanto molto adoperata per le saldature manuali. Ha, tuttavia, lo svantaggio di essere lenta dal momento che bisogna frequentemente sostituire l'elettrodo, lungo tra 230 e 460 mm e rimuovere lo strato di scoria formatosi sul bagno di fusione.

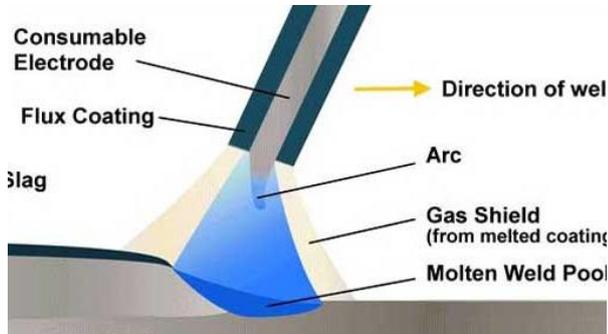


Figura III.19

III.6.4 Saldatura all'arco sotto gas

Le tecniche di **saldatura ad arco sotto gas** si dividono in due grandi famiglie in funzione del tipo di gas adoperato per proteggere il bagno di fusione:

- **MAG (metal active gas welding):** il gas adoperato è CO₂. Tale tecnica è adoperata per la saldatura degli acciai ordinari;
- **MIG (metal inert gas welding):** il gas adoperato è argo o elio. Tale tecnica è la più diffusa per la saldatura delle leghe leggere e per gli acciai inossidabili.

In tale processo, il metallo d'apporto è avvolto su una bobina e funge anche da elettrodo. Lo stesso è movimentato tramite una speciale pistola dove trova collocazione anche il condotto di adduzione del gas. Tale tecnica è più efficiente rispetto alla precedente per i seguenti motivi:

- Alimentazione continua del metallo d'apporto;
- Assenza di scorie nel bagno di fusione;
- Visibilità del bagno di fusione;
- Possibilità di rendere automatico il processo di saldatura.

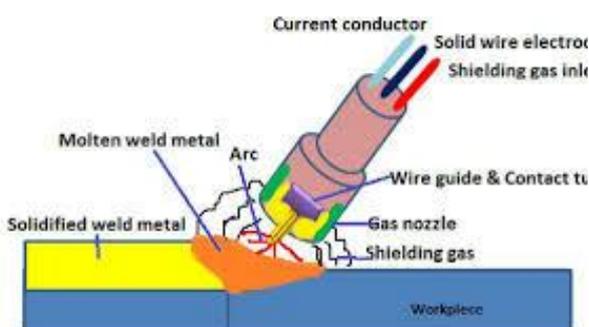


Figura III.20

La tecnica di **saldatura ad arco sotto gas TIG (Tungsten inert gas welding)** si basa sull'utilizzo di un elettrodo infusibile in tungsteno e di un gas inerte (argo o elio) per proteggere il bagno di fusione. In tale tecnica di saldatura il materiale di apporto viene fornito tramite una bacchetta esterna dall'operatore.

Tale tecnica consente di ottenere giunti di elevata qualità ma uno dei difetti cui è soggetta riguarda la possibile inclusione di tracce di tungsteno nel bagno di fusione,

qualora l'elettrodo venga accidentalmente a contatto con il metallo base. In tal caso l'estremità dell'elettrodo tende a frammentarsi e a rilasciare nel bagno scaglie di dimensioni normalmente inferiori a 1 mm che tendono ad infragilire il cordone di saldatura.

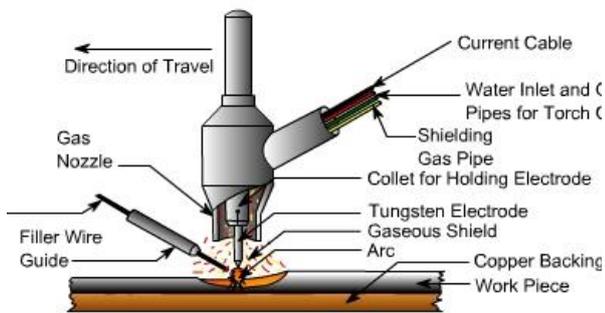


Figura III.21

III.6.5 Tipologie e designazioni delle saldature

In funzione della posizione della posizione relativa dell'elettrodo rispetto agli elementi da saldare le saldature si classificano in 4 categorie:

1. **Saldatura in piano (*flat position*):** il metallo base è posto su un piano verticale e l'elettrodo è sistemato al di sopra di quest'ultimo;
2. **Saldatura orizzontale (*horizontal position*):** il metallo base è posto su un piano verticale mentre il cordone di saldatura è disposto orizzontalmente;
3. **Saldatura verticale (*vertical position*):** il metallo base è posto su un piano verticale mentre il cordone di saldatura è disposto verticalmente;
4. **Saldatura sovratesta (*overhead position*):** il metallo base è posto su un piano orizzontale mentre l'elettrodo è sistemato al di sotto di quest'ultimo.

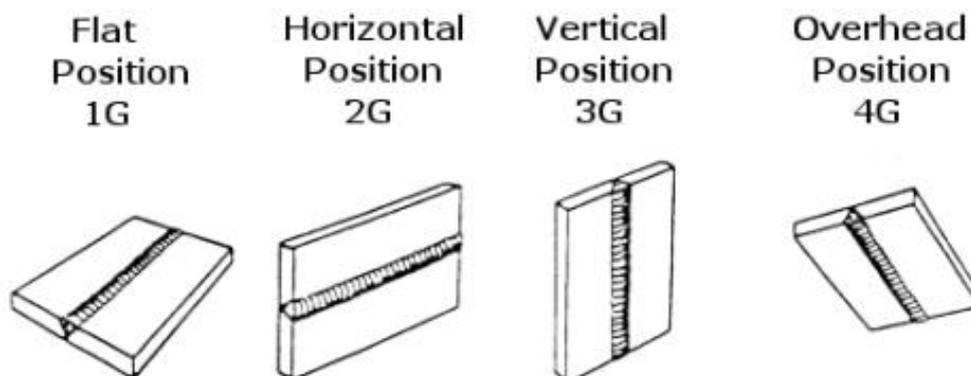


Figura III.22

In base alla tipologia di giunzione realizzata tra i due metalli base, i giunti saldati si classificano come segue:

- **Giunti di testa (*butt joint*):** il giunto è realizzato mediante un unico cordone di saldatura realizzato in corrispondenza dello spessore dei due elementi da saldare;
- **Giunti a sovrapposizione (*lap joint*):** il giunto è realizzato mediante due cordoni di saldatura d'angolo realizzati lungo gli spessori dei due elementi base da saldare;

- **Giunti di spigolo (*corner joint*):** il giunto è realizzato mediante due cordoni di saldatura d'angolo, dal momento che i due elementi sono disposti perpendicolarmente tra loro;
- **Giunti d'orlo (*edge joint*):** il giunto è realizzato secondo lo spessore dei due materiali base sovrapposti;
- **Giunti a T (*Tee joint*):** il giunto è realizzato mediante due cordoni di saldatura d'angolo dal momento che i due elementi sono disposti perpendicolarmente tra loro.

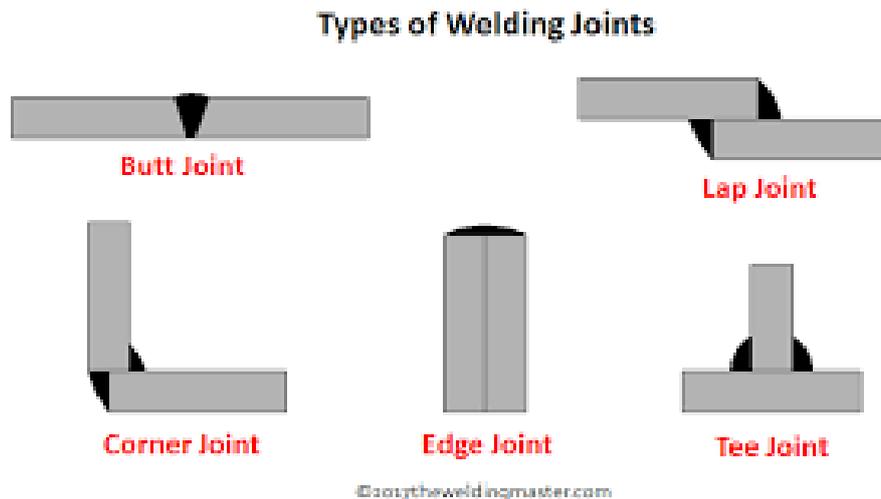


Figura III.23

Si definisce, infine, **cianfrinatura** l'eventuale operazione preparatoria dei lembi del materiale base da saldare. In funzione del tipo di cianfrino i lembi sono classificati come segue:

- **ad I o a lembi retti (*square groove*):** nessuna preparazione degli orli intestati con saldatura semplice o con ripresa a rovescio;
- **ad un vertice con preparazione a semplice smusso di un solo orlo a mezzo V (*bevel groove*) o a J (*J groove*):** è cianfrinato da un solo lato un lembo del materiale base e la saldatura può essere semplice o con ripresa a rovescio;
- **ad un vertice con preparazione a semplice smusso di entrambi gli orli a V (*V groove*) o ad U (*U groove*):** sono cianfrinati da un solo lato entrambi i lembi del materiale base e la saldatura può essere semplice o con ripresa a rovescio;
- **A vertici contrapposti con preparazione a doppio smusso di un solo orlo a K (*double bevel*) o a doppio J (*double J groove*):** è cianfrinato dai due lati un solo lembo del materiale base con ripresa a rovescio della saldatura;
- **A vertici contrapposti con preparazione a doppio smusso di entrambi gli orli a C (*Double vee groove*) o a doppio U (*double U groove*):** sono cianfrinati dai due lati entrambi i lembi del materiale base con ripresa a rovescio della saldatura.

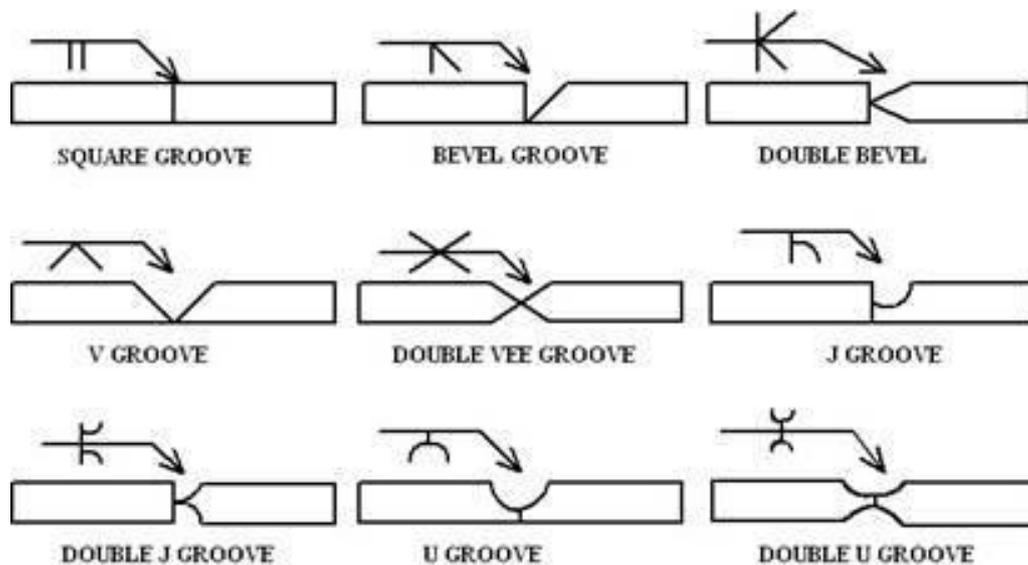


Figura III.24

III.6.6 Difetti e controlli dei cordoni di saldatura

I cordoni di saldatura sono sottoposti in fase di costruzione alla verifica di difetti o controlli tra cui: mancanza di penetrazione del cordone; inclusioni gassose o di scorie; cricche a caldo; mancanza di penetrazione. Il conseguimento e l'accertamento della qualità delle saldature richiede controlli indiretti legati alla qualifica delle procedure e dei saldatori, e controlli diretti a mezzo di prove non distruttive. Le prove non distruttive si classificano in due categorie:

- Controlli superficiali: esami visivo, magnetoscopico e con liquidi penetranti;
- Controlli interni: esami radiografico ed ultrasonoro.

Nella cantieristica navale la gran parte delle saldature è ispezionata solo visivamente. Gli esami magnetoscopico e con liquidi penetranti sono in genere poco adoperati, mentre trovano largo impiego gli esami radiografici ed ultrasonori. Una sintesi delle principali tecniche di controllo della qualità dei cordoni di saldatura è riportata in Tabella III.16.

Esame visivo	Si basa sull'ispezione ad occhio nudo o con l'ausilio di lenti del cordone di saldatura. L'esame consente di rilevare eventuali irregolarità del cordone o di eventuali difetti affioranti.
Esame magnetoscopico	Si basa sulla variazione delle linee di flusso del campo magnetico indotto in un materiale ferromagnetico dal passaggio di una corrente impressa in presenza di discontinuità nel cordone di saldatura.
Esame con liquidi penetranti	Si basa sul fenomeno della capillarità, ossia la tendenza di un liquido a penetrare in fessure sottili. Consente di rilevare difetti affioranti di qualunque tipo, applicando prima un liquido penetrante e successivamente un rivelatore che asciughi rapidamente e lascia sul pezzo un deposito bianco polverulento simile a talco.

Controlli interni	Esame radiografico	Si basa sull'utilizzo di radiazioni elettromagnetiche che, attraversando il cordone di saldatura, vengono attenuate in maniera più o meno marcata. I difetti appaiono normalmente come macchie più scure sulla pellicola radiografica.
	Esame ultrasonoro	Si basa sul fenomeno della riflessione di un'onda acustica qualora la stessa incontra un ostacolo. Se quest'ultimo è posto perpendicolarmente all'onda incidente, l'onda viene riflessa. Gli ultrasuoni hanno frequenza superiore a 20 kHz (limite di udibilità) e velocità dipendente dal materiale attraversato (acciaio: 5900 m/s, alluminio 6230 m/s).

Tabella III.16

IV. Lo scafo in acciaio

IV.1 Elementi morfologici fondamentali

IV.1.1 Generalità

Si definisce **scafo** l'insieme degli elementi costruttivi che costituiscono l'involucro stagno e la parte resistente della nave. I suoi componenti principali sono i seguenti:

- **fasciami:** hanno il compito di sostenere i carichi idrostatici e idrodinamici agenti sulla nave e sono irrigiditi da travi detti rinforzi ordinari;
- **rinforzi ordinari:** hanno lo scopo di irrigidire i fasciami e di sostenerne i carichi idrostatici e idrodinamici;
- **travi rinforzate:** hanno lo scopo di spezzare la campata dei rinforzi ordinari assorbendo mediante reazioni concentrate di estremità i carichi da essi trasmessi;
- **paratie:** hanno lo scopo di suddividere longitudinalmente la nave garantendone la compartimentazione stagna in caso di falla.

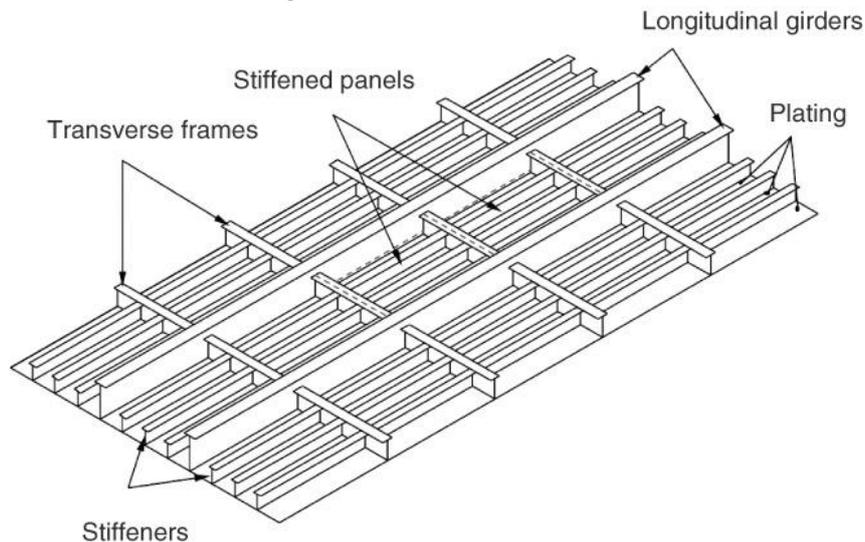


Figura IV.1

In funzione della morfologia dei rinforzi ordinari e delle travi rinforzate, si distinguono tre sistemi strutturali:

- **Navi a struttura trasversale:** le strutture del fondo, del fianco e del ponte sono di tipo trasversale;
- **Navi a struttura longitudinale:** le strutture del fondo, del fianco e del ponte sono di tipo longitudinale;
- **Navi a struttura mista:** le strutture del fondo e del ponte sono di tipo longitudinale, mentre quelle del fianco sono di tipo trasversale.

IV.1.2 Sistemi strutturali

Il sistema strutturale di **tipo trasversale** è quello tradizionale mutuato dalle costruzioni in legno. I fasciami sono irrigiditi da ossature trasversali, costituite da madieri (fondo), costole (fianco) e bagli (ponte). Tali ossature trasversali sono irrigidite da travi rinforzate longitudinali, detti paramezzali (fondo) e anguille (ponte). Tali ossature trasversali sono disposte con regolarità nel senso longitudinale della nave e sono intervallate da ossature rinforzate, anch'esse disposte nel piano trasversale della nave. Tale sistema è

generalmente applicato per navi di piccola dimensione, normalmente al di sotto dei 65 m. Per navi di dimensioni medio-grandi, invece, si prediligono i sistemi di tipo longitudinale o misto. La tipologia di rinforzi per tale sistema strutturale è definita in Tabella IV.1.

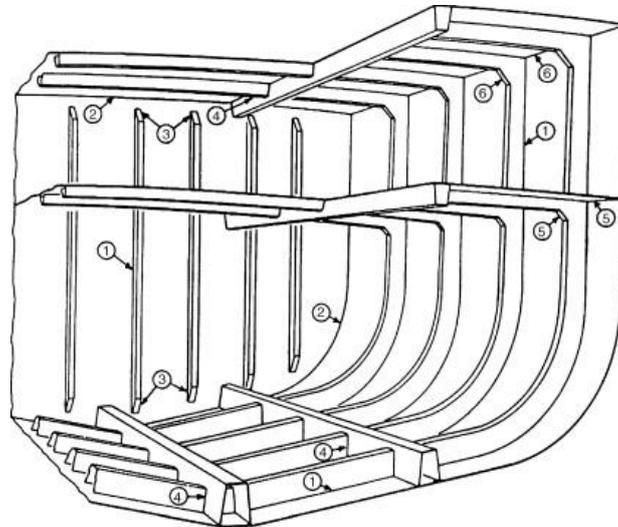


Figura IV.2

Zona	Rinforzi ordinari	Travi rinforzate longitudinali	Travi rinforzate trasversali
Fondo	Madieri	Paramezzali	Madieri rinforzati
Fianco	Costole	---	Costole rinforzate
Ponte	Bagli	Anguille	Bagli rinforzati

Tabella IV.1

Nel sistema strutturale di **tipo longitudinale** i fasciami sono irrigiditi da correnti longitudinali sostenuti da ossature rinforzate. Tale sistema è particolarmente adatto per le navi di grandi dimensioni, soggette ad elevati momenti flettenti, in quanto si realizzano robustezze longitudinali maggiori a parità di peso scafo rispetto ad una equivalente struttura trasversale. Lo svantaggio di tale sistema è legato al notevole ingombro trasversale delle costole rinforzate che possono interferire con le esigenze di caricazione delle navi da carico solido. In taluni casi anche i correnti longitudinali posti a murata sono di intralcio, in quanto possono dar luogo a segregazioni di merce o sporcizia. La tipologia di rinforzi per tale sistema strutturale è definita in Tabella IV.2.



Figura IV.3

Zona	Rinforzi ordinari	Travi rinforzate longitudinali	Travi rinforzate trasversali
Fondo	Correnti longitudinali del fondo	Madieri rinforzati	Paramezzali
Fianco	Correnti longitudinali del fianco	Costole rinforzate	Correnti rinforzati del fianco
Ponte	Correnti longitudinali del ponte	Bagli rinforzati	Anguille

Tabella IV.2

Nel sistema strutturale di **tipo misto** i fasciami del fianco sono irrigiditi da costole ordinarie, mentre i fasciami del fondo e del ponte sono irrigiditi da correnti longitudinali. Tale sistema è adottato tipicamente per le grandi rinfusiere solide (*bulk carrier*), in quanto offre una buona resistenza flessionale ed allo stesso tempo le operazioni di carico e scarico della merce non sono intralciate dai correnti longitudinali del fianco. Da quanto detto si evince che la nomenclatura dei principali elementi strutturali si ottiene dalla combinazione dei due casi visti in precedenza. a tipologia di rinforzi per tale sistema strutturale è definita in Tabella IV.3.

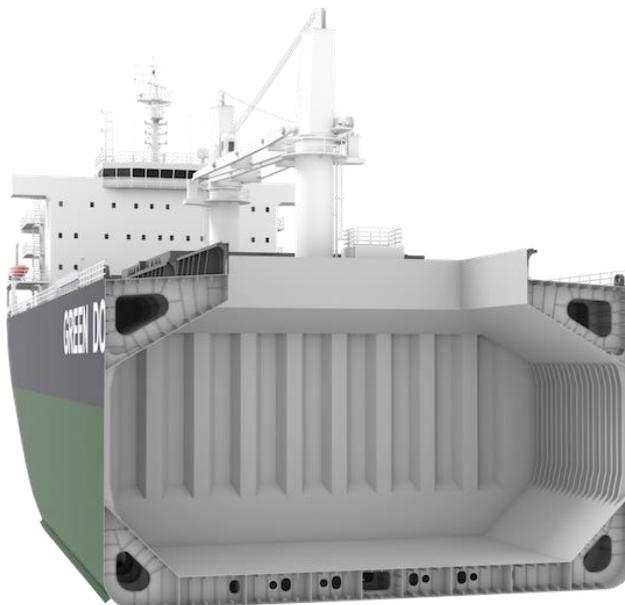


Figura IV.4

Zona	Rinforzi ordinari	Travi rinforzate trasversali	Travi rinforzate longitudinali
Fondo	Correnti longitudinali del fondo	Madieri rinforzati	Paramezzali
Fianco	Costole	---	---
Ponte	Correnti longitudinali del ponte	Bagli rinforzati	Anguille

Tabella IV.3

IV.1.3 Strutture del fondo

Si definisce **chiglia** l'elemento strutturale centrale del doppiofondo. Se definisce **paramezzale centrale** la trave rinforzata longitudinale posta al di sopra della chiglia in corrispondenza del piano di simmetria della nave. In funzione della morfologia di tali elementi strutturali si distinguono i seguenti casi:

- **Chiglia piatta (flat plate keel):** è costituita da una lamiera disposta orizzontalmente a centro nave, sulla quale è sistemato il paramezzale centrale che si estende da poppa (paratia del pressatrecce) a prora (paratia di collisione);
- **Chiglia massiccia (bar keel):** è realizzata mediante una barra piatta disposta verticalmente e trova applicazione per navi di modeste dimensioni;
- **Chiglia condotto (duct keel):** è realizzata mediante due paramezzali laterali che non devono di norma distare più di 2 m tra loro. Tale sistemazione è prevista per navi dotate di doppiofondo ovvero di un fondo interno allo scafo. Il condotto è utilizzato per il passaggio delle tubolature di asservimento alle cisterne o alle stive del carico della nave.

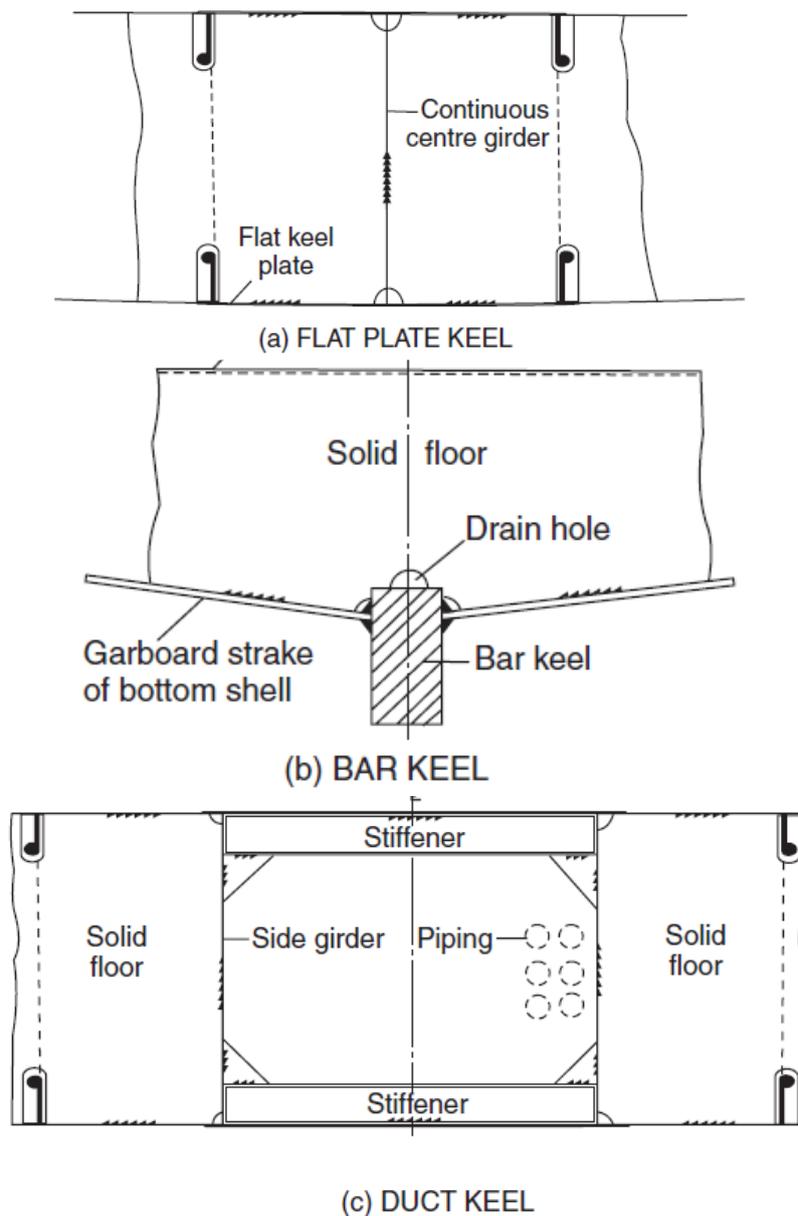


Figura IV.5

Si definisce **doppiofondo** il volume stagno compreso inferiormente dai fasciami e del fondo e superiormente dai fasciami del cielo del doppiofondo. Tale sistema strutturale è largamente adottato nelle stive delle portarinfuse solide e liquide in quanto consente

di avere un fondo liscio e piano all'interno delle stive del carico, consentendo inoltre di avere dei volumi chiusi che possono essere depositi di carichi liquidi quali combustibile, olio lubrificante, acqua dolce, zavorra.

Le lamiere laterali del cielo del doppiofondo si definiscono **marginali** e sono normalmente abbattute verso murata. In tal caso si vengono a formare tra le marginali ed i fasciami del ginocchio della nave due canali di raccolta di eventuali liquidi che tendono ad accumularsi nei locali della nave, quali trafiletti oleosi, acque di lavaggio, condense e colaggi vari. Tali canali si definiscono normalmente canali di sentina.

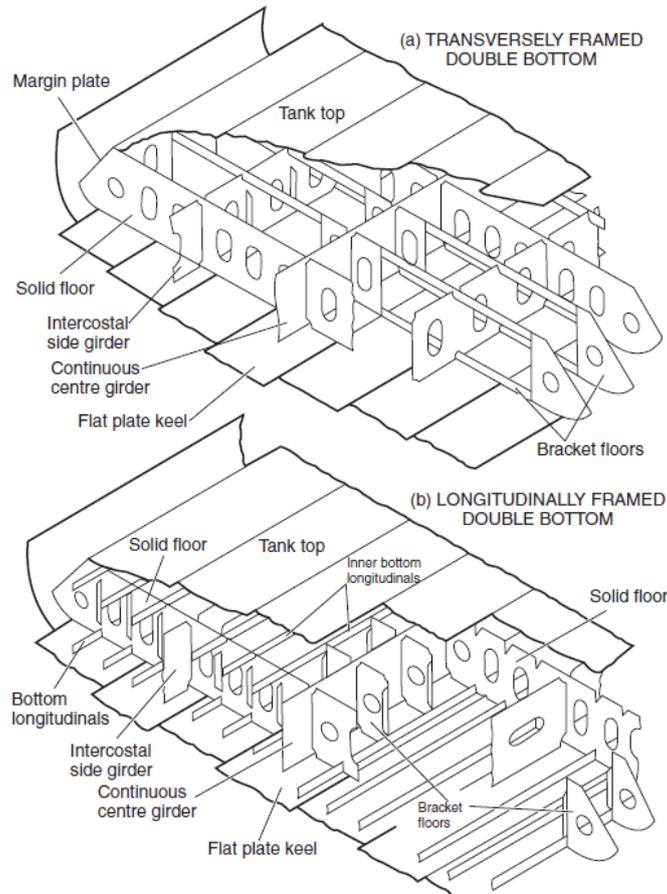


Figura IV.6

In funzione della morfologia dei rinforzi ordinari si distinguono due configurazioni strutturali di riferimento:

- Doppiofondo a struttura trasversale;
- Doppiofondo a struttura longitudinale.

Il doppiofondo a struttura trasversale presenta **madieri a telaio (bracket floor)** in corrispondenza delle ossature. Sono costituiti da un profilato inferiore, saldato ai fasciami del fondo, detto **costa (bottom frame)**, e da un profilato superiore, saldato al cielo del doppiofondo, detto **rovescia (inner bottom frame)**. Alle estremità laterali alle marginali mediante delle squadre (*bracket*). Ad intervalli regolari sono normalmente posti degli elementi verticali detti puntoni (*strut*) che servono a spezzare la campata dei rinforzi. Ogni tre o quattro ossature ordinarie si inserisce un **madiere pieno (solid floor)** al posto di quello a telaio. I madieri pieni sono costituiti da lamiere alleggerite con fori e passi d'uomo (*manhole*). Se il doppiofondo è adoperato come deposito di liquidi, nei

madieri pieni sono praticati dei fori di drenaggio (*drain holes*) nella parte inferiore per consentire il completo svuotamento dei depositi e fori di sfogo aria (*air holes*) nella parte superiore per assicurare il deflusso dell'aria ed il completo riempimento dei depositi in fase di caricaione.

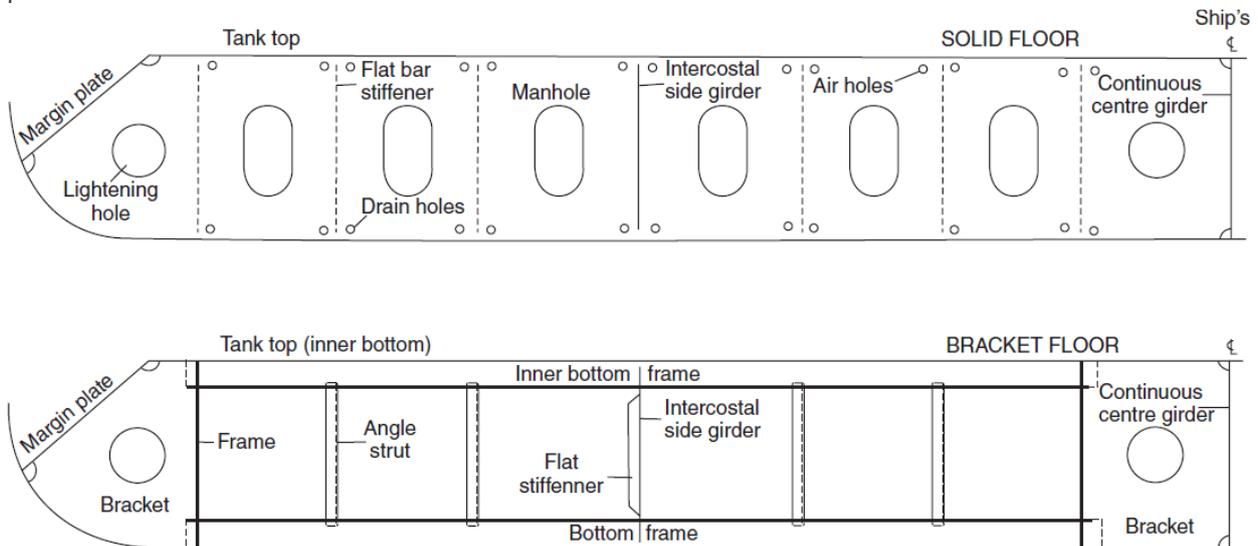


Figura IV.7

Nel doppiofondo a struttura longitudinale, comunemente reperibile nel caso di navi di grandi dimensioni, i fasciami del fondo e del cielo sono irrigiditi da **correnti longitudinali** sostenuti da **madieri pieni (solid floor)** irrigiditi da montanti in corrispondenza dei correnti. Tra due successivi madieri pieni il paramezzale centrale e le marginali sono collegate ai fasciami del fondo e del cielo mediante squadre che si estendono fino ai correnti adiacenti, che realizzano complessivamente un **madiere intercostale (bracket floor)**. I correnti longitudinali, come tutti i rinforzi ordinari, sono continui in corrispondenza dell'attraversamento dei madieri. Nelle lamiere vengono dunque praticate delle feritoie, appropriatamente sagomate per consentire l'attraversamento dei correnti longitudinali. Il collegamento dei rinforzi con la lamiera è irrobustito con dei piatti a raddoppio sul madiere detti **mascherine**.

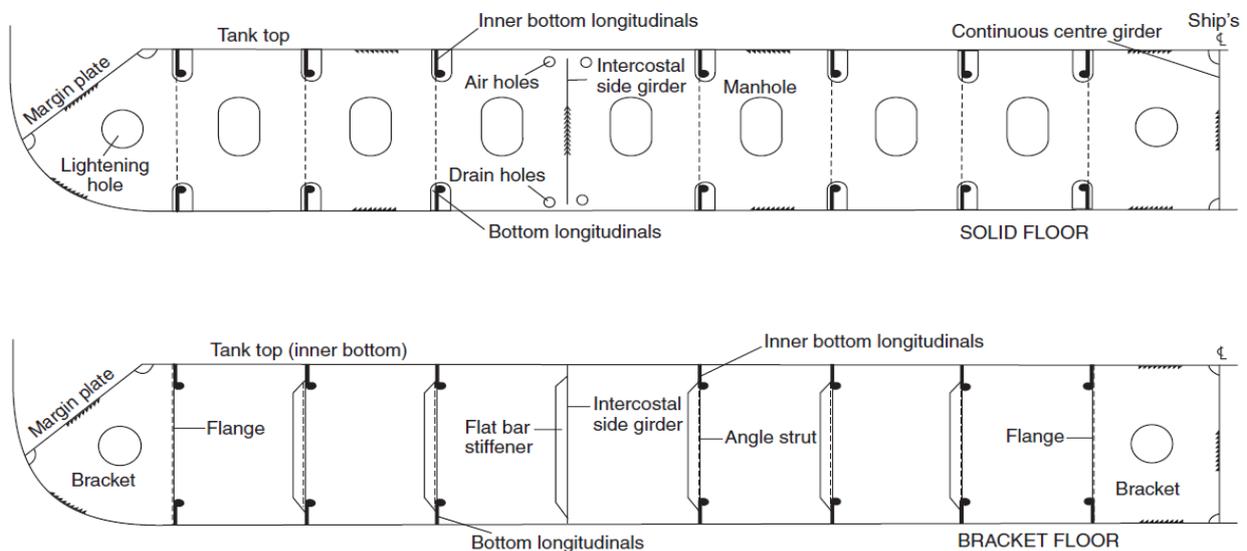


Figura IV.8

IV.1.4 Strutture del ponte

I ponti devono resistere ai carichi locali direttamente gravanti su essi. Così come nel caso precedente esistono due distinte configurazioni strutturali:

- **Struttura trasversale:** i fasciami dei ponti sono irrobustiti da rinforzi ordinari detti **bagli ordinari (deck beams)** che si connettono alle costole del fianco. I bagli ordinari sono sostenuti da **anguille (deck girder)** che nel caso di navi con ampie boccaporte fungono anche da rinforzo dell'apertura stessa;
- **Struttura longitudinale:** i fasciami dei ponti sono irrobustiti da rinforzi ordinari detti **correnti longitudinali del ponte (deck longitudinals)** che si connettono ai **madieri rinforzati (deck transverses)** disposti nel piano trasversale.

In entrambi i casi in prosecuzione dei fasciami del fianco sono sistemate le strutture dei **parapetti di murata (bulwark)** irrigiditi con strutture trasversali detti **scalmi (bulwark stay)**. Il fasciame di estremità che connette le strutture del ponte a quelle del fianco è detto **trincarino**.

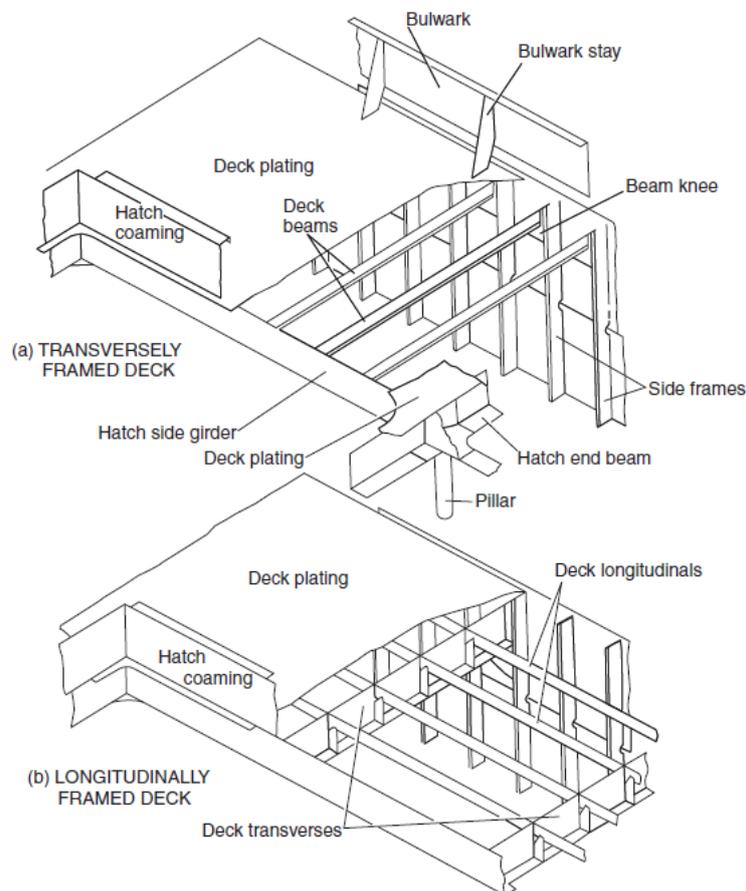


Figura IV.9

IV.1.5 Compartimentazione longitudinale della nave

La nave è dotata di un certo numero di paratie trasversali che assolvono i compiti di compartimentazione, di sicurezza contro la collisione, di robustezza, di suddivisione dei volumi interni. Per quanto attiene l'aspetto strutturale, le paratie trasversali costituiscono diaframmi di irrigidimento della trave-nave che, tuttavia, non contribuiscono in maniera diretta alla robustezza longitudinale. Tutte le navi sottoposte devono avere almeno le seguenti paratie stagne trasversali:

- paratia di collisione;
- paratia del gavone di poppa;
- due paratie delimitanti il locale apparato motore nelle navi con macchine al centro o una paratia a proravia del locale apparato motore nelle navi con macchine a poppa. Nel caso di navi con un impianto a propulsione elettrica, sia il locale dei generatori, sia il locale motori di propulsione, devono essere delimitati da paratie stagne.

Il numero minimo di paratie è tuttavia suggerito, in prima approssimazione dagli Enti di Classifica, ma deve comunque essere stabilita in modo da soddisfare i requisiti di stabilità in allagamento previsti dalle normative.

Lunghezza di bordo libero (m)	Numero di paratie per le navi con macchine a poppa	Numero di paratie per le altre navi
$L < 65$	3	4
$65 \leq L < 85$	4	5
$85 \leq L < 105$	4	5
$105 \leq L < 120$	5	6
$120 \leq L < 145$	6	7
$145 \leq L < 165$	7	8
$165 \leq L < 190$	8	9
$L \geq 190$	da stabilire caso per caso	

Tabella IV.4

Le **paratie piane (plain watertight bulkhead)** sono realizzate con corsi orizzontali di lamiera a spessore decrescente con l'altezza, rinforzati da montanti verticali collegati mediante squadre di estremità alle strutture di rinforzo del ponte e del fondo. Quando l'altezza delle paratie è elevata, la campata dei montanti è interrotta da traverse rinforzate che si collegano alle strutture del fianco. Nel caso di navi a struttura longitudinale, i correnti sono di norma passanti nelle paratie e le feritoie in essa praticate sono chiuse con delle opportune **mascherine stagne**.

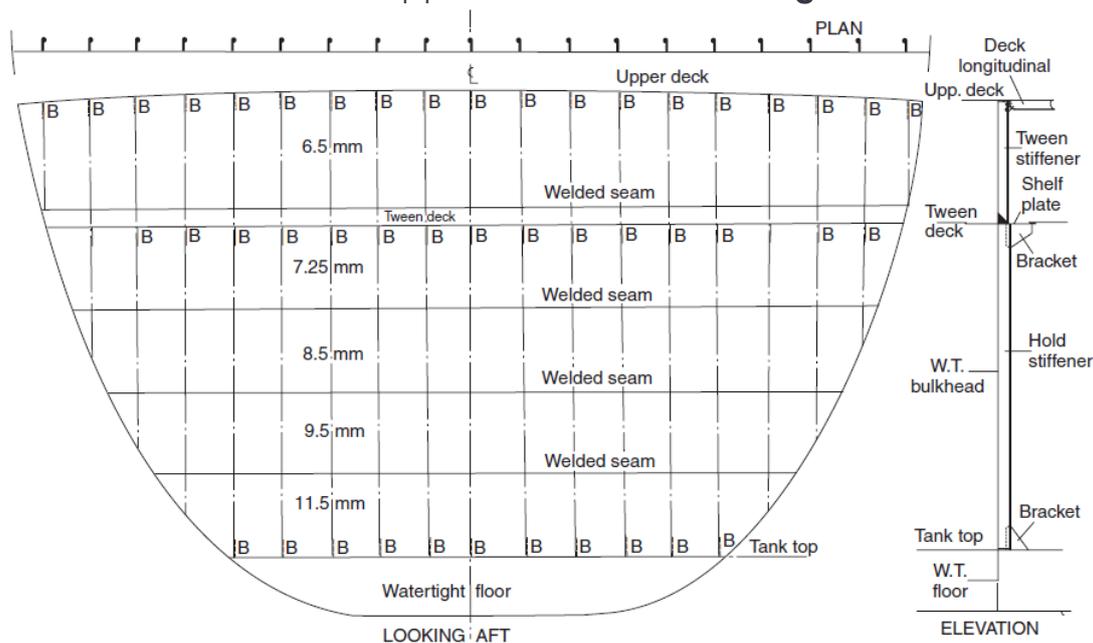


Figura IV.10

Le **paratie corrugate (corrugated watertight bulkhead)** hanno una geometria tale, detta corrugazione, che conferisce alla struttura una adeguata robustezza, consentendo di eliminare i montanti di irrigidimento. In tal modo è possibile ottenere dei cospicui risparmi in peso e si evita anche l'accumulo di sporcizia o di carico pagante sulle strutture di rinforzo. Tale morfologia strutturale trova ampio impiego nelle navi bulk-carrier, dal momento che il carico scorrevole trasportato tenderebbe ad accumularsi nei recessi realizzati dalle strutture di irrigidimento, qualora la paratia fosse piana.

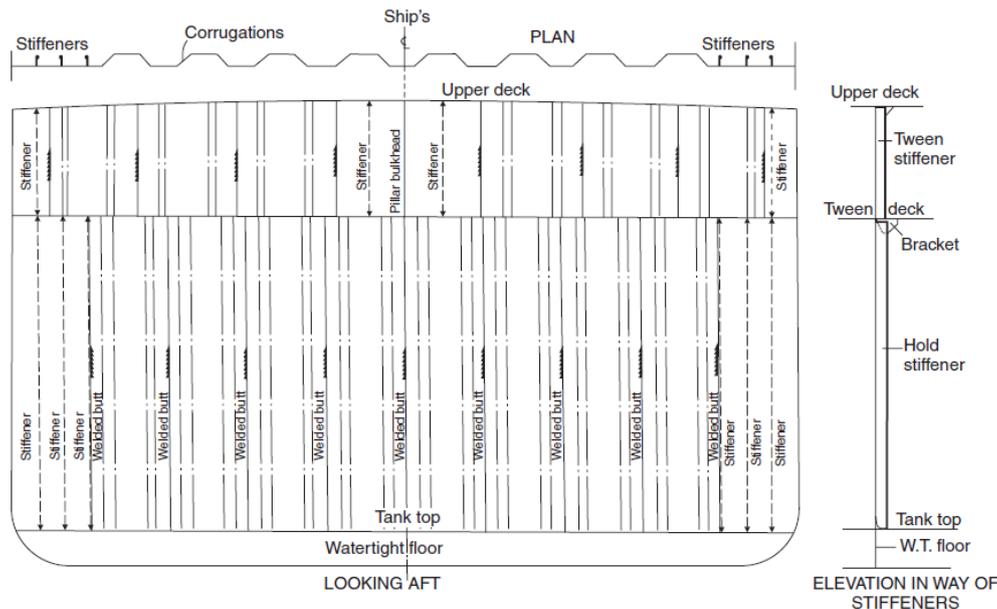


Figura IV.11

IV.2 Sezioni maestre tipiche

IV.2.1 Navi da carico generale

La sezione maestra in esame è quella di una nave *da carico generale a struttura mista* dal momento che il fondo, il ponte e l'interponte hanno configurazione longitudinale mentre il fianco ha configurazione trasversale. La nave è dotata di doppiofondo con chiglia piatta e paramezzale centrale. In figura è rappresentato un madiere pieno con fori di alleggerimento e passi d'uomo irrigidito con montanti, rappresentati schematicamente con linee verticali dotate di frecce di estremità. Il doppiofondo è dotato di marginale sulla quale si raccorda la squadra di collegamento con la costola ordinaria di stiva. L'interponte e il ponte coperto sono a struttura longitudinale e nel disegno sono anche rappresentati i relativi madieri rinforzati dotati di opportune feritoie per il passaggio dei correnti longitudinali. L'acronimo OBP identifica il tipo di ferro utilizzato per la costruzione dei correnti longitudinali delle navi. I correnti longitudinali del fondo e del cielo del doppiofondo della nave sono realizzati mediante *piatti a bulbo*, univocamente definiti dall'acronimo **OBP (Holland Bulb Plate)**. I principali profilati adoperati in ambito navale per la realizzazione dei correnti longitudinali sono prevalentemente 4:

- 1) Ferri piatti;
- 2) Ferri a L;

- 3) Ferri a T;
- 4) Piatti a bulbo.

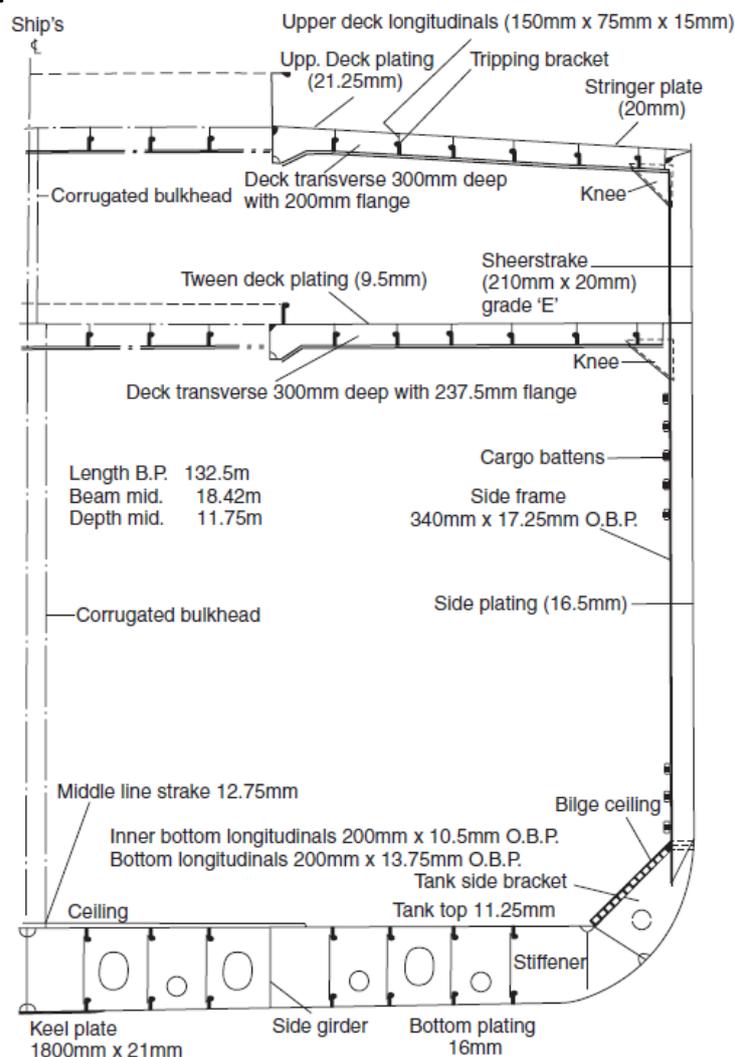


Figura IV.12

La morfologia del ferro dipende dalla geometria della sezione trasversale che è vista sempre sezionata nei piani delle sezioni maestre di navi a struttura longitudinale o mista. *I piatti a bulbo si usano perché a parità di materiale consentono di incrementare l'inerzia dell'elemento, il suo modulo di resistenza e la rigidezza flessionale.* I ferri piatti sono realizzati con un'unica barra posta perpendicolarmente ai fasciami. I ferri a L e a T sono realizzati, invece, mediante due ferri piatti tra loro perpendicolari che formano complessivamente una morfologia della sezione trasversale a L o a T, saldati tra loro con cordoni d'angolo o di spigolo. Infine i piatti a bulbo sono simili ai ferri piatti ma sono dotati di un ringrosso di estremità detto testa del piatto a bulbo che ne incrementa le caratteristiche di robustezza flessionale.

IV.2.2 Navi portarinfuse solide

Anche questa sezione è tipica di una nave a struttura mista, infatti fondo e ponte sono a struttura longitudinale, mentre il fianco è a struttura trasversale e presenta solo costole ordinarie di stiva. Il doppiofondo non è dotato di marginale poiché è direttamente connesso ai fasciami dello scivolo basso. Il madiere rinforzato è dotato di passi d'uomo e di montanti di irrigidimento. Le casse alte e basse sono dotate al loro interno di

strutture trasversali dette rispettivamente anelli rinforzati di cassa bassa e di cassa alta. Il fianco della nave è a struttura longitudinale nelle zone interne alle casse laterali mentre è a struttura trasversale nella zona afferente alla stiva del carico.

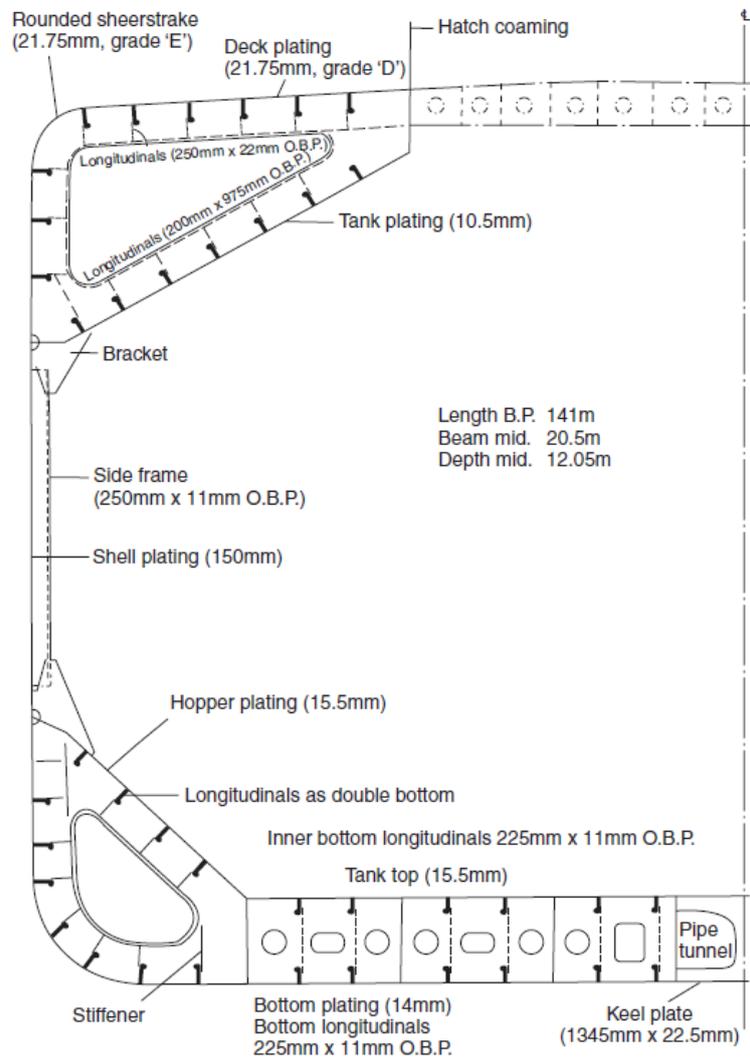


Figura IV.13

IV.2.3 Navi portacontenitori

Le navi portacontenitori sono a struttura longitudinale, a differenza delle precedenti. In particolare, le strutture del doppio fondo e del doppio fianco, così come quelle dello scafo esterno, hanno morfologia longitudinale. La nave è dotata di chiglia condotta come desumibile dall'assenza del paramezzale centrale e dalla presenza dei due paramezzali laterali simmetrici rispetto alla traccia del piano di simmetria della nave. Lo schema rappresenta l'ordinata rinforzata della nave come desumibile dalla presenza del madiere rinforzato nel doppiofondo e della costola rinforzata nel doppio fianco. Il madiere rinforzato presenta inoltre passi d'uomo per l'ispezione dei doppiofondi, mentre la costola rinforzata presenta una serie di fori d'alleggerimento per ridurre il peso strutturale della nave. All'interno del doppio fianco sono presenti una serie di interponti trasversalmente discontinui che hanno come scopo quello di realizzare dei camminamenti nel doppio fianco della nave.

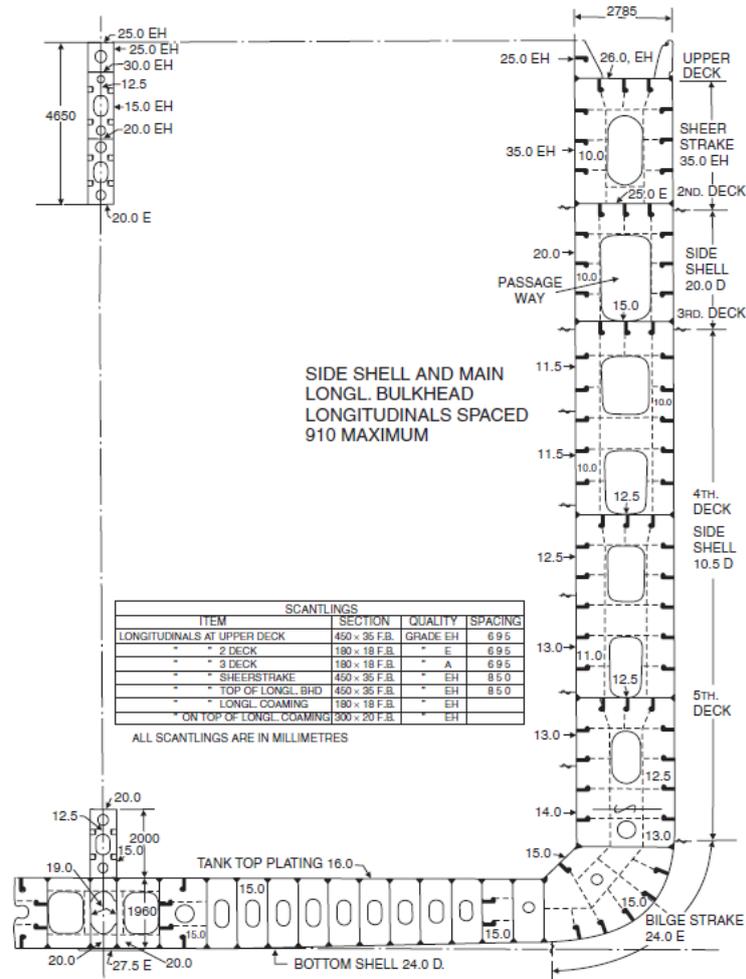


Figura IV.14

IV.2.4 Navi traghetto

La nave ha complessivamente struttura mista dal momento che fondo e ponte hanno configurazione longitudinale mentre la parte compresa tra il cielo del doppio fondo e il train deck ha configurazione trasversale. La nave è dotata di 3 ponti veicoli di cui il primo coincidente con il cielo del doppiofondo, il secondo coincidente con il *train deck* e il terzo con il *vehicle deck*. L'imbarco dei veicoli è regolato da un preciso ordine gerarchico secondo cui i veicoli con carico asse maggiore sono disposti sui ponti inferiori, sia per motivi di robustezza strutturale che per migliorare la stabilità trasversale della nave. Le strutture al di sopra del train deck rappresentano le sovrastrutture del 1° e del 2° ordine dal momento che sono poste al di sopra della traccia del galleggiamento di pieno carico della nave e dunque al di sopra del ponte di bordo libero. Il ponte garage inferiore è separato dal fianco esterno della nave mediante una cassa di bilanciamento (*heeling tank*). I ponti superiori invece sono separati dal fianco esterno mediante delle intercapedini vuote (*void casing*) che ospitano normalmente le scale e i percorsi di sfuggita verso i ponti superiori. La presenza del train deck ad una quota ridotta rispetto al galleggiamento di pieno carico è sostanzialmente legata alla possibilità di non rispettare al di sopra di quest'ultimo i requisiti minimi sul numero di paratie trasversali di compartimentazione longitudinale della nave.

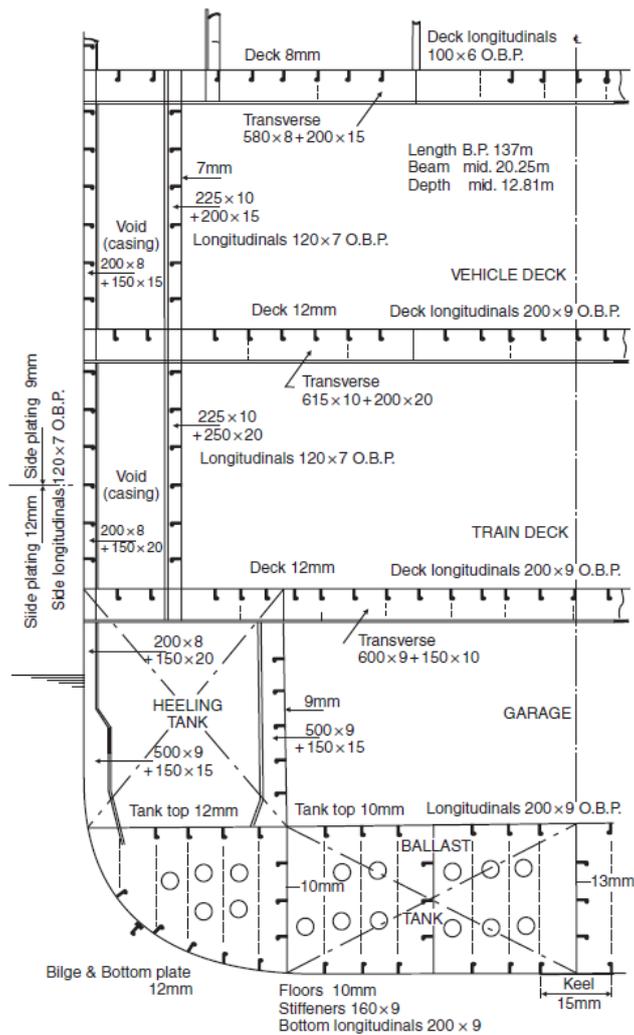


Figura IV.15

IV.3 Disegni strutturali di una nave bulk carrier

IV.3.1 Vista longitudinale

In Figura IV.16 è rappresentato il profilo longitudinale di una nave bulk carrier da 35000 DWT con locale apparato motore e sovrastrutture a poppa. Le stive del carico sono numerate progressivamente da prora verso poppa e sono pari a 5, valore tipico delle bulk carrier hand-size. Le linee verticali tratto-punto, individuate rispettivamente ai frame 0 e 221, rappresentano la perpendicolare addietro e la perpendicolare avanti. La prima coincide con l'asse del timone, mentre la seconda passa per l'intersezione della traccia del galleggiamento di pieno carico della nave con il dritto di prora. Nella parte inferiore del disegno sono indicati, mediante quotatura, gli **intervalli di ossatura (frame space)** della nave. Si rammenta che tale valore rappresenta la distanza nel piano longitudinale tra due elementi trasversali ordinari contigui. Nel caso in esame tale intervallo è pari a 600 mm fino alla paratia poppiera del locale apparato motore posta al frame 12. Successivamente tale intervallo è pari a 800 mm e tale distanza rappresenta dunque l'intervallo tra due costole ordinarie di stiva della nave. L'intervallo d'ossatura è nuovamente pari a 600 mm a proravia del frame 209. La numerazione progressiva dei frame consente inoltre di ottenere ulteriori informazioni riguardanti il

posizionamento longitudinale degli elementi di rinforzo trasversale della nave, ovvero nel caso in esame delle paratie di compartimentazione. Da quanto detto si deduce che la paratia poppiera del locale apparato motore posta al frame 12 è ubicata a 7200 mm dalla perpendicolare addietro. Similmente è possibile dedurre il posizionamento longitudinale delle restanti paratie tenendo conto dell'intervallo di ossatura. La stiva numero 3 è inoltre allagabile, ovvero può essere riempita con acqua di mare allorquando la nave è priva di carico pagante. Il volume a poppavia del frame 12 si definisce gavone addietro. Mentre quello a proravia della paratia di collisione ubicata al frame 209 si definisce gavone avanti.

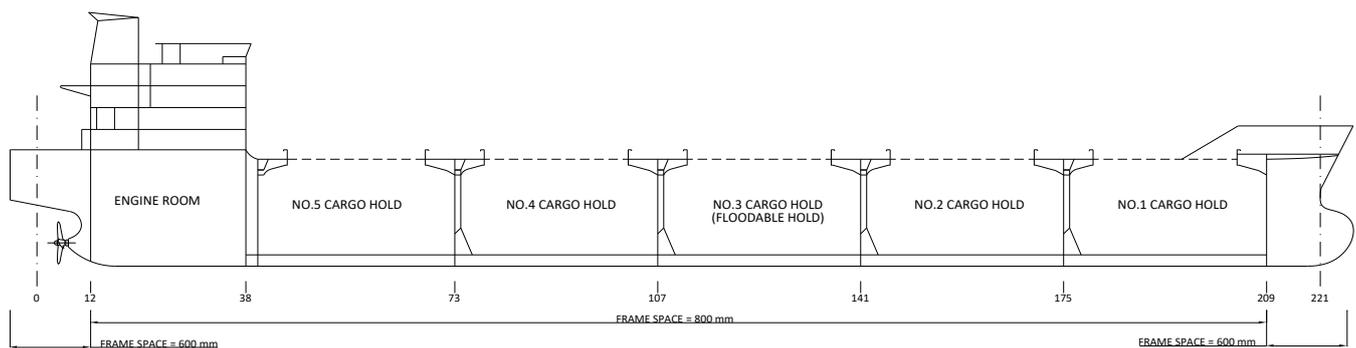


Figura IV.16

IV.3.2 Sezione ordinaria

Nella parte bassa destra del disegno in Figura IV.17 è posto un cartiglio dove sono riportate le dimensioni principali della nave. Nella parte in alto a destra sono invece forniti i dettagli in merito alle viste rappresentate nei piani strutturali della nave e ai materiali adoperati. In particolare, tutte le strutture della nave sono simmetriche ad eccezione di ove diversamente indicato. Le viste in pianta, trasversali e longitudinali, sono ottenute guardando lo scafo rispettivamente dall'alto verso il basso, da poppa verso prora e da dritta verso sinistra nave. Inoltre, in accordo alla classificazione degli acciai già vista in precedenza, le strutture della nave sono realizzate con acciai NSS di tipo A e D e con acciai HSS di tipo AH, DH, AH36, DH36, EH36. La sezione riportata nello schema è posta al frame 138, ovvero ad una distanza dalla perpendicolare addietro pari a circa 108 metri, come desumibile dalla seguente relazione:

$$\{[138 - 12] \times 800\} + (12 \times 600) \text{ mm}$$

Dall'analisi comparata del posizionamento longitudinale della sezione ordinaria di stiva con il layout longitudinale della nave, si deduce che la sezione trasversale al frame 138 è realizzata in corrispondenza del cross deck tra le stive numero 2 e numero 3. La presenza del cross deck è inoltre confermata dalle strutture ordinarie e rinforzate rappresentate nel disegno strutturale a destra della mastra della boccaporta.

La nave è chiaramente a struttura mista dal momento che il doppiofondo, la cassa bassa e la cassa alta sono a struttura longitudinale, mentre il fianco all'interno della stiva del carico è a struttura trasversale. Nella parte centrale è inoltre presente una tabella in cui sono riportati i dimensionamenti di tutti i correnti longitudinali della nave. La linea della traccia del piano di simmetria è indicata con il simbolo **CL (centre line)**.

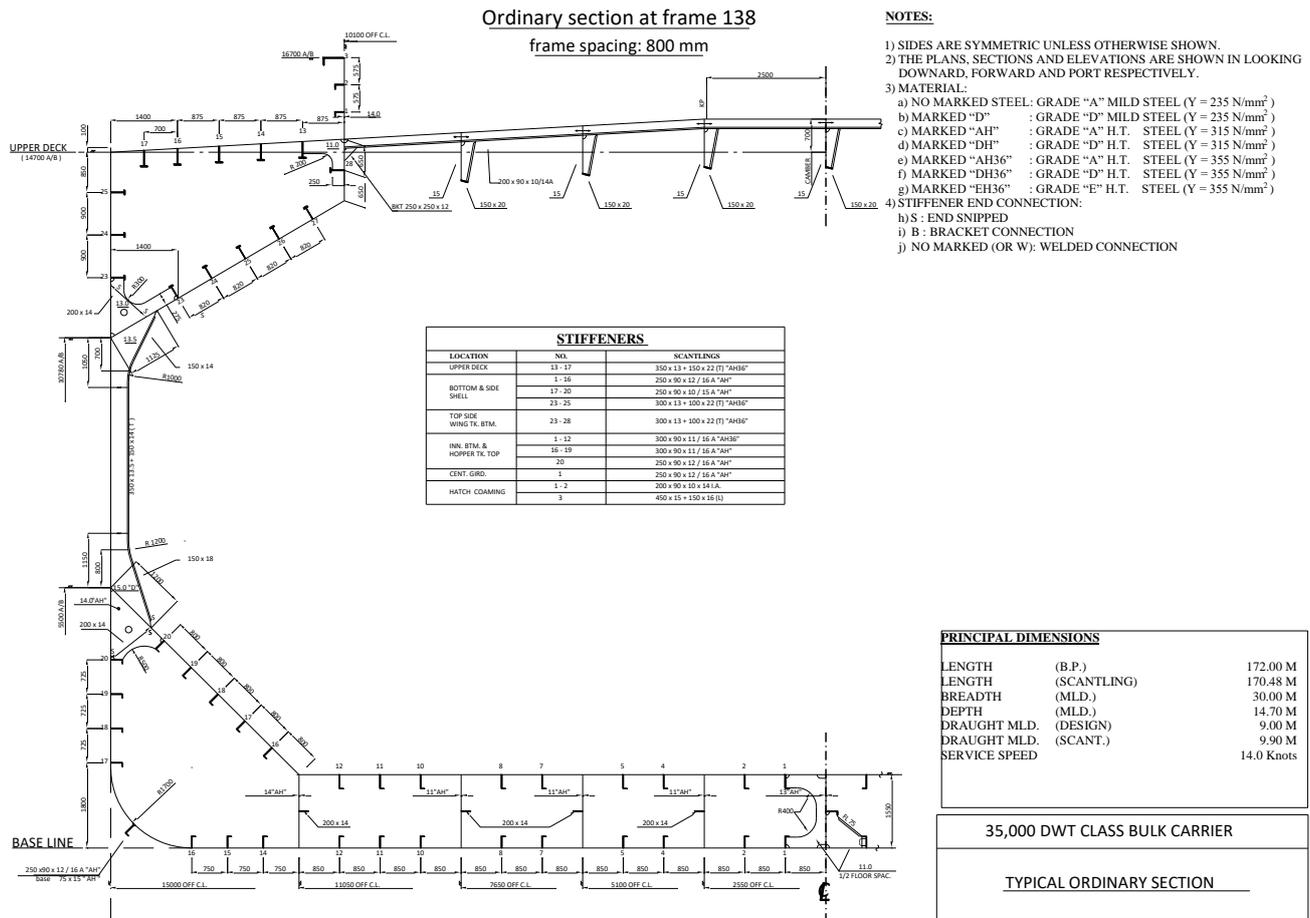


Figura IV.17

Il doppiofondo è dotato di chiglia piatta perché ha il paramezzale centrale, mentre i correnti longitudinali sono ad L, come si evince dalla tabella "STIFFENERS", in cui il simbolo A indica che i correnti longitudinali sono stati saldati in cantiere con saldatura d'angolo. I correnti longitudinali del fondo e del fianco all'interno della cassa bassa sono numerati progressivamente da 1 a 20. I relativi dimensionamenti, unitamente ai materiali adoperati, sono riportati nella cella *bottom and side shell*. In particolare i correnti del fondo da 1-16 sono ferri a L 250x90x12/16, aventi anima alta 250 mm e spessa 12 mm e piattabanda larga 90 mm e spessa 16 mm. Tale modalità di lettura del dimensionamento dei correnti longitudinali vale per tutti gli elementi con profilo ad L. Dalla tabella si deduce, inoltre, che i correnti longitudinali del fondo e del fianco sono realizzati con acciai AH, mentre quelli del cielo del doppio fondo in acciaio AH36. Sia il paramezzale centrale che i paramezzali laterali sono rinforzati con un ulteriore corrente longitudinale posto a metà dell'altezza del doppio fondo, pari a 1550 mm. Il corrente longitudinale di rinforzo del paramezzale centrale è a L, mentre i correnti di rinforzo dei paramezzali laterali sono ferri piatti 200x14 mm. In corrispondenza del paramezzale centrale si trovano inoltre due elementi locali di irrigidimento del doppiofondo. A sinistra del paramezzale centrale è presente nel piano di sezione un collare a C che collega il paramezzale con il primo corrente longitudinale del fondo e del cielo del doppiofondo. Invece a destra del paramezzale centrale è presente una squadra disposta nel piano di sezione che connette il primo corrente longitudinale del fondo con il corrente longitudinale di irrigidimento del paramezzale centrale. Un ulteriore elemento di rinforzo

locale è presente in corrispondenza dell'estremità superiore della cassa bassa, dove è disposta un'ulteriore squadra di irrigidimento che ha come scopo quello di supportare la squadra di piede della costola nella zona di passaggio dalla struttura a configurazione longitudinale al fianco a quella avente configurazione trasversale. Infine, i fasciami del fianco e del fondo sono collegati fra loro mediante un elemento curvo detto ginocchio avente raggio pari a 1700 mm. All'esterno della carena in prossimità del corso di fasciame del ginocchio, è ubicata l'aletta antirollio che ha come scopo quello di smorzare l'ampiezza e l'accelerazione angolare del moto di rollio della nave. Infine, dall'ordinata comune è anche possibile desumere il dimensionamento del paramezzale centrale e di quelli laterali. Partendo dal centro nave ed andando verso il fianco, lo spessore dei vari paramezzali è rispettivamente pari a 13, 11, 11, 11, e 14 mm. Tali elementi strutturali sono tutti realizzati in acciai AH.

Per quando attiene le strutture del ponte, la cassa alta ha configurazione longitudinale. Tutti i correnti longitudinali sono ferri a T i cui dimensionamenti sono riportati nella cella *bottom and side shell* per i correnti del fianco, nella cella *upper deck* per i correnti del ponte e nella cella *top side wing tank bottom* per i correnti dello scivolo alto. Il ponte è dotato di cavallino realizzato con tratti di fasciami aventi diversa inclinazione sull'orizzontale. La porzione centrale del ponte di coperta in corrispondenza del *cross deck* è larga 5000 mm a cavallo della traccia del piano di simmetria ed è ubicata 700 mm al di sopra dell'orlo a murata della nave. Tale fasciame è connesso all'orlo a murata con fasciami subverticali inclinati di circa 3° sull'orizzontale che consentono in tal modo di sversare in mare eventuali imbarchi di acqua sul ponte. La mastra della boccaporta è ulteriormente irrigidita con 3 correnti longitudinali i cui dimensionamenti sono riportati nella cella *Hatch Coaming*. Infine, la parte di ponte afferente al solo *cross deck* è a struttura trasversale e i relativi fasciami sono supportati da bagli ordinari realizzati mediante ferri a L 200x90x10/14 mm in acciaio ordinario. I bagli ordinari sono ulteriormente supportati da strutture longitudinali a sbalzo, dette mensoloni, collegate alla paratia corrugata di stiva.

IV.3.3 Sezione rinforzata

Nello schema dell'ordinata rinforzata, riportata in Figura IV.18, sono presenti ulteriori strutture disposte nel piano trasversale della nave. In particolare, il doppio fondo è irrigidito con un madiere rinforzato dotato di passi d'uomo per l'ispezione del doppio fondo stesso. Le casse bassa ed alta sono invece dotate di anelli rinforzati con fori di alleggerimento.

Il dimensionamento strutturale dei madieri è reperibile nella tabella *FLOOR SCANTLINGS*. Tale tabella riporta i dimensionamenti dei madieri afferenti rispettivamente alle stive del carico numero 2, 3 e 4. Per determinare il dimensionamento del madiere è innanzitutto necessario conoscere il frame in corrispondenza del quale lo stesso è ubicato che nel caso in esame è il frame 136. Il madiere è, inoltre, interrotto in corrispondenza di tutte le intersezioni con i paramezzali centrale e laterali. Pertanto lo stesso è suddiviso in 4 elementi strutturali di cui il primo è compreso tra il paramezzale centrale e il primo paramezzale laterale, mentre i successivi tra un paramezzale laterale e quello

contiguo. Lo spessore della prima parte del madiere è sempre costante ed è pari a 11.5 mm in acciaio ordinario. Gli spessori delle altre parti del madiere sono indicati con gli acronimi T1, T2 e T3, i cui valori sono riportati nella tabella in funzione dell'ubicazione longitudinale del madiere rinforzato, definita attraverso il frame di appartenenza. Il madiere è, inoltre, dotato di passo d'uomo larghi 800 mm e alti 600 mm. In corrispondenza dell'attraversamento di tutti i correnti longitudinali del fondo e del doppio fondo lo stesso presenta ulteriori aperture sagomate per il passaggio dei rinforzi ordinari, in corrispondenza delle quali sono posti degli elementi di irrigidimento locale, detti mascherine, che collegano i correnti longitudinali al madiere rinforzato.

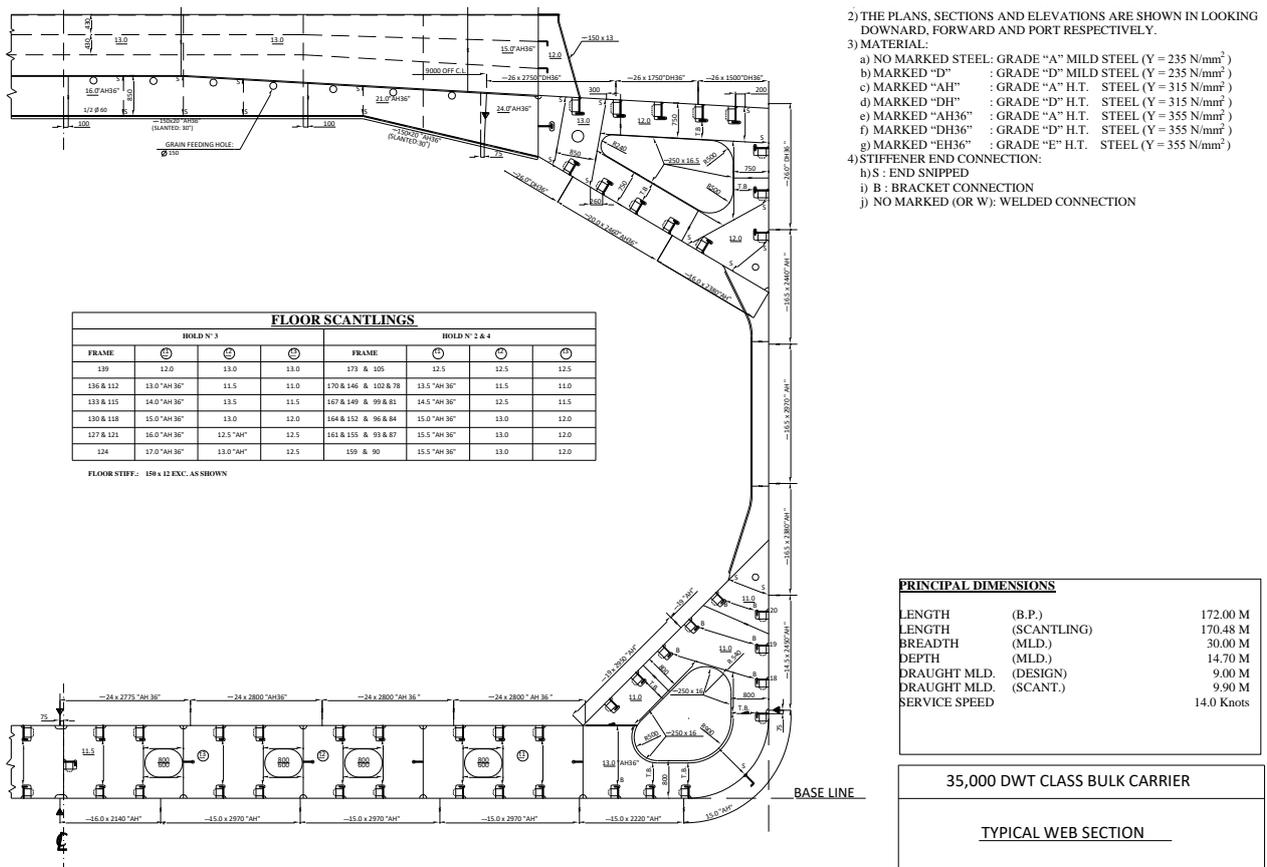


Figura IV.18

L'anello rinforzato di cassa bassa è realizzato con una configurazione simile a quella del madiere rinforzato e al centro presenta un ampio foro di alleggerimento con raggio di curvatura variabile. Analizzando le strutture del fondo è inoltre possibile dedurre anche gli spessori dei fasciami di chiglia, del fondo, del ginocchio, del fianco, del cielo del doppio fondo e dello scivolo basso. Ad esempio, il corso di chiglia a dritta nave ha uno spessore di 16 mm, una larghezza di 2140 mm ed è realizzato in acciaio AH.

Le costole di stiva sono sempre ordinarie dal momento che il fianco delle navi a struttura mista non presenta strutture rinforzate nel piano trasversale.

Con riferimento alle strutture del ponte, la nave è dotata di un baglio rinforzato che nella parte superiore presenta dei fori di diametro pari a 250 mm detti *grain feeding holes*. Tali fori consentono di saturare i volumi poppiero e prodiero della stiva del carico al di sotto del *cross deck* che risulterebbero altrimenti di difficile saturazione generando

in tal modo dei volumi di stiva vuoti e riducendo pertanto la capacità di carico complessiva della nave.

IV.3.4 Paratia corrugata

Lo schema in Figura IV.19 rappresenta la sezione trasversale in corrispondenza della paratia corrugata di stiva posta al frame 141, ovvero in corrispondenza dell'estremità prodiera della stiva del carico numero 3. Nella parte di sinistra del disegno è rappresentata una sezione longitudinale in corrispondenza del piano di simmetria della nave, nella quale è possibile visionare le strutture di raccordo della paratia corrugata al doppio fondo e al cross deck.

Partendo dalla vista trasversale il doppio fondo al frame 141 è di tipo stagno. In altri termini, il madiere è anche paratia di compartimentazione del doppio fondo della nave e separa un compartimento da quello contiguo. A differenza del madiere rinforzato dotato di passi d'uomo, il madiere stagno ha uno spessore costante pari a 17.5 mm in acciaio AH. Similmente l'anello rinforzato di cassa bassa è sostituito da un setto stagno di separazione della cassa bassa da quella contigua. Per ripristinare lo stagno in corrispondenza dell'attraversamento dei correnti longitudinali, il madiere rinforzato presenta delle mascherine stagne che consentono anche di vincolare i correnti longitudinali al madiere stesso.

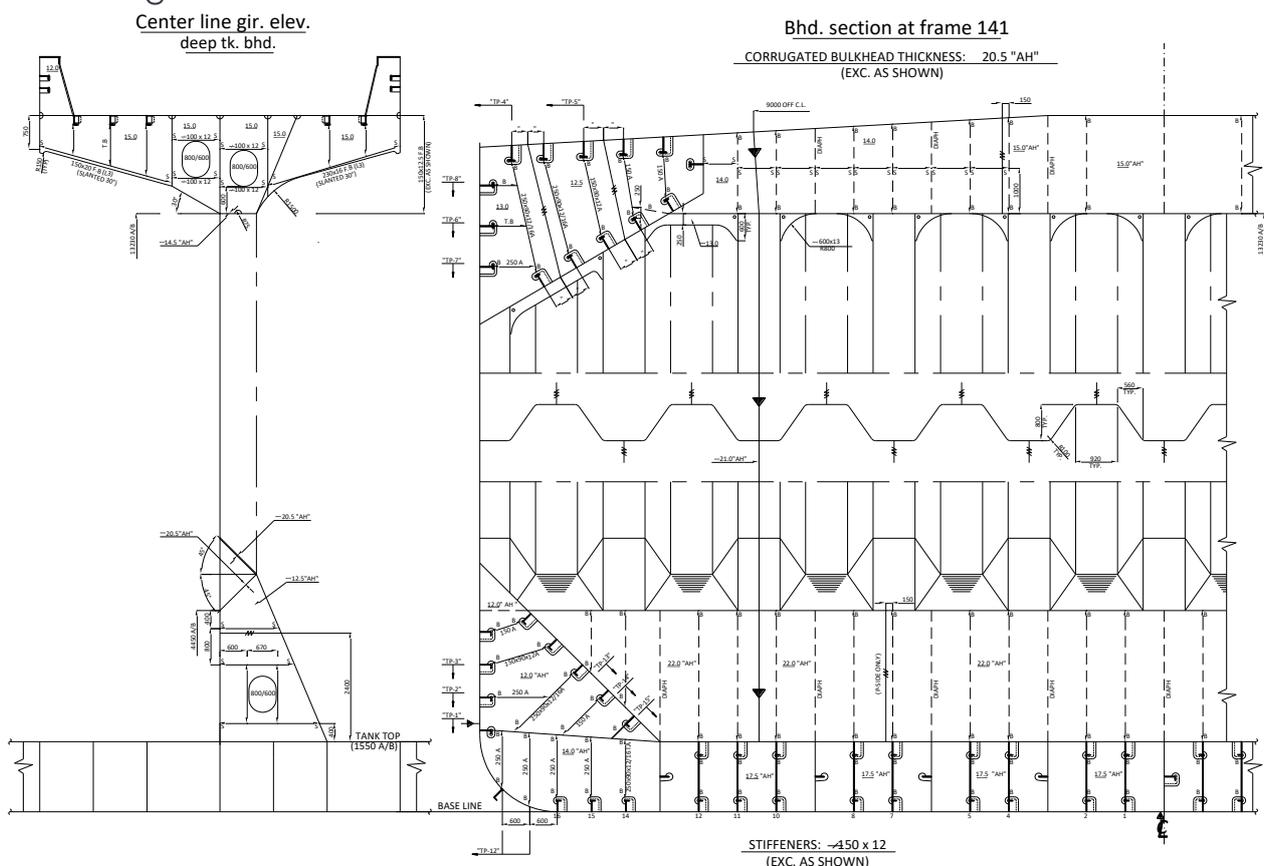


Figura IV.19

La stessa configurazione strutturale è riscontrabile nel setto stagno della cassa. Come detto, la paratia di compartimentazione di stiva è in corrugata. La stessa si estende verticalmente tra il cassonetto basso e il cassonetto alto. Il primo ha una forma trapezoidale ed è irrigidito con diaframmi dotati di passi d'uomo per la sua ispezione.

Una configurazione analoga è riscontrabile nel il cassonetto alto della paratia che ha ancora una volta una forma di tipo trapezoidale. La paratia corrugata si estende con continuità tra il cassonetto basso e quello alto.

Inoltre, nella sezione trasversale della paratia è presente anche una sezione locale, dalla quale è possibile desumere le dimensioni principali del modulo di corrugazione. L'introduzione di tale sezione non comporta la perdita di informazioni per quanto attiene la morfologia strutturale della paratia, ma consente di ottenere ulteriori informazioni in merito alla modalità realizzativa del singolo modulo di corrugazione che si ripete identicamente muovendosi da centro nave verso il fianco. In particolare, il modulo di corrugazione ha una profondità di 800 mm e una larghezza alla base di 920 mm, mentre i due elementi subverticali hanno una proiezione sull'orizzontale di 560 mm. Il singolo modulo di corrugazione si ripete identicamente e questo spiega l'apposizione dell'acronimo *TYP*. La profondità del modulo di corrugazione può essere desunta anche dalla sezione longitudinale della paratia corrugata, dove sono presenti 2 linee verticali, di cui una continua l'altra con tratto lungo - tratto breve, rappresentative dei due elementi del modulo di corrugazione.

Tutta la paratia ha uno spessore pari a 20.5 mm ed è realizzata in acciaio AH. Nella sezione trasversale è inoltre visibile una linea verticale con delle frecce annerite, che rappresenta una linea di blocco. Tale linea fa comprendere che la nave è costruita in blocchi pre-allestiti in funzione delle dimensioni dei capannoni di produzione e della capacità di sollevamento delle gru di cantiere. Il posizionamento delle linee di blocco viene scelto esclusivamente in funzione di aspetti tecnologici o di natura gestionale del sito di produzione. Nella parte superiore della paratia corrugata sono inoltre vincolati al cassonetto alto i mensoloni di stiva. Tali strutture rappresentano, come già detto in precedenza, le travi rinforzate longitudinali del cross deck e hanno una configurazione a sbalzo. In altri termini, un'estremità è vincolata al cassonetto alto mentre l'altra estremità è libera. Le stesse strutture sono visibili sul layout longitudinale della nave e sono inoltre rappresentate in sezione in corrispondenza dell'ordinata comune. Si nota, infine, che le piattabande dei mensoloni non sono orizzontali ma sono inclinate di circa 30° per evitare eventuali accumuli di carichi scorrevoli.

V. Analisi dei carichi e degrado strutturale

V.1 Il momento flettente verticale

V.1.1 La caratteristica di sollecitazione

La trave-nave sotto l'azione dei carichi esterni è sottoposta ad un fenomeno di *deformazione globale*, detto **flessione verticale**, generato da una disuniforme distribuzione longitudinale dei carichi e delle spinte idrostatiche, come evidenziato in Figura V.1.

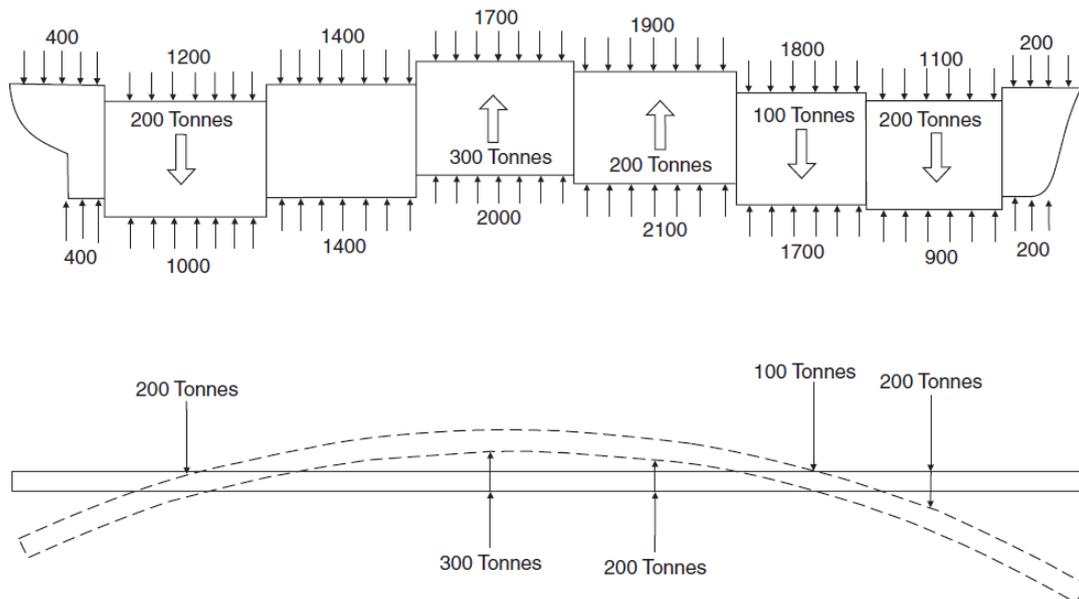


Figura V.1

Affinché sia rispettata la condizione di equilibrio alla traslazione verticale, ovvero affinché la nave galleggi in una condizione di equilibrio, le spinte e i carichi devono essere complessivamente in equilibrio. Tuttavia anche se tale condizione di equilibrio è soddisfatta a livello globale, non viene soddisfatta a livello locale ovvero su porzioni o tratti della trave-nave sui quali si registra un eccesso di carichi o un eccesso di spinta. E proprio tale squilibrio locale di spinte e carichi a produrre la caratteristica di sollecitazione di **momento flettente verticale** che a sua volta genera la flessione globale della nave nel piano verticale.

Con riferimento allo schema di Figura V.1, carichi e spinte sono globalmente in equilibrio ma si registra uno squilibrio locale caratterizzato da un eccesso di carico sui tronconi poppieri e prodieri e un eccesso di spinta sui tronconi centrali. Tale disuniforme distribuzione genera la flessione primaria della nave. La caratteristica di sollecitazione di momento flettente verticale generata da tale disomogenea distribuzione può essere legata da un lato alla distribuzione dei pesi e del carico pagante a bordo della nave e dall'altro all'azione delle onde. Considerando una nave attraversata da un treno d'onde, come rappresentato in Figura V.2, si genererà in corrispondenza del corpo centrale della nave un eccesso di carico o di spinta idrostatica a seconda che il corpo centrale sia investita dal cavo o dalla cresta dell'onda. Nel primo caso, ovvero se il cavo d'onda è ubicato in corrispondenza del corpo centrale mentre le creste sono a

prora e poppa, si genera un **momento flettente insellante (sagging)** che produce una compressione delle strutture del ponte e una trazione delle strutture del fondo. Al contrario se il treno d'onda presenta la cresta in corrispondenza del corpo centrale e i cavi in corrispondenza dei corpi poppiero e prodiero, si genera un **momento flettente inarcante (hogging)** che produce una trazione delle strutture del ponte e una compressione delle strutture del fondo. Convenzionalmente lo stato tensionale generato in una qualsiasi struttura della trave-nave è indicato con la lettera σ . Inoltre il segno della σ indica lo stato tensionale di trazione (+) o di compressione (-).

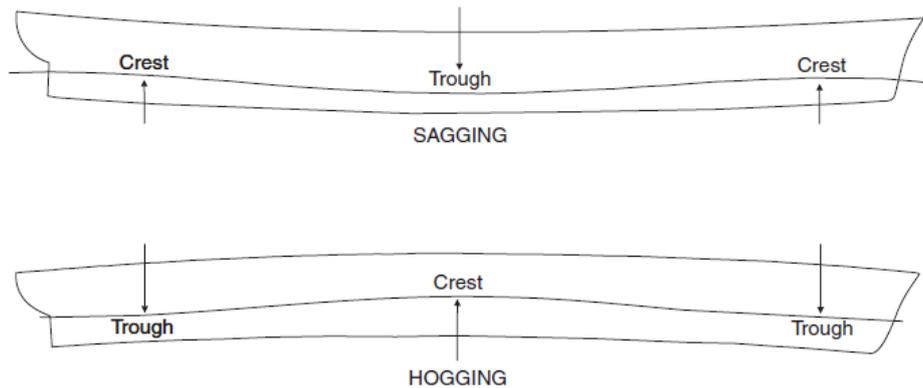


Figura V.2

V.1.2 La formula di Navier della flessione retta

Come si è detto in precedenza il momento flettente verticale genera uno stato tensionale all'interno delle strutture di trave nave σ che è positivo se le strutture sono tese, negativo se al contrario sono compresse. La distribuzione dello stato tensionale all'interno delle strutture della trave-nave si determina mediante la **formula di Navier della flessione retta**, ovvero:

$$\sigma = \frac{M}{I} z$$

avendo indicato con:

- **M** il momento flettente in N*m in corrispondenza della sezione trasversale della trave nave dove si vuole valutare lo stato tensionale;
- **I** il momento di inerzia della sezione resistente di trave-nave in m⁴, valutato rispetto all'asse baricentrico orizzontale della sezione resistente di trave nave.
- **z** la distanza verticale dell'elemento strutturale per il quale si vuole valutare lo stato tensionale, rispetto all'asse baricentrico della trave-nave, valutata in m.

Complessivamente affinché la nave operi in un campo elastico deve essere sempre verificata la disuguaglianza:

$$\sigma \leq \sigma_y$$

avendo indicato con σ_y tensione di snervamento del materiale con il quale realizzato la struttura, dipendente dal tipo di acciaio (*NSS*, *HSS*). L'analisi della formula di Navier consente di affermare che una volta fissati *M* ed *I* lo stato tensionale generato nelle strutture di trave-nave dipende dalla distanza verticale del singolo elemento strutturale dall'asse neutro della sezione resistente, posto che tale distanza **z** è *positiva* se l'elemento strutturale è posto al di sopra dell'**asse neutro** e *negativa* in caso contrario.

Da quanto detto si evince che la distribuzione dello stato tensionale vara linearmente con la quota z e quindi gli elementi maggiormente sollecitati a trazione ($\sigma > 0$) o compressione ($\sigma < 0$) sono quelli più lontani dall'asse neutro.

Pertanto in linea generale si può affermare che le strutture del ponte e del fondo della nave sono quelle più sollecitate mentre le strutture del fianco e quindi prossime all'asse neutro sono scarsamente sollecitate. L'asse neutro rappresenta dunque l'**asse di tensione nulla** e dunque di transizione tra il campo di tensioni negative e quello di tensioni positive. Tale risultato si rappresenta graficamente come in Figura V.3, apponendo a fianco al disegno della sezione resistenze di trave nave, costituita da tutti e soli gli elementi longitudinalmente continui, il cosiddetto **diagramma a farfalla** dello stato tensionale. Tale diagramma si costruisce estendendo l'asse neutro al di fuori del disegno della sezione trasversale e disegnando successivamente un segmento verticale ad esso perpendicolare. Lo stato tensionale ad una generica quota z viene rappresentato con un segmento perpendicolare a tale retta continua (*in rosso in figura*) che viene riportato a destra o a sinistra della linea verticale a seconda che l'elemento strutturale in esame sia sottoposto a trazione o a compressione.

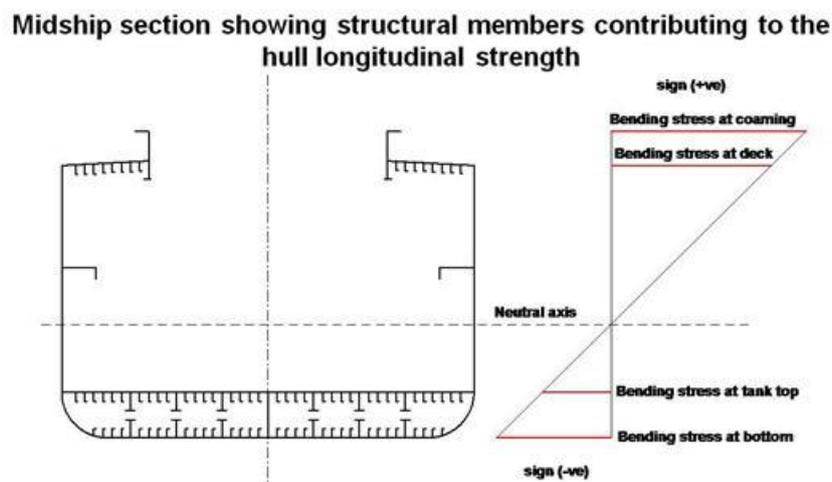


Figura V.3

V.1.3 Il modulo di resistenza di trave-nave

Convenzionalmente il momento flettente M si considera positivo se genera una deformata di **nave inarcata (hogging)** e negativo se genera una deformata di **nave insellata (sagging)**. Per verificare se la struttura opera in campo elastico, si particolarizza la formula di Navier calcolando due tensioni di riferimento in modulo e valutate in corrispondenza delle strutture maggiormente sollecitate della nave, ovvero il fondo (*bottom*) e il ponte (*deck*).

$$\sigma_B = \frac{|M|}{I} |z_B| \qquad \sigma_D = \frac{|M|}{I} z_D$$

Per quanto attiene la tensione al fondo σ_B è adoperato l'operatore valore assoluto sia per il momento flettente che per la distanza dei fasciami del fondo dall'asse neutro z_B poiché sempre negativa in quanto i fasciami del fondo sono sempre posti al di sotto dell'asse neutro. Per la tensione al ponte σ_D , invece, l'operatore valore assoluto è posto solo per il momento flettente, essendo la quota verticale dei fasciami del ponte z_D

sempre positiva poiché questi ultimi sono posizionati al di sopra dell'asse neutro della sezione resistente. In entrambi i casi ovviamente I è positivo in quanto è un momento di inerzia. Una volta calcolate le tensioni σ_B e σ_D , è possibile determinare la più grande fra le due. Pertanto, tutta la trave-nave opererà in un campo elastico se risulta verificata la seguente relazione:

$$\max\{\sigma_b; \sigma_d\} \leq \sigma_y$$

La precedente relazione può essere riscritta in una forma più conveniente:

$$\min\{W_b; W_d\} \geq \frac{|M|}{\sigma_y}$$

dove W_b e W_d sono rispettivamente il modulo di resistenza al ponte e al fondo:

$$W_b = \frac{I}{|z_b|} \quad W_d = \frac{I}{z_d}$$

L'introduzione di tali parametri ha consentito, pertanto, di riscrivere la disequazione isolando al primo membro due termini che dipendono dalla sola geometria della sezione resistente di trave-nave e al secondo due grandezze che dipendono invece dalla distribuzione longitudinale dei carichi (M) e dalla tensione di snervamento del materiale con cui sono realizzate le strutture del fondo e del ponte. Per la determinazione dei due moduli di resistenza è necessario procedere secondo due step successivi:

- determinazione del centro geometrico della sezione resistente di trave-nave e dunque dell'asse neutro della sezione trasversale;
- determinazione dei momenti di inerzia della sezione resistente rispetto all'asse neutro.

Il primo calcolo di si esegue applicando il teorema dei momenti statici, mentre il secondo applicando i teoremi di variazione del momento di inerzia al variare di rette appartenenti a fasci propri o impropri.

V.1.4 Teorema dei momenti statici

Si consideri una generica figura piana, come quella rappresentata in Figura V.4, riferita ad una coppia di assi cartesiani (x,y) e sia A l'area della sua superficie. Le coordinate del centro di figura C sono determinate applicando il teorema dei momenti statici mediante le relazioni:

$$x_c = \frac{1}{A} \int x dA \quad y_c = \frac{1}{A} \int y dA$$

Tali relazioni possono essere generalizzate con riferimento a un sistema di N aree A_i , ognuna con baricentro x_i e y_i :

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^N x_i A_i}{\sum_{i=1}^N A_i} \quad y_c = \frac{\sum_{i=1}^N y_i A_i}{\sum_{i=1}^N A_i}$$

L'applicazione del teorema dei momenti statici si rende necessaria per la determinazione della quota verticale del baricentro della sezione resistente di trave-nave e, dunque, per la localizzazione dell'asse neutro della sezione resistente. Da tale relazione si evince che per calcolare la coordinata verticale del baricentro occorre determinare preliminarmente l'area A_i di ogni elemento strutturale longitudinalmente

continuo e la sua coordinata verticale z_i rispetto ad un riferimento comune, normalmente coincidente con la linea di base.

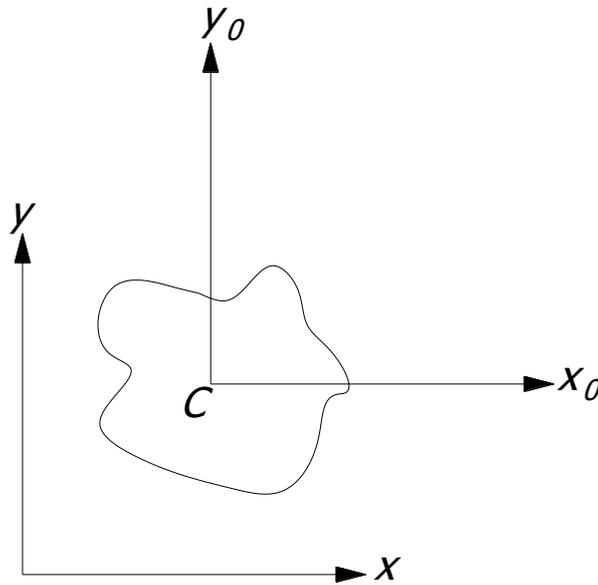


Figura V.4

V.1.5 Teoremi dei momenti di inerzia

Si consideri la geometria piana di Figura V.5, definita rispetto ad una coppia di assi (x, y) e sia (x_0, y_0) una coppia di assi cartesiani con origine in corrispondenza del centro di figura C. I momenti di inerzia rispetto alla coppia di assi coordinati I_{x_0} e I_{y_0} e il prodotto di inerzia $I_{x_0y_0}$ si calcolano mediante le seguenti relazioni:

$$I_{x_0} = \int y_0^2 dA \quad I_{y_0} = \int x_0^2 dA \quad I_{x_0y_0} = \int x_0 y_0 dA$$

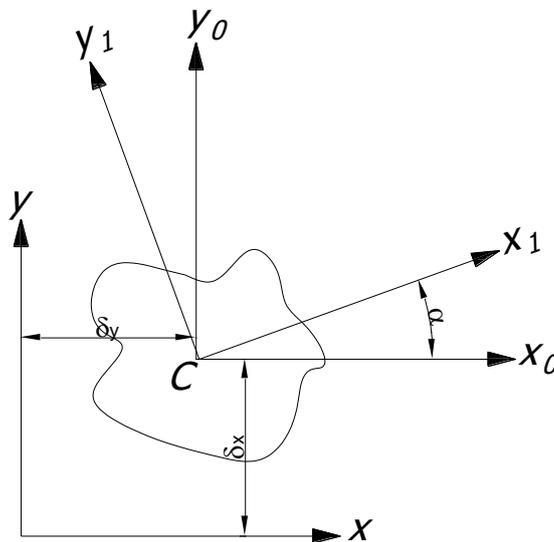


Figura V.5

Non appena sono noti i momenti di inerzia baricentrici, il momento di inerzia rispetto ad una terna traslata rigidamente rispetto a quella baricentrica possono essere calcolati mediante il teorema di Huygens-Steiner:

$$I_x = I_{x_0} + A\delta_x^2 \quad I_y = I_{y_0} + A\delta_y^2 \quad I_{xy} = I_{x_0y_0} + A\delta_x\delta_y$$

Definita una seconda terna baricentrica, ruotata dell'angolo α rispetto a quella iniziale, i nuovi momenti di inerzia si calcolano mediante il teorema di variazione dei momenti di inerzia in un fascio proprio di rette:

$$\begin{cases} I_{x1} = I_{x0} \cos^2 \alpha + I_{y0} \sin^2 \alpha - 2I_{x0y0} \cos \alpha \sin \alpha \\ I_{y1} = I_{x0} \sin^2 \alpha + I_{y0} \cos^2 \alpha + 2I_{x0y0} \cos \alpha \sin \alpha \\ I_{x1y1} = (I_{x0} - I_{y0}) \cos \alpha \sin \alpha + I_{x0y0} (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) \end{cases}$$

V.2 Modulo di resistenza di profilati con striscia di fasciame

V.2.1 Ferro piatto con striscia di fasciame associato

Si consideri un ferro piatto di altezza h_w e spessore t_w , connesso ad una striscia di fasciame di larghezza b e spessore t , come rappresentato in Figura V.6. Si riferisca tale geometria ad un sistema di assi cartesiani con origine in corrispondenza del lembo inferiore della striscia di fasciame associato, come in figura. Sia d_{an} la distanza verticale incognita del centro di figura, utile per la collocazione dell'asse neutro e siano d_1 e d_2 le distanze incognite delle fibre superiori e inferiori più lontane dall'asse neutro.

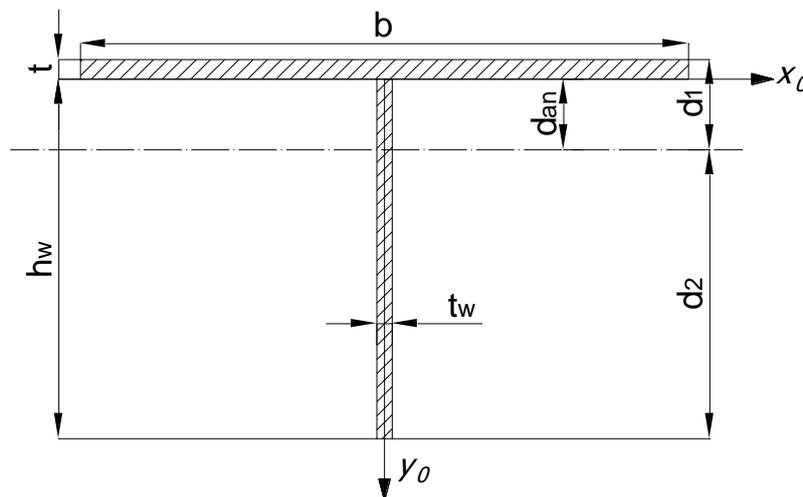


Figura V.6

La distanza dell'asse neutro può essere calcolata applicando il teorema dei momenti statici:

$$d_{an} = \frac{bt(-t/2) + h_w t_w h_w/2}{bt + h_w t_w}$$

Il momento di inerzia rispetto all'asse neutro I_{an} si calcola applicando il teorema di Huygens-Steiner:

$$I_{an} = \frac{bt^3}{12} + \frac{t_w h_w^3}{12} + bt \left(d_{an} + \frac{t}{2} \right)^2 + h_w t_w \left(\frac{h_w}{2} - d_{an} \right)^2$$

Le distanze delle fibre più lontane dall'asse neutro sono:

$$d_1 = d_{an} + t \quad d_2 = h_w - d_{an}$$

e, pertanto, i due moduli di resistenza valgono:

$$W_1 = \frac{I_{an}}{d_1} \quad W_2 = \frac{I_{an}}{d_2}$$

V.2.2 Ferro a T con striscia di fasciame associato

Si consideri un ferro a T avente anima di altezza h_w e spessore t_w e flangia di larghezza b_f e spessore t_f , connesso ad una striscia di fasciame di larghezza b e spessore t , come rappresentato in Figura V.7. Si riferisca tale geometria ad un sistema di assi cartesiani con origine in corrispondenza del lembo inferiore della striscia di fasciame associato, come in figura. Sia d_{an} la distanza verticale incognita del centro di figura, utile per la collocazione dell'asse neutro e siano d_1 e d_2 le distanze incognite delle fibre superiori e inferiori più lontane dall'asse neutro.

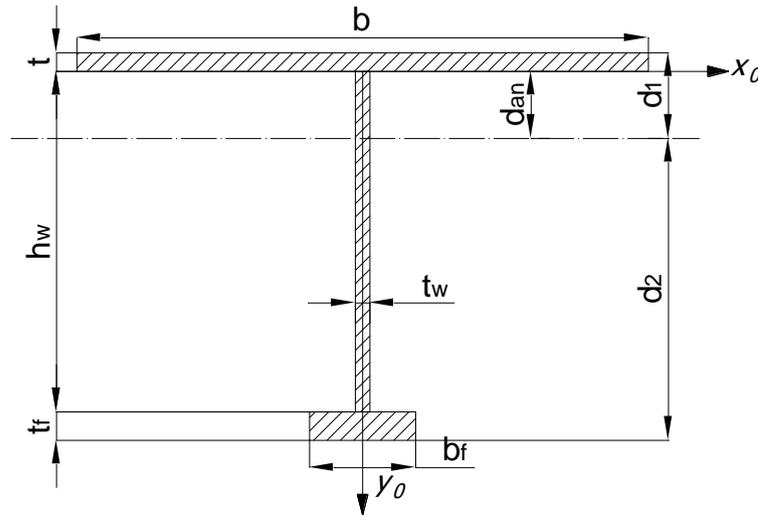


Figura V.7

La distanza dell'asse neutro può essere calcolata applicando il teorema dei momenti statici:

$$d_{an} = \frac{bt(-t/2) + h_w t_w h_w/2 + b_f t_f (h_w + t_f)/2}{bt + h_w t_w + b_f t_f}$$

Il momento di inerzia rispetto all'asse neutro I_{an} si calcola applicando il teorema di Huygens-Steiner:

$$I_{an} = \frac{bt^3}{12} + \frac{t_w h_w^3}{12} + \frac{b_f t_f^3}{12} + bt \left(d_{an} + \frac{t}{2} \right)^2 + h_w t_w \left(\frac{h_w}{2} - d_{an} \right)^2 + b_f t_f \left(h_w + \frac{t_f}{2} - d_{an} \right)^2$$

Le distanze delle fibre più lontane dall'asse neutro sono:

$$d_1 = d_{an} + t \quad d_2 = h_w + t_f - d_{an}$$

e, pertanto, i due moduli di resistenza valgono:

$$W_1 = \frac{I_{an}}{d_1} \quad W_2 = \frac{I_{an}}{d_2}$$

V.2.3 Piatto a bulbo con striscia di fasciame associato

Si consideri un piatto a bulbo avente anima di altezza h_w e spessore t_w , connesso ad una striscia di fasciame di larghezza b e spessore t , come rappresentato in Figura V.8. Si riferisca tale geometria ad un sistema di assi cartesiani con origine in corrispondenza del lembo inferiore della striscia di fasciame associato, come in figura.

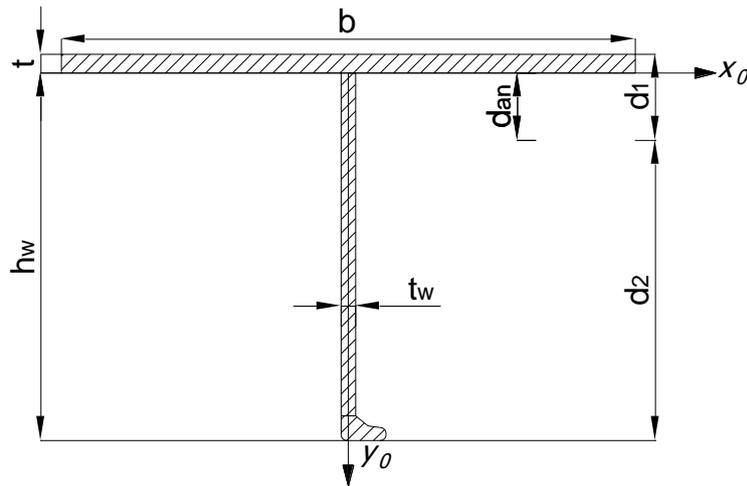


Figura V.8

Indicando con a_b l'area del piatto a bulbo, i_b il suo momento di inerzia proprio e z_b la distanza del suo centro di figura dalla connessione con il fasciame, la distanza dell'asse neutro può essere calcolata applicando il teorema dei momenti statici:

$$d_{an} = \frac{bt(-t/2) + a_b z_b}{bt + a_b}$$

Il momento di inerzia rispetto all'asse neutro I_{an} si calcola applicando il teorema di Huygens-Steiner:

$$I_{an} = \frac{bt^3}{12} + i_b + bt \left(d_{an} + \frac{t}{2} \right)^2 + a_b (z_b - d_{an})^2$$

Le distanze delle fibre più lontane dall'asse neutro sono:

$$d_1 = d_{an} + t \quad d_2 = h_w - d_{an}$$

e, pertanto, i due moduli di resistenza valgono:

$$W_1 = \frac{I_{an}}{d_1} \quad W_2 = \frac{I_{an}}{d_2}$$

V.2.4 Modulo di corrugazione

Si consideri una paratia corrugata, le cui corrugazioni hanno larghezza b , altezza h e spessore t , come rappresentato in Figura V.9.

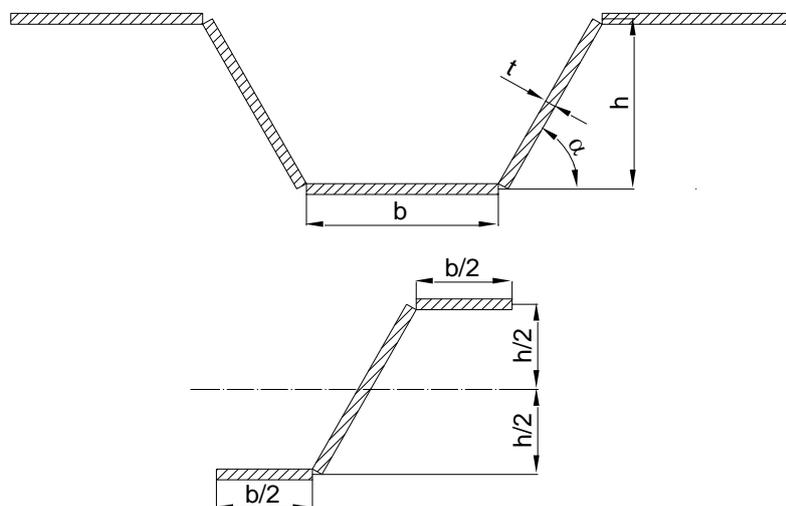


Figura V.9

Sia α l'angolo che il tratto subverticale forma con l'orizzontale. In tal caso per motivi di simmetria non è ovviamente necessario determinare la posizione dell'asse neutro del modulo di corrugazione, ovvero dell'elemento strutturale del quale si vuole calcolare il modulo di resistenza e che si ripete con continuità. Il calcolo del modulo di resistenza si riduce dunque alla determinazione del momento di inerzia della sezione rispetto all'asse neutro I_{an} che si ottiene nuovamente applicando il teorema di Huygens-Steiner e il teorema di variazione del momento di inerzia al variare di un fascio proprio di rette:

$$I_{an} = 2 \frac{b/2 t^3}{12} + \frac{ct^3}{12} \cos^2 \alpha + \frac{tc^3}{12} \sin^2 \alpha + 2 \frac{b}{2} t \left(\frac{h}{2} \right)^2$$

Nella precedente relazione $c = h/\sin \alpha$ è la larghezza del tratto di fasciame subverticale. Le distanze delle fibre più lontane dall'asse neutro sono uguali e valgono:

$$d_1 = d_2 = d = h/2 + t$$

e, pertanto, i due moduli di resistenza sono anch'essi uguali e valgono:

$$W_1 = W_2 = \frac{I_{an}}{d}$$

V.3 Modulo di resistenza di sezioni scatolari composte

V.3.1 Sezione scatolare composta/1

Si consideri la sezione scatolare composta riportata in Figura V.10.

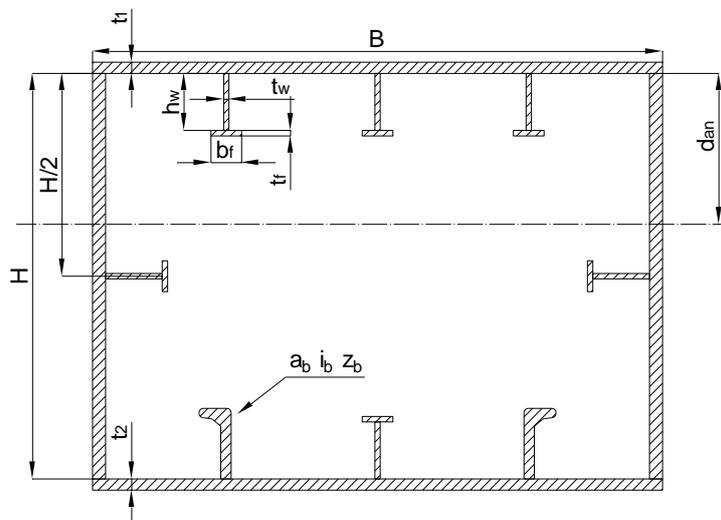


Figura V.10

La posizione dell'asse neutro della sezione scatolare in figura si determina con riferimento ad un sistema di assi cartesiani con origine in corrispondenza del lembo inferiore del fasciame superiore. La distanza dell'asse neutro si calcola mediante il teorema dei momenti statici:

$$d_{an} = \frac{Bt_1 \left(-\frac{t_1}{2} \right) + Bt_2 \left(H + \frac{t_2}{2} \right) + 2Ht \left(\frac{H}{2} \right) + 3h_w t_w \frac{h_w}{2} + 3b_f t_f \left(h_w + \frac{t_f}{2} \right) + 2h_w t_w \frac{H}{2} + 2b_f t_f \frac{H}{2} + 2a_b (H - z_b) + h_w t_w \left(H - \frac{h_w}{2} \right) + b_f t_f \left(H - h_w - \frac{t_f}{2} \right)}{Bt_1 + Bt_2 + 2Ht + 6h_w t_w + 6b_f t_f + 2a_b}$$

...

Il momento di inerzia della sezione rispetto all'asse neutro del complessivo si calcola applicando il teorema di Huygens-Steiner:

$$\begin{aligned}
 I_{an} = & \frac{Bt_1^3}{12} + \frac{Bt_2^3}{12} + 2 \frac{tH^3}{12} + 4 \frac{t_w h_w^3}{12} + 2 \frac{h_w t_w^3}{12} + 4 \frac{b_f t_f^3}{12} + 2 \frac{t_f b_f^3}{12} + 2i_b \\
 & + Bt_1 \left(d_{an} + \frac{t_1}{2} \right)^2 + Bt_2 \left(H + \frac{t_2}{2} - d_{an} \right)^2 \\
 & + 2Ht \left(\frac{H}{2} - d_{an} \right)^2 + 3h_w t_w \left(d_{an} - \frac{h_w}{2} \right)^2 \\
 & + 3b_f t_f \left(d_{an} - h_w - \frac{t_f}{2} \right)^2 + 2h_w t_w \left(\frac{H}{2} - d_{an} \right)^2 \\
 & + 2b_f t_f \left(\frac{H}{2} - d_{an} \right)^2 + 2a_b (H - z_b - d_{an})^2 \\
 & + h_w t_w \left(H - \frac{h_w}{2} - d_{an} \right)^2 + b_f t_f \left(H - h_w - \frac{t_f}{2} - d_{an} \right)^2
 \end{aligned}$$

Infine, i moduli di resistenza in corrispondenza delle fibre più lontane dall'asse neutro si calcolano come segue:

$$W_1 = \frac{I_{an}}{d_{an} + t_1} \quad W_2 = \frac{I_{an}}{H - d_{an} + t_2}$$

V.3.2 Sezione scatolare composta/2

Si consideri la sezione scatolare composta riportata in Figura V.11.

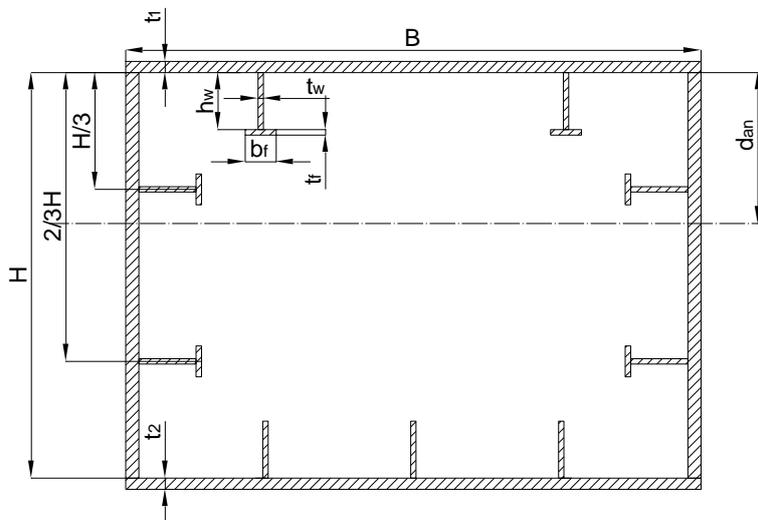


Figura V.11

La posizione dell'asse neutro della sezione scatolare in figura si determina con riferimento ad un sistema di assi cartesiani con origine in corrispondenza del lembo inferiore del fasciame superiore. La distanza dell'asse neutro si calcola mediante il teorema dei momenti statici:

$$\begin{aligned}
 d_{an} = & \frac{Bt_1 \left(-\frac{t_1}{2} \right) + Bt_2 \left(H + \frac{t_2}{2} \right) + 2Ht \left(\frac{H}{2} \right) + 2h_w t_w \frac{h_w}{2} + 2b_f t_f \left(h_w + \frac{t_f}{2} \right) +}{Bt_1 + Bt_2 + 2Ht + 6h_w t_w + 6b_f t_f + 3h_w t_w} \\
 & \frac{+ 2h_w t_w \frac{H}{3} + 2b_f t_f \frac{H}{3} + 2h_w t_w \frac{2H}{3} + 2b_f t_f \frac{2H}{3} + 3h_w t_w \left(H - \frac{h_w}{2} \right)}{...}
 \end{aligned}$$

Il momento di inerzia della sezione rispetto all'asse neutro del complessivo si calcola applicando il teorema di Huygens-Steiner:

$$\begin{aligned}
I_{an} = & \frac{Bt_1^3}{12} + \frac{Bt_2^3}{12} + 2\frac{tH^3}{12} + 2\frac{t_w h_w^3}{12} + 4\frac{h_w t_w^3}{12} + 2\frac{b_f t_f^3}{12} + 4\frac{t_f b_f^3}{12} \\
& + 3\frac{t_w h_w^3}{12} + Bt_1 \left(d_{an} + \frac{t_1}{2} \right)^2 + \\
& + Bt_2 \left(H + \frac{t_2}{2} - d_{an} \right)^2 + 2Ht \left(\frac{H}{2} - d_{an} \right)^2 + 2h_w t_w \left(d_{an} - \frac{h_w}{2} \right)^2 \\
& + 2b_f t_f \left(d_{an} - h_w - \frac{t_f}{2} \right)^2 + 2h_w t_w \left(\frac{H}{3} - d_{an} \right)^2 \\
& + 2b_f t_f \left(\frac{H}{3} - d_{an} \right)^2 + 2h_w t_w \left(\frac{2H}{3} - d_{an} \right)^2 \\
& + 2b_f t_f \left(\frac{2H}{3} - d_{an} \right)^2 + 3h_w t_w \left(H - \frac{h_w}{2} - d_{an} \right)^2
\end{aligned}$$

Infine, i moduli di resistenza in corrispondenza delle fibre più lontane dall'asse neutro si calcolano come segue:

$$W_1 = \frac{I_{an}}{d_{an} + t_1} \quad W_2 = \frac{I_{an}}{H - d_{an} + t_2}$$

V.3.3 Sezione scatolare composta/3

Si consideri la sezione scatolare composta riportata in Figura V.12.

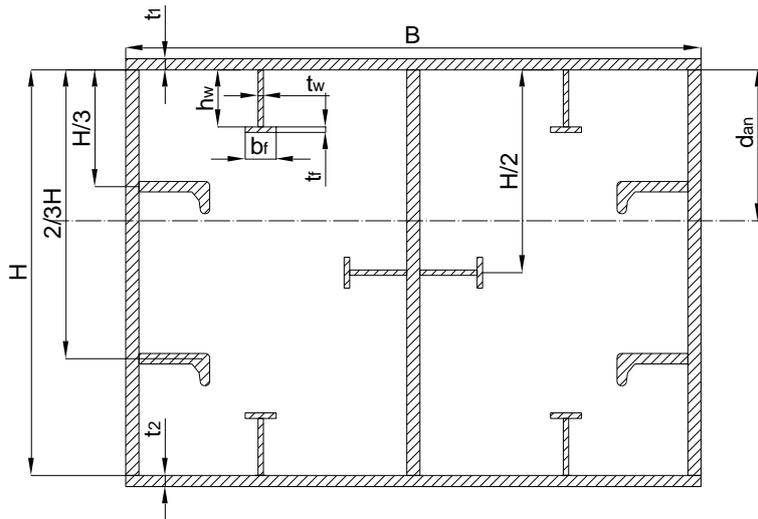


Figura V.12

La posizione dell'asse neutro della sezione scatolare in figura si determina con riferimento ad un sistema di assi cartesiani con origine in corrispondenza del lembo inferiore del fasciame superiore. La distanza dell'asse neutro si calcola mediante il teorema dei momenti statici:

$$\begin{aligned}
d_{an} = & \frac{Bt_1 \left(-\frac{t_1}{2} \right) + Bt_2 \left(H + \frac{t_2}{2} \right) + 3Ht \left(\frac{H}{2} \right) + 2h_w t_w \frac{h_w}{2} + 2b_f t_f \left(h_w + \frac{t_f}{2} \right) +}{Bt_1 + Bt_2 + 3Ht + 6h_w t_w + 6b_f t_f + 4a_b} \\
& \frac{+ 2h_w t_w \frac{H}{2} + 2b_f t_f \frac{H}{2} + 2h_w t_w \left(H - \frac{h_w}{2} \right) + 2b_f t_f \left(H - h_w - \frac{t_f}{2} \right) + 2a_b \frac{H}{3} + 2a_b \frac{2H}{3}}{...}
\end{aligned}$$

Il momento di inerzia della sezione rispetto all'asse neutro del complessivo si calcola applicando il teorema di Huygens-Steiner:

$$\begin{aligned}
I_{an} = & \frac{Bt_1^3}{12} + \frac{Bt_2^3}{12} + 3\frac{tH^3}{12} + 4\frac{t_w h_w^3}{12} + 2\frac{h_w t_w^3}{12} + 4\frac{b_f t_f^3}{12} + 2\frac{t_f b_f^3}{12} \\
& + Bt_1 \left(d_{an} + \frac{t_1}{2} \right)^2 + \\
& + Bt_2 \left(H + \frac{t_2}{2} - d_{an} \right)^2 + 3Ht \left(\frac{H}{2} - d_{an} \right)^2 + 2h_w t_w \left(d_{an} - \frac{h_w}{2} \right)^2 \\
& + 2b_f t_f \left(d_{an} - h_w - \frac{t_f}{2} \right)^2 + 2h_w t_w \left(\frac{H}{2} - d_{an} \right)^2 \\
& + 2b_f t_f \left(\frac{H}{2} - d_{an} \right)^2 + 2a_b \left(\frac{H}{3} - d_{an} \right)^2 \\
& + 2a_b \left(\frac{2H}{3} - d_{an} \right)^2 + 2h_w t_w \left(H - \frac{h_w}{2} - d_{an} \right)^2 \\
& + 2b_f t_f \left(H - h_w - \frac{t_f}{2} - d_{an} \right)^2
\end{aligned}$$

Infine, i moduli di resistenza in corrispondenza delle fibre più lontane dall'asse neutro si calcolano come segue:

$$W_1 = \frac{I_{an}}{d_{an} + t_1} \quad W_2 = \frac{I_{an}}{H - d_{an} + t_2}$$

V.3.4 Sezione scatolare composta/4

Si consideri la sezione scatolare composta riportata in Figura V.13.

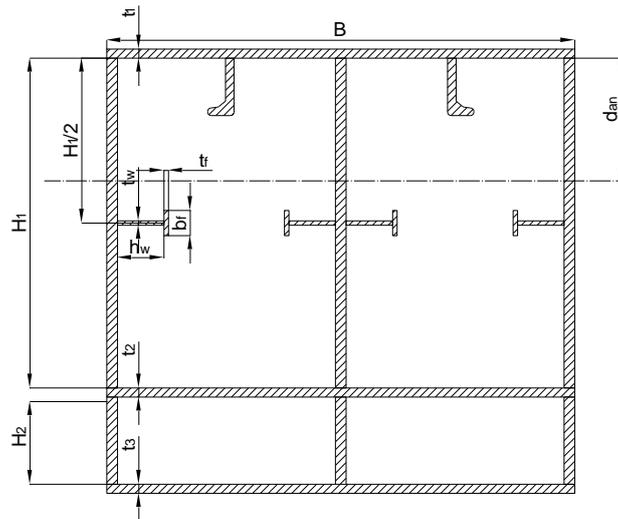


Figura V.13

La posizione dell'asse neutro della sezione scatolare in figura si determina con riferimento ad un sistema di assi cartesiani con origine in corrispondenza del lembo inferiore del fasciame superiore. La distanza dell'asse neutro si calcola mediante il teorema dei momenti statici:

$$d_{an} = \frac{Bt_1 \left(-\frac{t_1}{2} \right) + Bt_2 \left(H_1 + \frac{t_2}{2} \right) + Bt_3 \left(H_1 + t_2 + H_2 + \frac{t_3}{2} \right) + 3H_1 t \left(\frac{H_1}{2} \right) + 3H_2 t \left(H_1 + t_2 + \frac{H_2}{2} \right)}{Bt_1 + Bt_2 + Bt_3 + 3H_1 t + 3H_2 t + 4h_w t_w + 4b_f t_f + 2a_b} \\
+ \frac{4h_w t_w \left(\frac{H_1}{2} \right) + 4b_f t_f \left(\frac{H_1}{2} \right) + 2a_b z_b}{\dots}$$

...

Il momento di inerzia della sezione rispetto all'asse neutro del complessivo si calcola applicando il teorema di Huygens-Steiner:

$$\begin{aligned}
 I_{an} = & \frac{Bt_1^3}{12} + \frac{Bt_2^3}{12} + \frac{Bt_3^3}{12} + 3\frac{tH_1^3}{12} + 3\frac{tH_2^3}{12} + 4\frac{h_w t_w^3}{12} + 4\frac{t_f b_f^3}{12} + 2i_b \\
 & + Bt_1 \left(d_{an} + \frac{t_1}{2} \right)^2 + \\
 & + Bt_2 \left(H_1 + \frac{t_2}{2} - d_{an} \right)^2 + Bt_3 \left(H_1 + t_2 + H_2 + \frac{t_3}{2} - d_{an} \right)^2 \\
 & + 3H_1 t \left(\frac{H_1}{2} - d_{an} \right)^2 + 3H_2 t \left(H_1 + t_2 + \frac{H_2}{2} - d_{an} \right)^2 \\
 & + 4h_w t_w \left(\frac{H_1}{2} - d_{an} \right)^2 + 4b_f t_f \left(\frac{H_1}{2} - d_{an} \right)^2 \\
 & + 2a_b (d_{an} - z_b)^2
 \end{aligned}$$

Infine, i moduli di resistenza in corrispondenza delle fibre più lontane dall'asse neutro si calcolano come segue:

$$W_1 = \frac{I_{an}}{d_{an} + t_1} \quad W_2 = \frac{I_{an}}{H_1 + t_2 + H_2 + t_3 - d_{an}}$$

V.4 Modulo di resistenza della sezione maestra

V.4.1 La sollecitazione di momento flettente verticale

Come anticipato in precedenza, i carichi esterni generano una deformata globale di trave-nave che può essere *inarcante* (*hogging*) se le strutture del ponte sono tese e quelle del fondo compresse o *insellante* (*sagging*) se le strutture del fondo sono compresse e quelle del ponte sono tese. Lo stato tensionale generato all'interno di tutti gli elementi longitudinalmente continui, che contribuiscono al calcolo del modulo di resistenza della sezione maestra, dipende dal momento flettente di trave-nave, a sua volta scomponibile in due termini:

- **Momento flettente verticale in acqua tranquilla (vertical still water bending moment):** è generato dalla distribuzione longitudinale dei carichi idrostatici e del carico pagante;
- **Momento flettente verticale d'onda (vertical wave bending moment):** è generato dalla distribuzione longitudinale dei carichi d'onda lungo lo scafo.

Entrambe tali caratteristiche di sollecitazione variano con continuità lungo la trave nave e dipendono dalla specifica condizione di caricazione, ma possono essere in prima approssimazione valutate mediante formule regolamentari.

Per quanto attiene il momento flettente verticale in acqua tranquilla, tale distribuzione è nota non appena è disponibile il piano di carico della nave. Benché il calcolo di tale distribuzione non sia complesso, è tuttavia possibile stimare tale caratteristica di sollecitazione facendo riferimento alle formule approssimate presenti nelle *Harmonized Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers*. In particolare il momento flettente verticale in acqua tranquilla dipende dalla lunghezza della nave L , dalla larghezza della nave B , dal coefficiente di blocco C_B , dal coefficiente d'onda C_W e da un parametro di distribuzione longitudinale del carico f_{sw} e viene valutato mediante le seguenti relazioni, valide rispettivamente per nave inarcata e insellata:

$$M_{sw-h-min} = f_{sw}(171C_wL^2B(C_B + 0.7)10^{-3} - M_{wv-h-mid})$$

$$M_{sw-s-min} = -0.85f_{sw}(171C_wL^2B(C_B + 0.7)10^{-3} + M_{wv-s-mid})$$

avendo indicato con $M_{wv-h-mid}$ e $M_{wv-s-mid}$ i momenti flettenti d'onda a centro nave. Il coefficiente d'onda è valutato mediante la seguente relazione:

$$C_w = \begin{cases} 10.75 - \left(\frac{300 - L}{100}\right)^{1.5} & \text{se } 90 \leq L \leq 300 \\ 10.75 & \text{se } 300 < L \leq 350 \\ 10.75 - \left(\frac{L - 350}{150}\right)^{1.5} & \text{se } 350 < L \leq 500 \end{cases}$$

mentre il fattore di distribuzione di distribuzione longitudinale è riportato in Figura V.14.

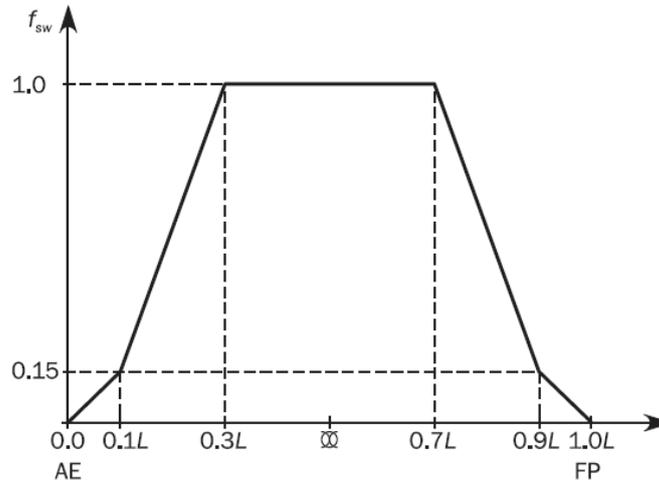


Figura V.14

Dal grafico di Figura V.14 che riporta la distribuzione longitudinale del parametro adimensionale f_{sw} , si evince che il momento flettente statico è massimo nella zona compresa tra il 30% e il 70% della lunghezza tra le perpendicolari della nave, con origine in corrispondenza della perpendicolare addietro.

Per quanto attiene invece la distribuzione del momento flettente verticale d'onda, quest'ultimo può essere calcolato mediante le seguenti relazioni:

$$M_{vw-h} = 0.19f_m f_{ps} C_w L^2 B C_B$$

$$M_{vw-s} = -0.11 \left(\frac{C_B + 0.7}{C_B}\right) f_m f_{ps} C_w L^2 B C_B$$

dove il termine adimensionale f_{ps} dipende dalla condizione di caricazione e dalla navigazione:

$$f_{ps} = \begin{cases} 1.0 & \text{extreme sea loads design scenario} \\ 0.8 & \text{ballast water exchange design load scenario} \\ 0.8 & \text{accidental flooded design load scenario at sea} \\ 0.4 & \text{harbour or sheltered water design load scenario} \end{cases}$$

Il fattore adimensionale f_m dipende dalla posizione longitudinale della sezione in corrispondenza della quale si vuole determinare la caratteristica di sollecitazione, come riportata in Figura V.15, dalla quale si evince che il momento flettente verticale d'onda è massimo tra il 40% e il 65% della lunghezza tra le perpendicolari della nave, con origine in corrispondenza della perpendicolare addietro.

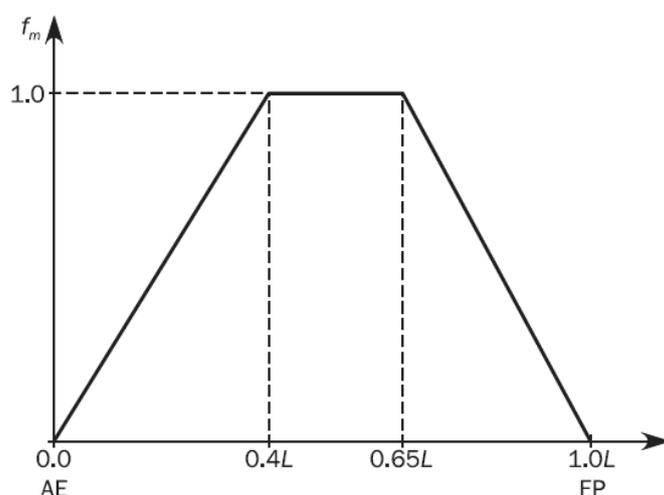


Figura V.15

V.4.2 Tensioni primarie di trave-nave

Le tensioni di trave nave al fondo (σ_b) e al ponte (σ_d), possono essere calcolate applicando le seguenti relazioni valide rispettivamente per nave inarcata o insellata:

- Nave inarcata $\sigma_b = -\frac{M_{sw-h} + M_{vw-h}}{W_b}$
- Nave inarcata $\sigma_d = \frac{M_{sw-h} + M_{vw-h}}{W_d}$
- Nave insellata $\sigma_b = -\frac{M_{sw-s} + M_{vw-s}}{W_b}$
- Nave insellata $\sigma_d = \frac{M_{sw-s} + M_{vw-s}}{W_d}$

I numeratori delle due relazioni sono pari alla somma dei momenti flettenti inarcanti o insellanti in acqua calma e d'onda. Al denominatore compaiono rispettivamente i moduli di resistenza al fondo (W_b) e al ponte (W_d) della sezione maestra. Il calcolo delle tensioni di trave nave può dunque essere effettuato non appena sono noti i moduli di resistenza al fondo W_b e al ponte W_d della sezione resistente costituita da tutti e soli gli elementi longitudinalmente continui che, in accordo alla formula di Navier della flessione retta, sono calcolati mediante le relazioni:

$$W_b = \frac{I_{an}}{z_{an}} \qquad W_d = \frac{I_{an}}{D - z_{an}}$$

avendo indicato con I_{an} il momento di inerzia della sezione resistente rispetto all'asse neutro, z_{an} la quota verticale dell'asse neutro dalla linea di base, D l'altezza di costruzione della nave. Il calcolo della coordinata verticale dell'asse neutro della sezione resistente e il calcolo del suo momento di inerzia sono effettuati in linea di principio seguendo le stesse regole già applicate in precedenza, ma riscrivendo semplicemente le relazioni in maniera diversa tenendo conto dell'elevato numero di elementi strutturali costituenti la sezione maestra.

Per determinare il modulo di resistenza di trave-nave si considerano gli elementi della semisezione, dal momento che la stessa è simmetrica rispetto alla traccia del piano diametrale. La coordinata verticale dell'asse neutro rispetto alla linea di base si

determina mediante la seguente relazione in cui a_i è l'area dell' i -mo elemento e z_i è la coordinata verticale del suo centro geometrico rispetto alla linea di base:

$$z_{an} = \frac{\sum_i a_i z_i}{\sum_i a_i}$$

Il momento di inerzia della sezione resistente rispetto all'asse neutro, invece, si determina come segue, applicando il teorema di Huygens-Steiner in forma inversa:

$$I_{an} = 2 \left[\sum_i (i_i + a_i z_i^2) - \sum_i a_i z_{an}^2 \right]$$

avendo indicato con i_i il momento di inerzia proprio dell' i -mo elemento strutturale concorrente al calcolo del modulo di resistenza di trave-nave. Il calcolo del modulo di resistenza si esegue normalmente in forma tabulare come dettagliato di seguito.

V.4.3 Modulo di resistenza di trave-nave

Si riporta di seguito un esempio di calcolo tabulare del modulo di resistenza della sezione semplificata di trave-nave riportata in Figura V.16. Il calcolo è riportato in Tabella V.1.

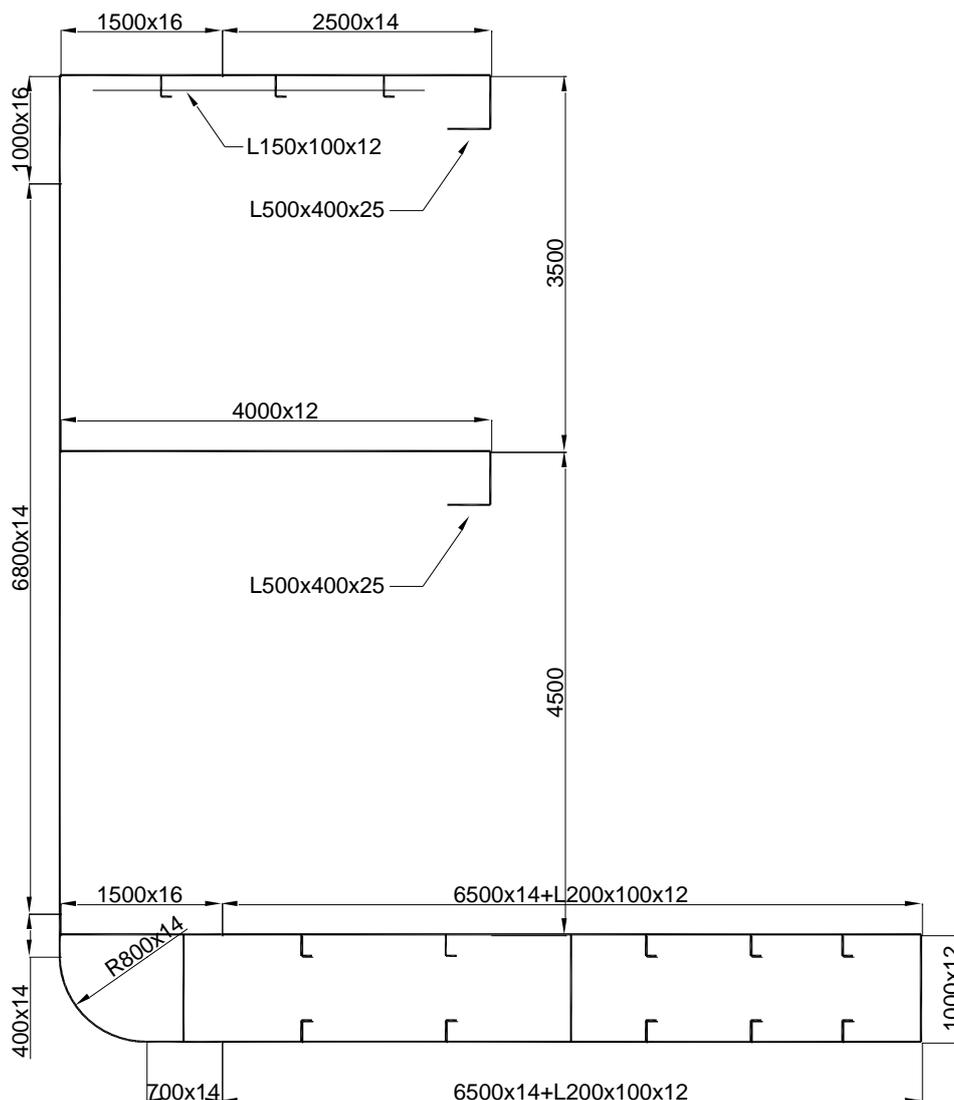


Figura V.16

Tabella V.1

Elementi	Dimensioni		a_i	z_i	$a_i z_i$	$a_i z_i^2$	i_i
	mm	mm	cm ²	cm	cm ³	cm ⁴	cm ⁴
Fasciame del fondo	7200	14	1008	0	0	0	0
Fasciame del ginocchio	1257	14	175.98	29.1	5121	149022	107000
Fasciame del cielo del d.f.	6500	14	910	100	91000	9100000	0
Marginale	1500	16	240	100	24000	2400000	0
Paramezzale centrale 1/2	1000	12	60	50	3000	150000	50000
Paramezzali laterali n.2	1000	12	240	50	12000	600000	200000
Fasciame del fianco	7200	14	1008	440	443520	195148800	43546000
Cinta	1000	16	160	850	136000	115600000	133000
Trincarino del ponte di coperta	1500	16	240	900	216000	194400000	0
Fasciame del ponte di coperta	2500	14	350	900	315000	283500000	0
Fasciame del ponte di stiva	4000	12	480	550	264000	145200000	0
Anima dell'anguilla del ponte di coperta	500	25	125	875	109375	95703125	26000
Piattabanda dell'anguilla del ponte di coperta	400	25	100	850	85000	72250000	0
Anima dell'anguilla del ponte di stiva	500	25	125	525	65625	34453125	26000
Piattabanda dell'anguilla del ponte di stiva	400	25	100	500	50000	25000000	0
Correnti del fondo n.5	L200x100x12		174	13	2262	29406	7000
Correnti del cielo del d.f. n. 5	L200x100x12		174	87	15138	1317006	7000
Correnti del ponte di coperta n.3	L150x100x12		86	889.9	76531	68105293	2000
			5755.98		1913572	1243105776	44104000

Applicando le formule precedenti si ricava che $W_b=3.915 \text{ m}^3$ e $W_d=2.294 \text{ m}^3$.

V.5 Piano di carico e contenimento delle sollecitazioni

V.5.1 Il piano di carico

Prima di ogni partenza, è necessario verificare il piano di carico della nave, con particolare riferimento alla determinazione dei seguenti elementi:

- Portata netta della nave;
- Assetto longitudinale e immersioni;
- Stabilità;
- Sollecitazioni di trave-nave.

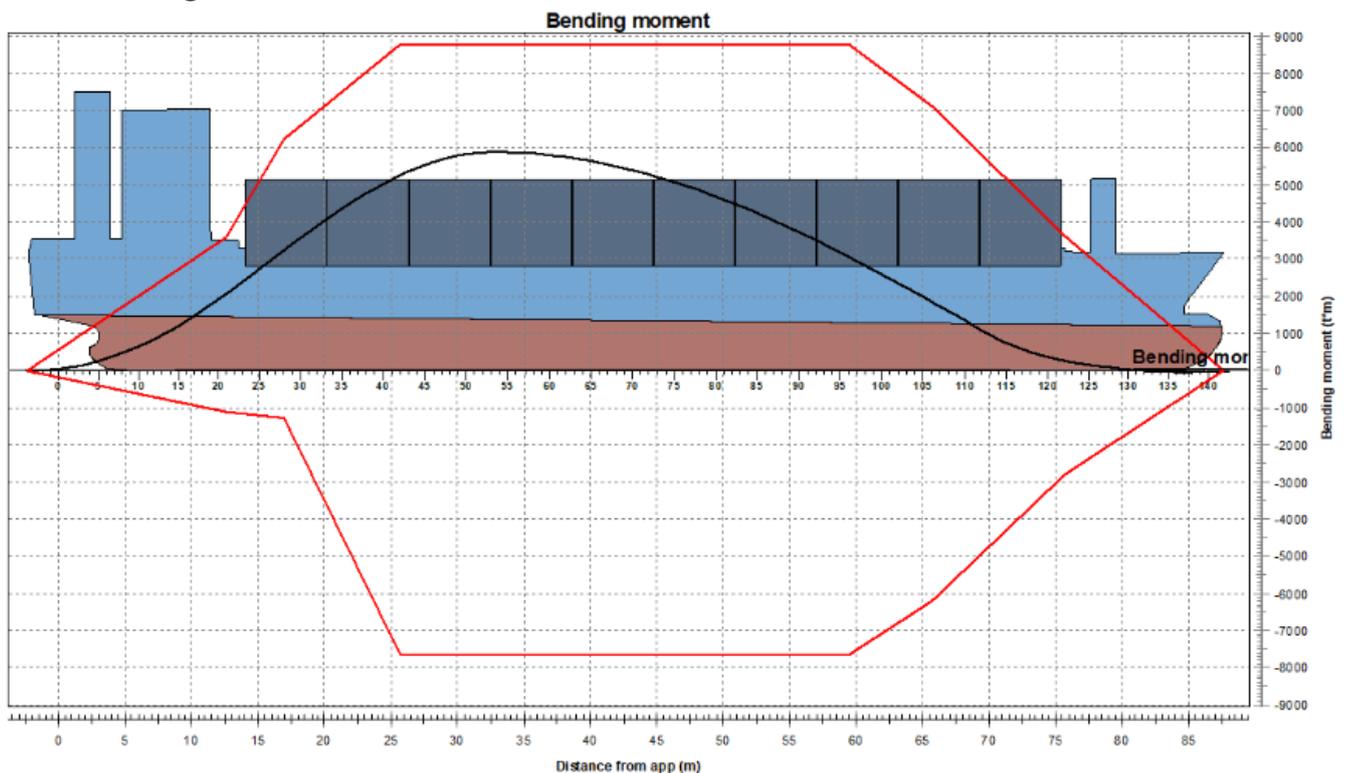
Sebbene tali fattori siano strettamente dipendenti dal tipo di nave, i criteri per la loro determinazione sono generalmente gli stessi per tutte le navi. Di seguito si tratterà esclusivamente il problema della determinazione e del contenimento delle sollecitazioni di trave-nave, dal momento che i primi tre punti esulano dagli obiettivi del corso, in quanto attinenti al campo dell'architettura navale. La determinazione delle

sollecitazioni di trave-nave riguarda prevalentemente le caratteristiche di sollecitazione di momento flettente verticale e di taglio verticale (di cui non si è parlato per brevità di trattazione). In entrambi i casi si esaminano normalmente due distinte condizioni operative, ovvero:

- Nave in porto (*harbour condition*);
- Nave in navigazione (*seagoing condition*).

La sollecitazione di momento flettente in acqua calma viene determinata una volta noto il piano di carico della nave (distribuzione del carico pagante e dei consumabili) mediante opportuni software di bordo. Ad essa è sommata la distribuzione regolamentare del momento flettente verticale d'onda.

In Figura V.17 è mostrata la tipica distribuzione del momento flettente longitudinale agente sulla nave (linea nera). Le linee rosse superiore ed inferiore rappresentano invece i valori ammissibili inarcante (+) e insellante (-) della caratteristica di sollecitazione. Per convenzione il momento flettente si assume positivo se la nave è inarcata, negativo se la nave è insellata.



Summary			
Mean moulded draft	3.790 (m)	Trim	-0.794 (m)
Displacement	3442.43 (tonnes)	GM	1.433 (m)
Minimum shearforce	-205.47 (tonnes)	10.1% Distance from app	65.775 (m)
Maximum shearforce	283.59 (tonnes)	17.2% Distance from app	15.600 (m)
Maximum sagging moment	-29.08 (t*m)	4.7% Distance from app	84.400 (m)
Maximum hogging moment	5891.65 (t*m)	67.0% Distance from app	33.200 (m)
The condition complies with the longitudinal strength criteria			

Figura V.17

Dalla scheda di sintesi riportata in basso si deduce che massimo momento flettente inarcante è pari a 5891.65 tm ad una distanza pari a 33.2 m dalla PpAD. La distribuzione della caratteristica di sollecitazione è conforme ai criteri di robustezza longitudinale. Similarmente, anche se non rappresentata in figura, si riportano i valori della sollecitazione di taglio verticale (di cui come detto non si è parlato per brevità di trattazione). Inoltre, la distribuzione del momento flettente statico dipende come detto dalla distribuzione longitudinale dei carichi. A tal fine, in Figura V.18 è rappresentata una tipica interfaccia grafica di un programma di gestione delle condizioni di caricazione della nave. In particolare attraverso tale interfaccia è possibile gestire il grado di riempimento di ogni cassa in funzione del liquido trasportato e delle stive del carico, ottenendo in tempo reale informazioni in merito all'immersione, all'assetto nave e alle verifiche di robustezza longitudinale.

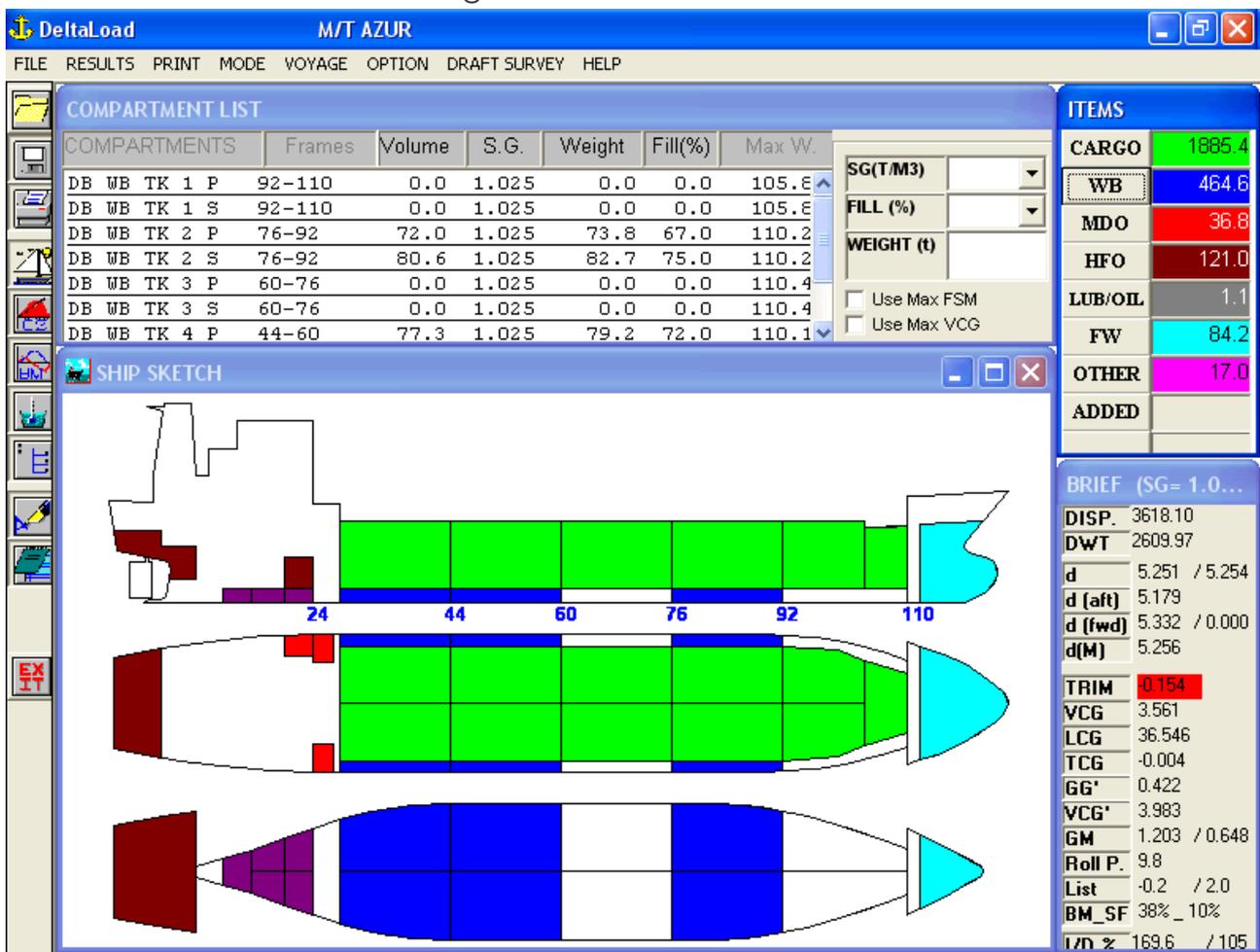


Figura V.18

V.5.2 Tensioni ammissibili di trave-nave

La verifica della compatibilità della condizione di caricazione della nave con gli stati tensionali generati si effettua confrontando le tensioni indotte dai carichi statici e dinamici con una tensione ammissibile σ_{perm} che dipende dal tipo di materiale adoperato. Tale valore ammissibile è inferiore alla tensione di snervamento del materiale e quindi la struttura opera in ambito puramente elastico. La riduzione della tensione ammissibile rispetto a quella di snervamento di materiale si effettua per

evidenti motivi di sicurezza, in modo tale da considerare eventuali incertezze nella determinazione dei carichi applicati sulla nave, del modello analitico adoperato e dell'eventuale degrado della struttura nel corso del tempo. I valori delle tensioni ammissibili sono riportati in Figura V.19.

Table 1 : Permissible hull girder bending stress

Operation	Design load	Permissible hull girder bending stress, σ_{perm}				
		$\frac{x}{L} \leq 0.1$	$0.1 < \frac{x}{L} < 0.3$	$0.3 \leq \frac{x}{L} \leq 0.7$	$0.7 < \frac{x}{L} < 0.9$	$\frac{x}{L} \geq 0.9$
Seagoing	(S+D)	140/k	Linear interpolation	190/k	Linear interpolation	140/k
Harbour/sheltered water	(S)	105/k	Linear interpolation	143/k	Linear interpolation	105/k
Flooded condition at sea for bulk carriers having a length L of 150 m or above	(A:S+D)	140/k	Linear interpolation	190/k	Linear interpolation	140/k

Figura V.19

Da tale tabella si evince che nella zona maggiormente sollecitata della trave-nave, ovvero quella compresa tra il 30-70% della sua lunghezza a cavallo della perpendicolare al mezzo, la tensione ammissibile calcolata in N/mm² (MPa) è pari a 190/k dove il fattore adimensionale k dipende dal tipo di acciaio come riportato in Figura V.20.

Table 2 : Material factor, k

R_{eH} , specified minimum yield stress, in N/mm ²	k
235	1.00
315	0.78
355	0.72
390	0.68

Figura V.20

V.6 La corrosione dello scafo in acciaio

V.6.1 La cella galvanica

Si definisce **corrosione** il processo di deterioramento e degrado strutturale dei materiali metallici in seguito a reazioni chimiche con elementi presenti nell'ambiente esterno ed in particolare con l'ossigeno e l'acqua. In funzione del mezzo corrosivo in cui l'elemento metallico è immerso, il processo di corrosione si classifica in 2 tipologie:

- **Corrosione a secco:** il materiale metallico è posto a contatto con l'aria ed è in tal caso l'ossigeno in essa presente a favorire il degrado strutturale del materiale;
- **Corrosione in umido:** l'elemento metallico è posto in acqua ed è soggetto ad una reazione di natura elettrochimica che si basa sul principio di funzionamento della **cella galvanica** e dunque su una reazione di di ossido-riduzione.

Si definisce cella galvanica l'elemento fisico costituito da due metalli dissimili, costituenti gli elettrodi della cella, immersi in una soluzione elettrolitica (*nel caso in esame acqua di mare*) e collegati superiormente mediante un elemento conduttore, come riportato in Figura V.21.

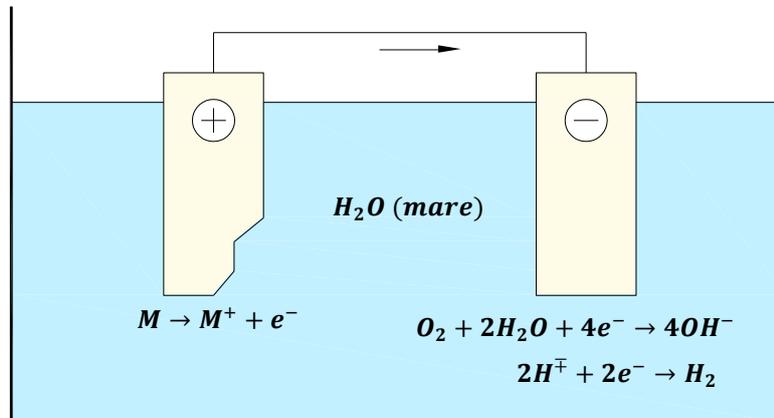
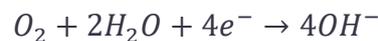


Figura V.21

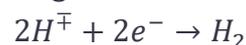
L'elettrodo positivo o **anodo** tende a corrodersi, dal momento che il generico materiale M di cui è realizzato si scinde in acqua di mare in ioni positivi ed elettroni secondo la reazione chimica:



Gli ioni positivi tendono ad accumularsi nella soluzione elettrolitica, mentre gli elettroni migrano dal catodo verso l'anodo, dove avviene la reazione di riduzione, con formazione di idrogeno e ioni ossidrilici. In particolare gli elettroni reagiscono con l'acqua e l'ossigeno in essa disciolto, formando ioni ossidrilici:



Oltre ai gruppi ossidrilici, si formano anche ioni idrogeno H^+ che reagendo con gli elettroni provenienti dall'anodo generano idrogeno secondo la reazione:



Da quanto detto si evince che il **catodo** non è direttamente coinvolto nelle reazioni chimiche e pertanto tende a conservarsi inalterato nel tempo. Al contrario l'anodo tende a corrodersi.

V.6.2 La serie galvanica degli elementi in acqua di mare

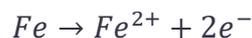
Nessun elemento metallico si comporta a priori come anodo o catodo della cella galvanica, ma il suo ruolo dipende dall'altro elemento metallico con cui si trova a contatto. Il ruolo relativo di un elemento metallico, quale catodo o anodo della cella galvanica, può essere studiato facendo riferimento alla **serie galvanica degli elementi in acqua di mare**, riportata in Tabella V.2, alle cui estremità superiore e inferiore sono presenti le estremità catodica o nobile e anodica o ignobile. La serie galvanica degli elementi riporta in ordine decrescente, dall'estremità catodica a quella anodica, i principali elementi metallici. Una volta stabiliti i due metalli dissimili costituenti gli elettrodi della cella galvanica, quello più vicino all'estremità catodica si comporta da catodo ed è soggetto al processo di riduzione. Al contrario, l'elemento metallico più vicino all'estremità anodica si comporta da anodo. Da quanto detto si evince ad

esempio che in una cella galvanica **bronzo-acciaio al carbonio** quest'ultimo tende a corrodersi. Al contrario in una cella galvanica **acciaio al carbonio-zinco** l'acciaio si comporta da catodo e si preserva nel tempo.

Tabella V.2

Estremità catodica o nobile
Platino, oro
Argento
Titanio
Acciaio inossidabile (passivo)
Nichel (passivo)
Bronzo
Rame
Nichel (attivo)
Ossido di ferro
Ottone
Piombo, stagno
Acciaio inossidabile (attivo)
Ferro, ghisa, acciaio al carbonio
Leghe di alluminio
Alluminio
Zinco
Magnesio
Estremità anodica o ignobile

Pertanto, uno dei modi più efficaci per preservare le strutture navali dal processo della corrosione è quello di favorire la formazione di celle galvaniche tra lo scafo in acciaio e materiali posti al di sotto del primo nella serie galvanica, e pertanto più vicino all'estremità anodica o ignobile, detti **anodi di sacrificio**, normalmente realizzati in zinco o magnesio. Allorquando, tuttavia, è l'acciaio l'elemento che si corrode, il processo chimico si definisce arrugginimento (vedere Figura V.22) e si basa sulle seguenti reazioni chimiche:



Gli ossidi generano sulla superficie dell'elemento un nuovo materiale detto **ruggine** con composizione chimica $Fe_2O_3 \cdot xH_2O$, dove al posto della x deve essere sostituito il numero 1, 2 o 3, dal momento che il prodotto di scarto dell'ossidazione si presenta con diversa composizione chimica benché costituito sempre da ossidi di ferro Fe_2O_3 .



Figura V.22

V.6.3 Tecniche di prevenzione della corrosione

Per preservare le strutture dello scafo, con particolare riferimento alla parte immersa, si adottano uno o più tecniche di prevenzione che consentono di contenere il processo di corrosione entro limiti tecnicamente accettabili ed economicamente sostenibili. La **protezione catodica** rappresenta uno dei metodi più efficaci per ridurre la corrosione delle strutture navali. Tale tecnica consiste nel rendere negativo il potenziale del materiale da proteggere in modo da farlo diventare il catodo della cella elettrolitica. La protezione catodica può realizzarsi mediante:

- **anodi di sacrificio (protezione galvanica):** sono elementi costituiti da leghe di zinco o alluminio o magnesio, cioè materiali meno nobili dell'acciaio che, applicati sulla carena come mostrato in Figura V.23, fungono da anodi e dunque si consumano. Per una protezione efficace gli anodi devono assicurare un flusso di elettroni e dunque una corrente compresa tra 60 e 120 mA/m²;

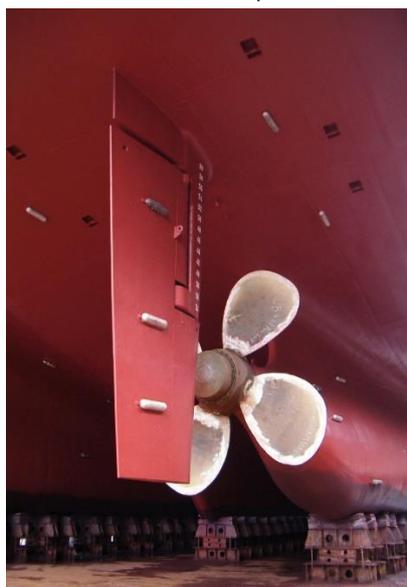


Figura V.23

- **correnti impresse:** il polo positivo di un circuito elettrico alimentato da un generatore a corrente continua (*power supply unit*) è collegato ad anodi

scarsamente soggetti alla corrosione, normalmente in piombo come mostrato in Figura V.24. Lo scafo è collegato al polo negativo del circuito e su di esso sono fissati, direttamente a fasciame o in appositi recessi, almeno due elettrodi di zinco (*reference cell*) che sono assunti come riferimento per rilevare la differenza di potenziale tra gli elettrodi e lo scafo. Tale differenza viene inviata ad una centralina di controllo (*controller*) che regola il generatore di corrente in modo da mantenere la differenza di potenziale intorno a valori compresi tra 0.80 e 0.85 V, corrispondenti ad una corrente variabile tra 20 e 100 mA/m². In questo modo si forza lo scafo a fungere da elettrodo negativo o catodo riducendone in modo sensibile la corrosione. Tale tecnica ha ovviamente un costo nettamente superiore rispetto alla precedente a cui tuttavia si contrappone una migliore protezione delle strutture dello scafo.

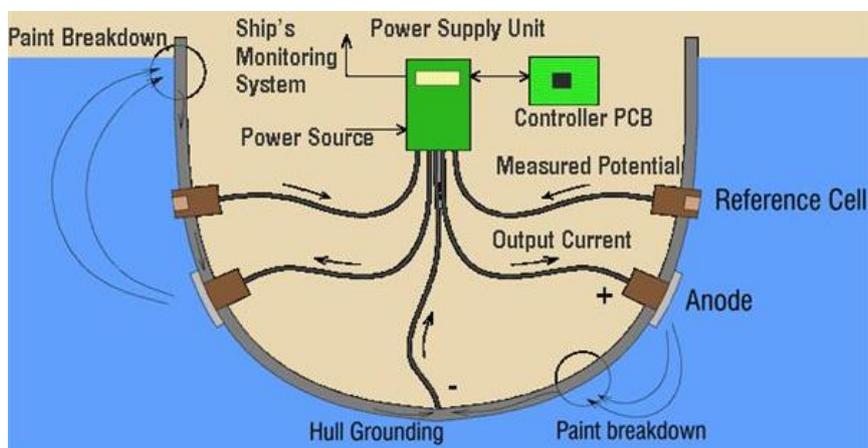


Figura V.24

V.6.4 Stima della massa complessiva di anodi sacrificali

La massa complessiva degli anodi sacrificali in kg M_a può essere determinata mediante la seguente formula, reperibile nella *Recommended Practice DNV-RP-B401 Cathodic Protection Design*:

$$M_a = \frac{i_{cm} S t_f 8760}{u \varepsilon}$$

avendo indicato con:

- i_{cm} la densità di corrente circolante nella cella galvanica in A/m² e dipendente dalla sommersione dell'anodo e dalla temperatura superficiale media dell'acqua di mare;
- S la superficie bagnata di carena in m²;
- t_f la vita degli anodi sacrificali in anni;
- u il fattore di utilizzo degli anodi sacrificali, normalmente pari a 0.85;
- ε la capacità elettrochimica in acqua di mare dell'anodo di sacrificio in Ah/kg pari a 2000 Ah/kg per anodi in zinco e a 780 Ah/kg per anodi in alluminio.

I valori della densità di corrente circolante sono riportati nella Tabella V.3, dalla quale si evince che i_{cm} dipende prevalentemente dalla salinità del mare e dalla profondità a cui viene posto l'anodo di sacrificio.

Tabella V.3

Depth (m)	i_{cm} (A/m ²)			
	Tropical (>20°C)	Sub-tropical (12-20°C)	Temperate (7-12°C)	Arctic (<7°C)
0-30	0.070	0.080	0.100	0.120
30-100	0.060	0.070	0.080	0.100
100-300	0.070	0.080	0.090	0.110
300	0.090	0.100	0.110	0.110

V.6.5 Degrado e sostituzione delle strutture navali

In accordo alle linee guide fornite nelle Classification Notes 72.1 del Det Norske Veritas Allowable thickness diminution for hull structures, le modalità di corrosione delle strutture navali sono sostanzialmente di 4 tipi:

- **Corrosione uniforme (general):** le strutture sono caratterizzate da una riduzione uniforme dello spessore;
- **Corrosione a macchia di leopardo (pitting):** le strutture sono caratterizzate da una riduzione non omogenea dello spessore con aree particolarmente corrose ed aree pressoché integre;
- **Corrosione con indentature (grooving):** le strutture sono caratterizzate da riduzioni localizzate di spessore normalmente distribuite lungo una o più linee di intaglio, generalmente riscontrabili in prossimità dei collegamenti saldati;
- **Corrosione di bordo (edges):** è un fenomeno di corrosione localizzato in corrispondenza dei bordi liberi dei fasciami o dei rinforzi.

I criteri di sostituzione delle strutture corrose dipendono normalmente dai regolamenti tecnici applicabili alla singola nave e, dunque, variano in linea di principio caso per caso. Tuttavia, è possibile delineare alcune linee guida di carattere generale in funzione del tipo di corrosione cui è interessato l'elemento strutturale in esame:

- **Corrosione uniforme:** normalmente è ritenuta accettabile una diminuzione fino al 20% dello spessore originale per i pannelli di fasciame e fino al 25% per i rinforzi;
- **Corrosione a macchia di leopardo:** dal momento che tale corrosione è localizzata in maniera non uniforme sul singolo elemento strutturale, i criteri di sostituzione si basano sull'introduzione di un parametro adimensionale detto **Degree of Pitting (DOP)** che misura la percentuale della superficie esposta a corrosione. Per strutture con un DOP fino al 20% la corrosione massima ammissibile è normalmente pari al 40% dello spessore iniziale. Tale parametro varia linearmente fino ad un DOP pari al 100% in corrispondenza del quale la corrosione ammissibile è pari al 20% dello spessore iniziale;
- **Corrosione con indentature:** si accetta una corrosione massima del 30% dello spessore iniziale purché la larghezza dell'indentatura non superi il 15% della larghezza della struttura o comunque 100 mm (Figura V.25);
- **Corrosione di bordo:** la corrosione dell'elemento strutturale non deve di norma interessare più del 25% dell'altezza del rinforzo e lo spessore di bordo non deve essere inferiore al 33% dello spessore iniziale (Figura V.26).

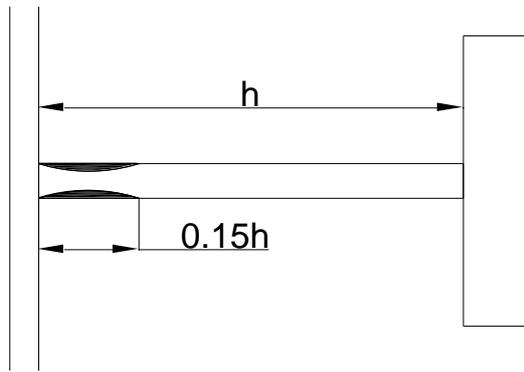


Figura V.25

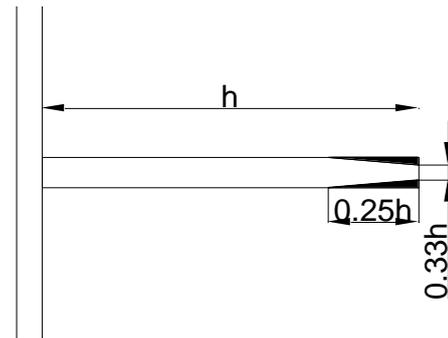


Figura V.26

Si rammenta che tali indicazioni sono in ogni caso di massima e condizioni più o meno restrittive possono essere di volta in volta fornite dai singoli regolamenti in funzione del tipo di nave o dell'elemento strutturale in esame.

V.6.6 Evoluzione temporale del processo di corrosione

Nonostante le navi siano dotate di anodi sacrificali o si applichino in taluni casi correnti impresse, le strutture in acciaio permangono comunque sottoposte al processo di corrosione che viene pertanto mitigato ma non annullato dall'applicazione delle tecniche preventive precedentemente descritte. Per comprendere l'evoluzione temporale del processo corrosivo nell'arco dell'intera vita della nave assunto pari a 25 anni, si sottolinea innanzitutto che le strutture dello scafo all'atto della costruzione della nave sono verniciate con pitture protettive che proteggono in maniera pressoché totale le strutture dal processo di corrosione almeno nei primi anni di vita. Successivamente tali vernici sono sottoposte a fenomeni di mosaicatura che rendono nel corso del tempo alcune parti delle strutture esposte al fenomeno della corrosione. Da quanto detto l'evoluzione temporale del processo di corrosione si suddivide normalmente in 3 fasi:

- **Fase priva di corrosione (*durability of coating*):** in tale fase di durata pari a T_c , le vernici protettive dello scafo sono integre e la corrosione è nulla;
- **Fase di transizione (*transition*):** in tale fase, di durata pari a T_t , le vernici protettive iniziano a deteriorarsi fino all'innesco del fenomeno della corrosione;
- **Fase di corrosione (*progress of corrosion*):** la corrosione aumenta in modo nel tempo secondo una legge del tipo:

$$t_r = C_1(T - T_c - T_t)^{C_2}$$

Il fattore di corrosione C_1 e il fattore di forma C_2 della curva rappresentativa del processo di corrosione dipendono dal tipo di corrosione e dal singolo elemento strutturale, come indicato in Figura V.27. Dall'analisi del grafico si evidenzia che se $C_2 > 1$ il processo corrosivo tende ad accelerare nel corso del tempo; se al contrario $C_2 < 1$ il processo corrosivo tende a diminuire nel tempo fino a stabilizzarsi grazie al film protettivo generato dallo strato di ruggine che si viene a formare sul materiale. Se infine $C_2 = 1$ il processo di corrosione si mantiene costante nel tempo. Partendo da tale modello generale, normalmente per le strutture navali la durata temporale del periodo di transizione è trascurabile e si assume pertanto $T_t=0$. Inoltre il fenomeno corrosivo

umenta in maniera pressoché lineare nel tempo e pertanto si assume normalmente $C_2 = 1$.

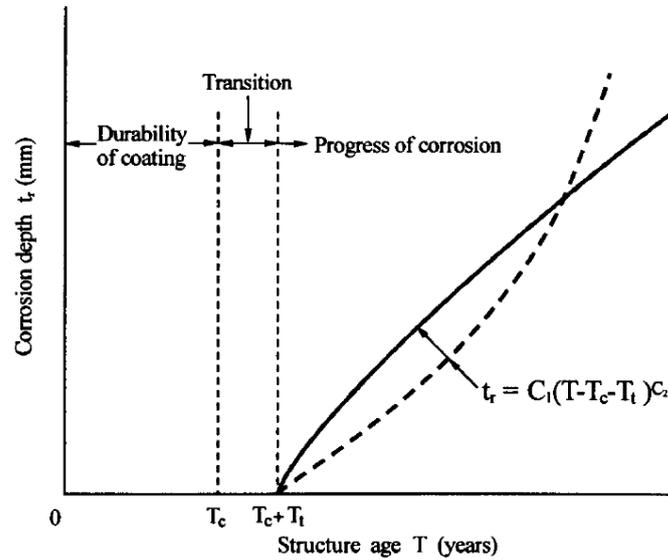


Figura V.27

Da quanto detto il modello di corrosione precedentemente descritto si semplifica come segue:

$$t_r = C_1(T - T_c)$$

Il fattore di corrosione C_1 si definisce in tal caso tasso annuo di corrosione e si misura in mm/anno. Tale parametro è a sua volta suscettibile di una interpretazione statistica, dal momento che il fenomeno della corrosione non può essere determinato in maniera deterministica. In Figura V.28 si riportano i valori medi μ e i coefficienti di variazione dei singoli elementi strutturali di una bulk carrier. Si rammenta che il $COV = \sigma/\mu$ dipende dalla deviazione standard σ dei campioni concorrenti alla determinazione statistica della variabile esaminata.

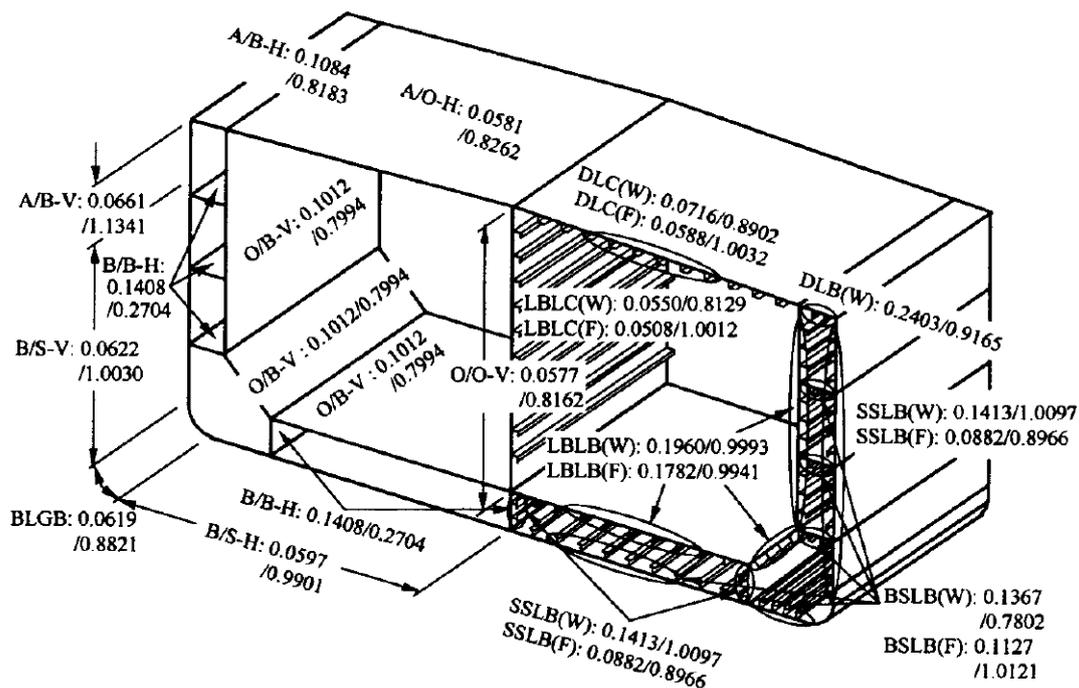


Figura V.28

V.6.7 Principio di calcolo a spessore netto

I modelli normativi di calcolo della corrosione sono semplificati rispetto al modello temporale precedentemente descritto e si basano sul cosiddetto **principio di calcolo a spessore netto (net scantling approach)**. Secondo tale principio si determina lo spessore minimo di ogni elemento strutturale detto spessore netto t_{net} . A tale spessore si somma un margine di corrosione t_c che deve compensare il fenomeno corrosivo della struttura con riferimento ad una vita media della nave di 25 anni. La somma dello spessore netto e del margine di corrosione fornisce lo spessore lordo t_{gross} da installare a bordo della nave in sede di costruzione, secondo la relazione:

$$t_{gross} = t_{net} + t_c$$

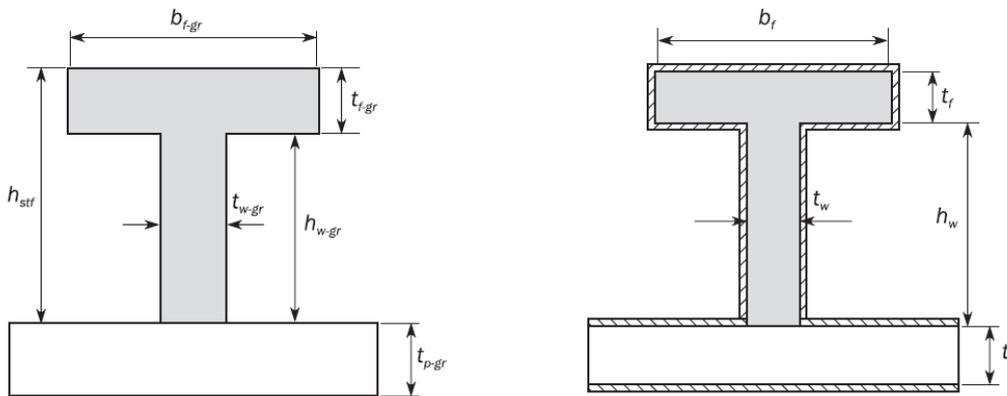


Figura V.29

Il margine di corrosione t_c si ottiene come somma di due margini di corrosione t_{c1} e t_{c2} relativi agli ambienti corrosivi cui sono esposte le due facce dell'elemento strutturale in esame:

$$t_c = t_{c1} + t_{c2}$$

Tali valori dipendono dal tipo della nave e dalla tipologia di elemento strutturale, come riportato nelle Figure V.30 e V.31 dove si riportano due estratti dei valori regolamentari per alcuni elementi strutturali.

Compartment type	Structural member		t_{c1} or t_{c2}		
			Oil tankers	BC-A or BC-B ships with $L \geq 150$ m	Other BC ships
Ballast water tank, bilge tank, drain storage tank, chain locker (1)	Face plate of PSM	Within 3m below top of tank (4)	2.0		
		Elsewhere	1.5		
	Other members (2) (3)	Within 3m below top of tank (4)	1.7		
		Elsewhere	1.2		
Cargo oil tank, slop tank	Face plate of PSM	Within 3m below top of tank (4)	1.7	N/A	
		Elsewhere	1.4		
	Inner-bottom plating/bottom of tank		2.1		
	Other members	Within 3m below top of tank (4)	1.7		
Elsewhere		1.0			

Figura V.30

Dry bulk cargo hold ⁽⁵⁾	Transverse bulkhead	Upper part ⁽⁶⁾	N/A	2.4	1.0	
		Lower stool: sloping plate, vertical plate and top plate ⁽⁷⁾		5.2	2.6	
		Other parts		3.0	1.5	
	Sloped plating of hopper tank, inner bottom plating			3.7	2.4	
	Other members	Upper part ⁽⁶⁾		N/A	1.8	1.0
		Webs and flanges of the upper end brackets of side frames of single side bulk carriers				
		Webs and flanges of lower brackets of side frames of single side bulk carriers			2.2	1.2
Other parts		2.0	1.2			
Exposed to atmosphere	Weather deck plating		1.7			
	Other members		1.0			

Figura V.31

I margini di corrosione si determinano dopo aver determinato i singoli ambienti corrosivi della nave, che ad esempio con riferimento alla nave bulk-carrier in Figura V.32 sono i seguenti:

1. *Acqua di mare;*
2. *Combustibile;*
3. *Acqua di zavorra;*
4. *Carico liquido alla rinfusa;*
5. *Atmosfera.*

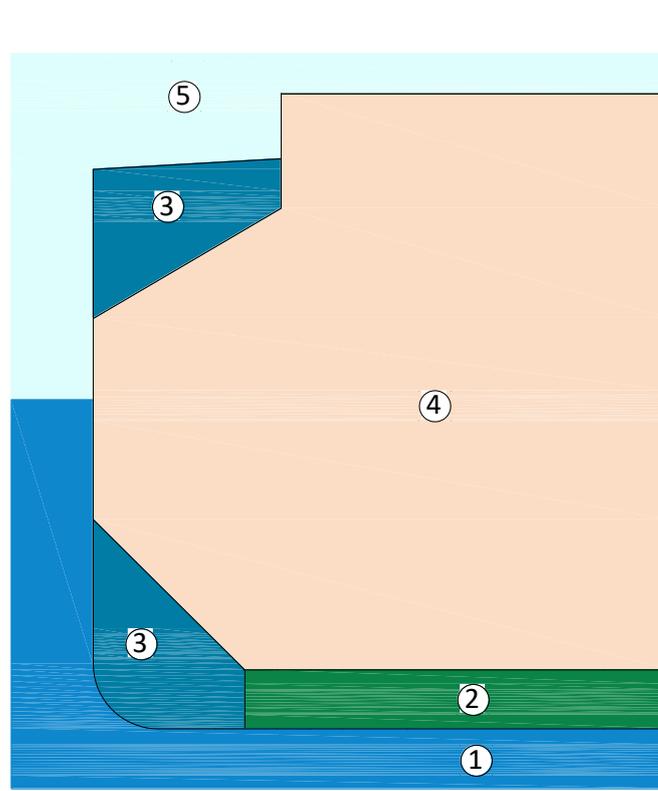


Figura V.32

Ad esempio i margini di corrosione dei fasciami del fondo si calcolano con riferimento agli ambienti corrosivi (1) e (2), mentre i fasciami del cielo del doppiofondo hanno margini di corrosione dipendenti dagli ambienti corrosivi (2) e (4). Invece i due margini di corrosione del paramezzale centrale sono uguali in quanto fanno entrambi riferimento allo stesso ambiente corrosivo (2). Similmente le anime e le flange dei correnti del fondo e del cielo del doppiofondo hanno i due margini di corrosione uguali e dipendenti dall'ambiente corrosivo (2).

VI. Impianti oleodinamici e dell'aria compressa

VI.1 Impianti oleodinamici

VI.1.1 Timonerie elettroidrauliche

Si definisce **impianto di governo di una nave (steering system)** l'insieme dei sistemi di comando, trasmissione di potenza e movimentazione che consentono il brandeggio (rotazione) del timone di una nave a distanza. La maggior parte degli impianti costitutivi del sistema della nave si trova all'interno di un locale poppiero, detto **locale agghiaccio timone (steering room)**, mentre il sistema di comando e gestione dell'impianto di governo della nave è normalmente posizionato all'interno della **stazione di governo (steering control station)** dove è normalmente ubicata la **ruota di governo (steering wheel)** che consente il brandeggio del timone. Partendo da quanto precedentemente detto, è possibile definire lo schema a blocchi di Figura VI.1 che sintetizza il funzionamento dei sistemi di governo di una nave:

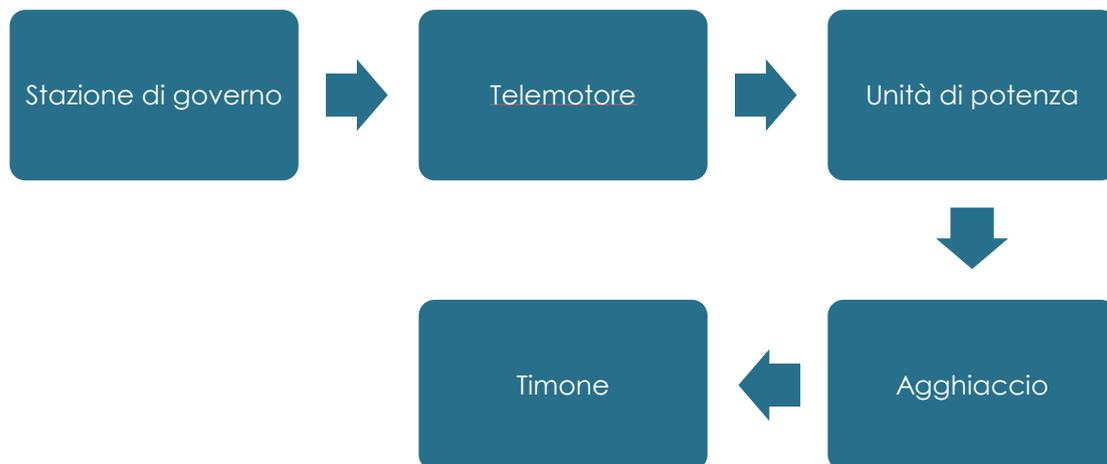


Figura VI.1

Pertanto, il comando fornito dalla stazione di governo mediante movimentazione della ruota del timone, viene trasmesso a distanza ad un **telemotore** che è l'elemento logico dell'impianto in quanto controlla direttamente l'unità di potenza oleodinamica in grado di movimentare il timone. L'**unità di potenza (power unit)** è in grado di azionare un dispositivo direttamente connesso al timone detto **agghiaccio (rudder actuator)** che fa ruotare il **timone (helm)**, generando in tal modo la rotazione dello stesso intorno al proprio asse verticale. Da quanto detto si evince dunque che il comando dei timoni avviene sempre a distanza e come tutti i comandi a distanza è sempre mediato da un telemotore che converte il comando impartito in un segnale elettrico di attivazione o disattivazione dell'unità di potenza.

Normalmente le navi sono dotate di un unico timone posto nel piano diametrale, ma qualora vi sia la necessità di una maggiore capacità di manovra, le navi possono disporre di due timoni simmetrici rispetto al piano diametrale della nave. Nel caso di navi dotate a due timoni, qualora la nave è moto-elica i timoni saranno esterni al flusso dell'elica. Invece nel caso di navi bielica con 2 timoni, gli stessi sono posizionati nel flusso

dell'elica. Indipendentemente dal numero e dalla posizione i timoni ruotano intorno ad un asse verticale detto **asse di rotazione del timone**. La superficie della pala del timone proiettata sul piano longitudinale della nave può essere disposta tutta a poppavia dell'asse di rotazione del timone, o in taluni casi parzialmente a proravia di quest'ultimo. In tal caso il timone si definisce **compensato (balanced rudder)**.

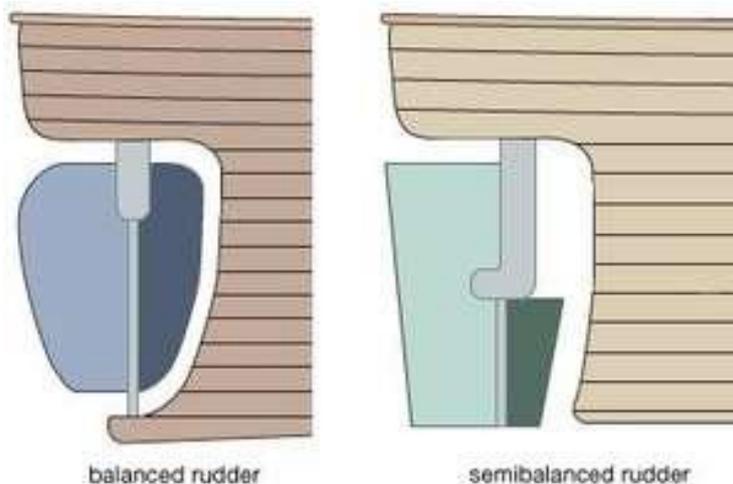


Figura VI.2

Si definisce inoltre **grado di compenso (balance ratio)** il rapporto tra l'area di pala a proravia dell'asse di rotazione del timone e l'area totale della pala. L'utilizzo di un timone compensato consente di ridurre i carichi torsionali sull'asta del timone con conseguente riduzione della potenza nominale dell'unità di controllo del timone stesso. Normalmente il grado di compenso non è mai superiore a 0.30 per motivi di stabilità idrodinamica del profilo alare del timone. Normalmente tale valore è pari a 0.10 per navi da carico e 0.20-0.25 per navi passeggeri. Qualora la parte del timone a proravia dell'asse di rotazione si estenda verticalmente per una parte dell'altezza della pala, il timone si definisce **semicompensato (semibalanced rudder)**.

Il dimensionamento dell'unità di potenza dipende inoltre dalle dimensioni della pala. L'area di quest'ultima è normalmente compresa tra l'1% e il 3.5% della proiezione sul piano longitudinale dell'opera viva della nave. Al crescere **dell'angolo di barra del timone (rudder angle)** aumenta l'effetto evolutivo sulla nave (Figura VI.3).

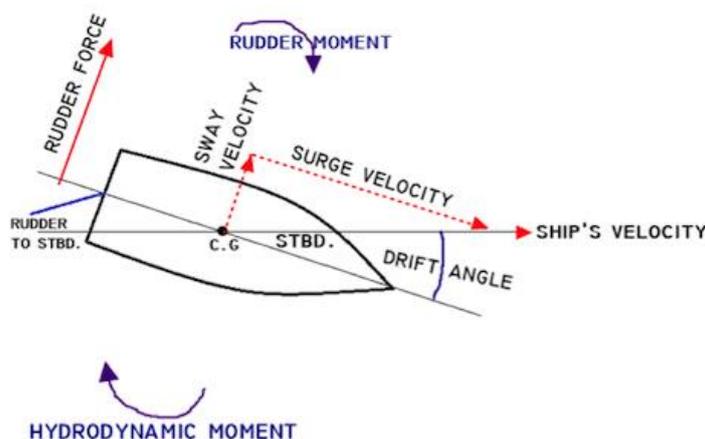


Figura VI.3

Tale effetto è legato alla **forza risultante netta generata dalla pala (rudder force)** quando quest'ultima forma un angolo di attacco con la direzione prevalente dei filetti fluidi non nullo. In tal caso si genera una forza netta che induce una rotazione della nave intorno al proprio centro di massa. Gli effetti volutivi massimi si ottengono normalmente per valori dell'angolo di barra pari a 30-35°.

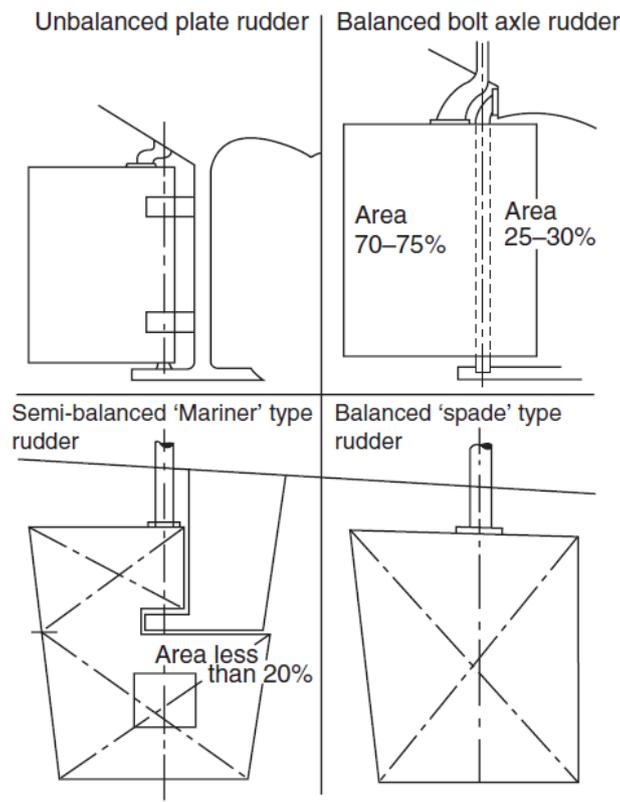


Figura VI.4

In funzione del tipo di connessione del timone o dell'asta alle strutture della nave i timoni si classificano in 4 categorie (Figura VI.4):

- **Timone non compensato a semplice lamiera (*unbalanced single plate rudder*):** è la tipologia di timone più semplice, benché disusata almeno per le navi di grandi dimensioni. L'asta del timone presenta due supporti intermedi detti agugliotti, connessi alle strutture di poppa della carena;
- **Timone compensato con appoggio su calcagnolo (*Balanced bolt axle rudder*):** tale timone presenta un grado di compenso compreso normalmente tra il 25 e il 30%. L'asse di rotazione ha due appoggi di cui uno alla base su un ringrosso dello scafo detto calcagnolo. Tale timone trova ampio impiego per navi di medie dimensioni;
- **Timone semi-compensato con appoggio su pinna (*Semi-balanced Mariner-type rudder*):** tale timone presenta un grado di compenso compreso normalmente inferiore al 20%. Il timone presenta un unico appoggio su una pinna connessa alla volta di poppa. La parte a proravia dell'asse di rotazione del timone è posta solo al di sotto della pinna. Tale timone è molto comune per navi di grandi dimensioni;

- **Timone a spada sospeso (Balanced spade-type rudder):** tale timone presenta un elevato grado di compenso, normalmente fino al 30%. Non ha appoggi inferiori e, pertanto, si definisce sospeso. Trova applicazione solo su unità di dimensioni medio-piccole.

L'asta del timone è movimentata da unità di potenza. In particolare, ogni nave deve essere dotata delle seguenti fonti di energia per la movimentazione dei timoni:

- **Unità primaria;** deve essere in grado di ruotare il timone da -35° a $+30^\circ$ nel tempo massimo di 28 s con la nave operante alla massima velocità.
- **Unità secondaria;** in caso di avaria dell'unità primaria, quella secondaria deve essere in grado di brandeggiare il timone da -15° a $+15^\circ$ nel tempo massimo di 60 s ad una velocità massima della nave di 7 kn.

VI.1.2 Impianti ausiliari di coperta

Una ulteriore applicazione dell'oleodinamica di potenza a bordo delle navi è quella afferente la movimentazione degli ausiliari di coperta per la messa a mare e il recupero dei sistemi di ormeggio delle navi, normalmente costituiti da catene in acciaio e ancore con diverso potere ancorante. Tali elementi, del peso di decine di t, sono movimentati da opportuni ausiliari di coperta anch'essi ad azionamento oleodinamico detti **macchine per salpare**, a loro volta suddivise in due grandi categorie:

- **Verricelli (winch):** sono macchine con asse di lavoro orizzontale con almeno una ruota ad impronte e generalmente due campane di estremità (drums) sulle quali sono avvolti i cavi in acciaio per il tonnage delle navi, come rappresentato in Figura VI.5;
- **Argani (capstan):** sono macchine con asse di lavoro verticale e sono dotati normalmente di una campana di estremità. Il principio di funzionamento è simile al precedente. Trovano normalmente impiego a bordo di navi passeggeri e grandi navi da carico dal momento che offrono normalmente un minore ingombro rispetto ai verricelli e possono essere azionati da un motore che può essere posto sottocoperta, come mostrato in Figura VI.6.

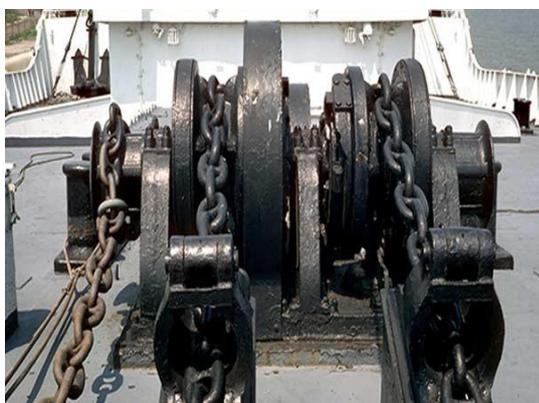


Figura VI.5



Figura VI.6

Le catene sono normalmente stivate all'interno di un volume stagno realizzato nella zona prodiera della nave detto *pozzo catene* (**chain locker**). Tramite una tubolatura

verticale le stesse si ingranano sulle ruote del verricello, passano successivamente attraverso un deviatore posto sul ponte di coperta e entrano all'interno di un tratto sub-verticale che fuoriesce in corrispondenza dell'estremità prodiera della nave dove sono posizionate le ancore. L'estremità libera della catena che permane all'interno del pozzo è connessa alla paratia del pozzo mediante un elemento rigido che evita la perdita accidentale dell'ancora e della catena.

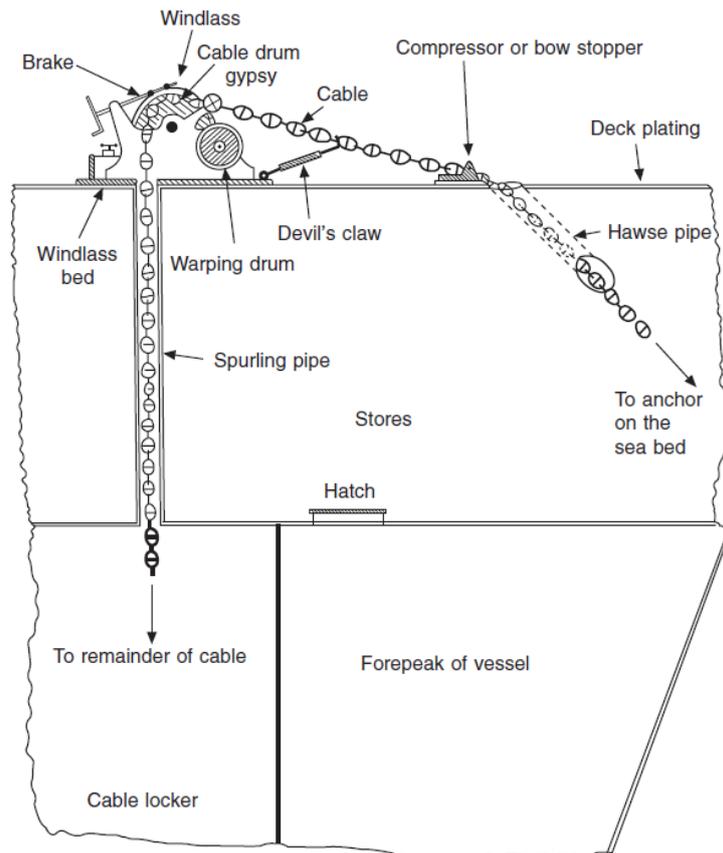


Figura VI.7

Il dimensionamento delle ancore per l'ormeggio delle navi e delle relative catene, nonché dei cavi in acciaio o fibra sintetica per il tonneggio della nave viene effettuata mediante una trattazione semplificata basata sul calcolo regolamentare del **Modulo di Armamento (Equipment Number)** della nave, definito come segue:

$$EN = \Delta^{2/3} + 2Bh + 0.1A$$

dove:

- Δ è il dislocamento di pieno carico in t;
- B è la larghezza fuori ossatura della nave in m
- h è l'altezza efficace in m, del cielo della sovrastruttura più alta della nave dal galleggiamento di pieno carico estivo, da calcolarsi mediante la relazione $h = h_{FB} + \sum_n h_n$, avendo indicato con h_{FB} il bordo libero estivo in m e con h_n l'altezza della n-ma sovrastruttura in corrispondenza della traccia del piano di simmetria con larghezza maggiore di $B/4$ (Figura VI.8);
- A è l'area in m², misura sul piano longitudinale, dello scafo e delle sovrastrutture con larghezza maggiore di $B/4$ e i parapetti di altezza maggiore di 1.5 m.

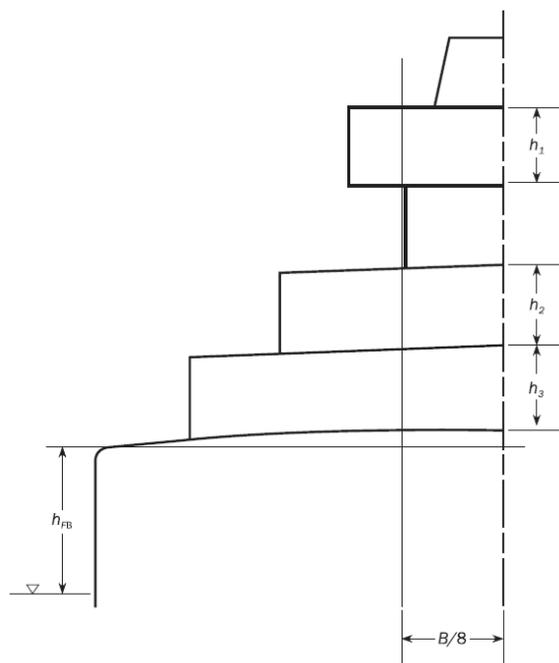


Figura VI.8

Una volta determinato l'EN della nave è possibile stabilire:

- Il numero delle ancore e il peso di ciascuna ancora;
- La lunghezza complessiva delle catene con il relativo diametro nell'ipotesi di catene di tipo Normal strength steel (grade 1), High strength steel (grade 2) e Extra high strength steel (grade 3).

Il peso di ciascuna ancora è relativo ad ancore di tipo ordinario. Nel caso di ancore ad elevato (HHP) potere ancorante (High Holding Power) di tipo HHP il peso può essere ridotto fino al 75% del valore nominale. Nel caso di ancore ad elevatissimo potere ancorante (Super High Holding Power) di tipo SHHP il peso può essere ridotto fino al 50% del valore nominale. Il calcolo regolamentare vale per un EN compreso tra 150 e 16000. In Figura VI.9 è riportato un estratto della tabella per il dimensionamento dei sistemi di ormeggio delle navi.

Table 1 : Equipment - Bower anchors and chain cables

Equipment Number		Stockless bower anchors		Chain cable stud link bower chain			
Greater than	Equal to or less than	Number of anchors (a)	Mass per anchor, in kg	Length, in m	Diameter, in mm		
					Normal strength steel (Grade 1)	High strength steel (Grade 2)	Extra high strength steel (Grade 3)
150	175	2	480	275	22	19	*
175	205	2	570	302.5	24	20.5	*
205	240	2	660	302.5	26	22	20.5
240	280	2	780	330	28	24	22
280	320	2	900	357.5	30	26	24
320	360	2	1020	357.5	32	28	24
360	400	2	1140	385	34	30	26
400	450	2	1290	385	36	32	28

Figura VI.9

VI.2 Impianti dell'aria compressa

VI.2.1 Generalità

Gli impianti pneumatici o ad aria compressa trovano largo impiego a bordo delle navi e sono sostanzialmente installati per il comando a distanza della quasi totalità degli impianti o degli elementi di allestimento. Questi ultimi infatti possono essere controllati a distanza o mediante segnali di tipo elettrico o mediante segnali di tipo pneumatico. I secondi presentano diversi vantaggi costruttivi ed operativi:

- Economicità e semplicità di installazione;
- Accessibilità del fluido pneumatico (Aria);
- Possibilità di utilizzo anche in locali ad elevato rischio di incendio in quanto tali sistemi non sono sottoposti a cortocircuiti;
- Possibilità di raggiungere distanze elevate nella trasmissione dei segnali di comandi da remoto;
- Possibilità di immagazzinamento dell'aria in appositi serbatoi sotto pressione e possibilità di funzionamento dei comandi da remoto anche senza energia elettrica.

A tali vantaggi si associano alcuni difetti, tra cui i principali sono:

- Ridotte potenze;
- Impossibilità di effettuare una regolazione fine dei segnali di controllo;
- Necessità di abbattimento del tasso di umidità nell'aria.

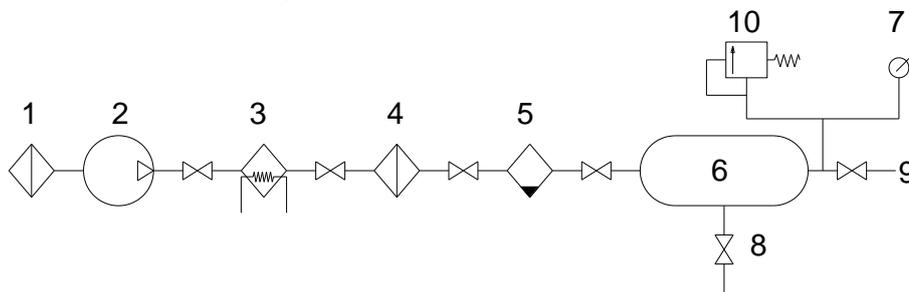
Tuttavia gli impianti pneumatici soprattutto per le operazioni di regolazione automatica trovano vasto impiego in ambito navale, mentre risultano meno diffusi gli impianti pneumatici di potenza che trovano impiego quasi esclusivamente per l'avviamento dei motori diesel principali ed ausiliari.

VI.2.2 Produzione trattamento e distribuzione

L'aria compressa per l'avviamento dei motori diesel principali e ausiliari è prodotta in una apposita centrale alla pressione di 30 bar. Sulla linea principale è normalmente posto un riduttore di pressione per l'alimentazione di ulteriori utenze. L'aria compressa per servizi diversi dall'avviamento dei motori principali viene invece prodotta in una o più unità indipendenti a una pressione compresa tra 3 e 8 bar, più frequentemente tra 5 e 6 bar. Il layout tipico di un impianto di produzione e trattamento dell'aria compressa è rappresentato nella Figura VI.10.

L'aria viene aspirata inizialmente attraverso un compressore dopo essere passata attraverso un sistema di filtraggio posto a monte di quest'ultimo per eliminare tracce di particelle in sospensione. L'aria viene normalmente compressa alla pressione nominale di 30 bar in modo tale da poter essere adoperata sia per gli impianti pneumatici di potenza che per gli impianti di regolazione automatica. In uscita dal compressore l'aria transita attraverso un refrigeratore e successivamente attraverso un'ulteriore unità filtrante. Prima di essere stoccata in un serbatoio sotto pressione, viene fatta passare attraverso uno o più separatori di condensa. Lo stoccaggio dell'aria nel serbatoio sotto pressione consente di effettuare le operazioni di regolazione automatica o regolazione

di potenza anche in assenza di energia elettrica. In uscita dal serbatoio l'aria viene inviata sulle linee di distribuzione eventualmente dotate di riduttori di pressione se la stessa è usata in impianti di regolazione automatica.



1	Filtro del compressore
2	Compressore
3	Refrigeratore
4	Filtro dell'aria
5	Separatore di condensa
6	Serbatoio di stoccaggio
7	Riduttore di pressione con manometro
8	Valvola di spurgo del serbatoio
9	Linea di distribuzione
10	Valvola di massima pressione

Figura VI.10

VI.2.3 Separatore di condensa

L'aria compressa per l'azionamento degli automatismi di bordo o per l'avviamento dei motori principali deve essere priva di impurità che potrebbero inficiare l'efficienza dell'impianto. Le principali impurità presenti nell'aria compressa sono le seguenti:

- **Tracce di olio:** sono normalmente dovute alla lubrificazione dei manovellismi del compressore e possono essere rimosse con sistemi di filtraggio ad assorbimento;
- **Particelle solide in sospensione:** sono dovute al pulviscolo atmosferico, alla ruggine presente all'interno delle tubolature;
- **Vapore acqueo:** è l'elemento principale che deve essere rimosso dal momento che dalla concentrazione di vapore acqueo e dalla pressione dipende la temperatura di rugiada dell'aria, come mostrato nelle curve di saturazione in Figura VI.11.

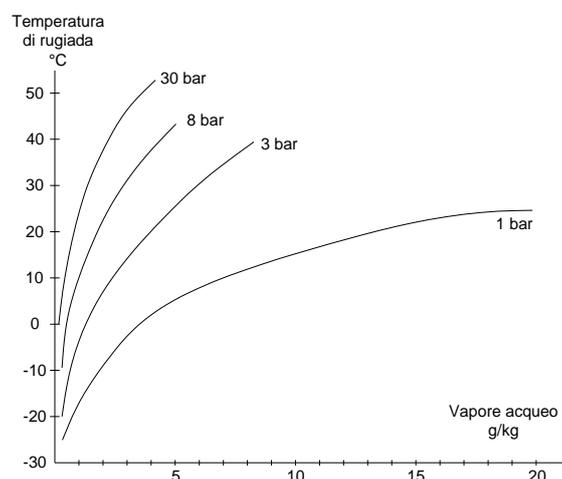


Figura VI.11

Dal grafico in figura si evince, dunque, che riducendo il tenore di vapore acqueo presente nell'aria compressa, si riduce la sua temperatura di rugiada. La condensa viene, pertanto, nel separatore di condensa. I separatori maggiormente adoperati sono di tipo centrifugo, come quello in Figura VI.12. In particolare, mettendo in rotazione l'aeriforme, le tracce di vapore acqueo in sospensione tendono ad addensarsi verso la periferia del separatore per essere poi raccolte nella parte inferiore dello stesso.

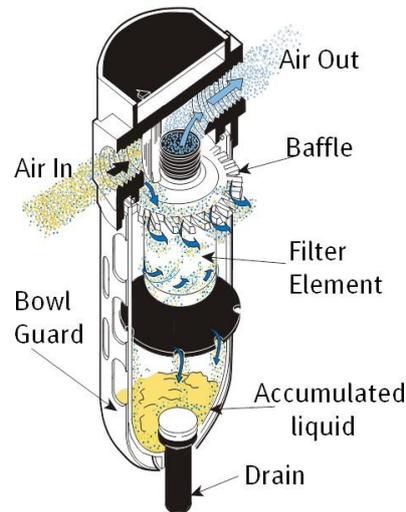


Figura VI.12

VI.2.4 Impianto di deumidificazione con sistema di preraffreddamento

L'impianto riportato in Figura VI.13 rappresenta il layout funzionale più semplice. L'aria in ingresso a monte dell'elettrocompressore a una temperatura nominale di 20 °C e la pressione di 1 bar ha una umidità standard di 14.7 g/kg.

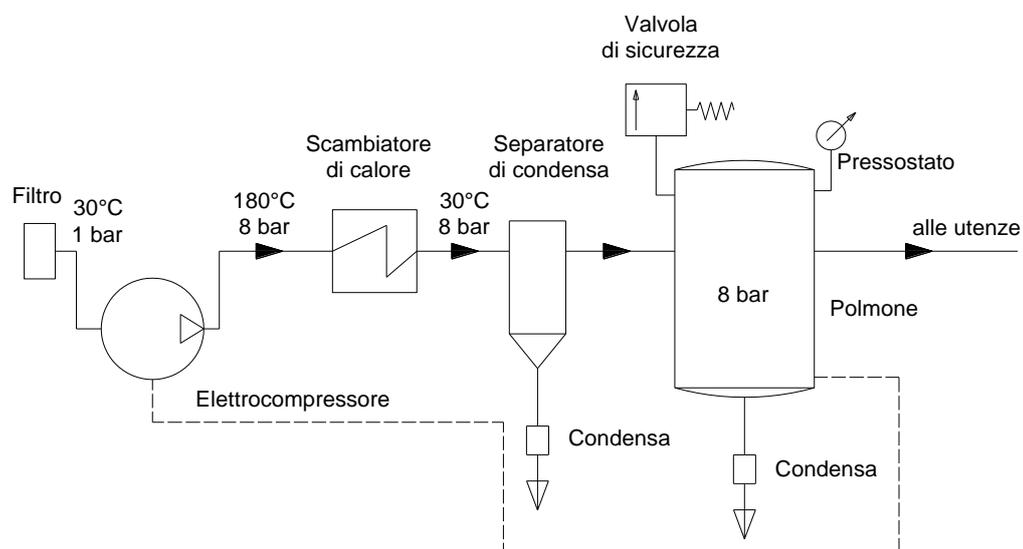


Figura VI.13

In uscita dall'elettrocompressore l'aria è ad una pressione di 8 bar e una temperatura di 180 °C. Subisce un preraffreddamento in uno scambiatore di calore che riporta la temperatura a 30 °C mantenendo la pressione a 8 bar. Successivamente viene fatta transitare attraverso il separatore di condensa centrifugo e viene stoccata nel polmone

pressurizzato a 8 bar. Il passaggio del fluido nel separatore di condensa consente di ridurre il tenore di vapore acqueo dal valore limite di 3.3 g/kg a valle del refrigeratore ad una pressione di 8 bar e 30 °C a valori nettamente inferiori, consentendo così di abbassare la temperatura di rugiada dell'aria al di sotto del quale si avrebbe formazione di condensa.

VI.2.5 Impianto di deumidificazione con sistema di filtraggio multistadio

Quando è necessario effettuare una deumidificazione spinta dell'aria gli impianti sono dotati di un sistema meccanico multistadio, come quello in Figura VI.14, che si ottiene ponendo a valle del polmone di stoccaggio un sistema di filtri meccanici in serie, normalmente costituiti da: (i) un filtro ceramico, (ii) un filtro a coalescenza e (iii) un filtro a carbone attivi, con le seguenti caratteristiche:

- **Filtro ceramico:** consente di trattenere particelle di dimensioni minime di 5 micron;
- **Filtro a coalescenza:** permette di trattenere particelle in sospensione fino a 0.01 micron e di ridurre la presenza di eventuali particelle di olio in sospensione fino a valori dell'ordine di 0.01 ppm;
- **Filtro a carbone attivo:** consentono di ridurre ulteriormente l'eventuale presenza di particelle di olio in sospensione fino a valori dell'ordine di 0.003 ppm.

La parte impiantistica a monte del sistema di filtraggio multistadio è analoga a quella vista in precedenza.

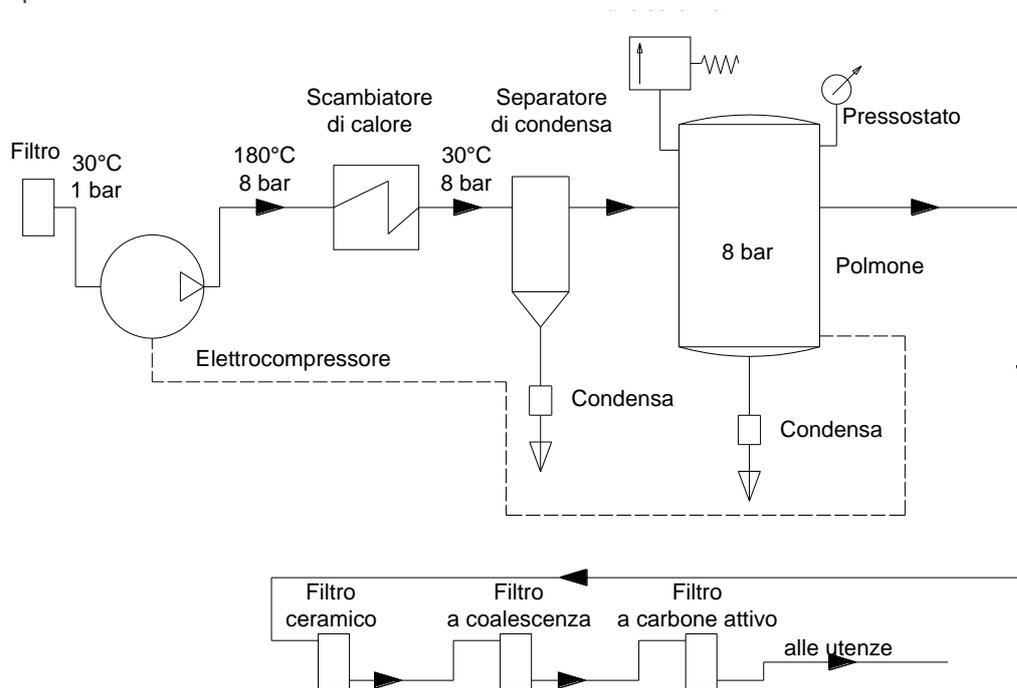


Figura VI.14

VI.2.6 Impianto di deumidificazione con sistema di filtraggio per assorbimento

Lo schema impiantistico in Figura VI.15 è simile al precedente ma si caratterizza per la presenza di un'ulteriore unità filtrante posta tra il filtro ceramico e il filtro a coalescenza. Tale unità filtrante detta filtro assorbente, è costituita normalmente da due filtri in parallelo di cui uno funzionante e l'altro in stand-by. Il principio di funzionamento di tale

sistema di filtraggio si basa sull'assorbimento delle tracce di vapore acqueo mediante processi di natura chimica o per rigenerazione:

- **Filtro ad azione chimica:** si basa sull'utilizzo di sostanze solide igroscopiche che assorbono il vapore acqueo contenuto nell'aria, passando allo stato liquido. Le sostanze maggiormente adoperate sono il cloruro di sodio o il fosfato di calcio. Poiché come detto si sciolgono al passaggio dell'aria, assorbendo il vapore acqueo, vanno spurgate periodicamente dal fondo del filtro e sostituite periodicamente;
- **Filtro per rigenerazione:** si utilizzano soluzioni liquide, normalmente a base di cloruro di litio, di zinco o di calcio che assorbono il vapore acqueo con conseguente riduzione della loro concentrazione. Tale sistema richiede una rigenerazione periodica della soluzione liquida che deve essere appunto riconcentrata.

In entrambi i casi tali unità filtranti devono essere periodicamente sottoposte a manutenzione e questo spiega la presenza di due unità filtranti di cui una di rispetto all'altra.

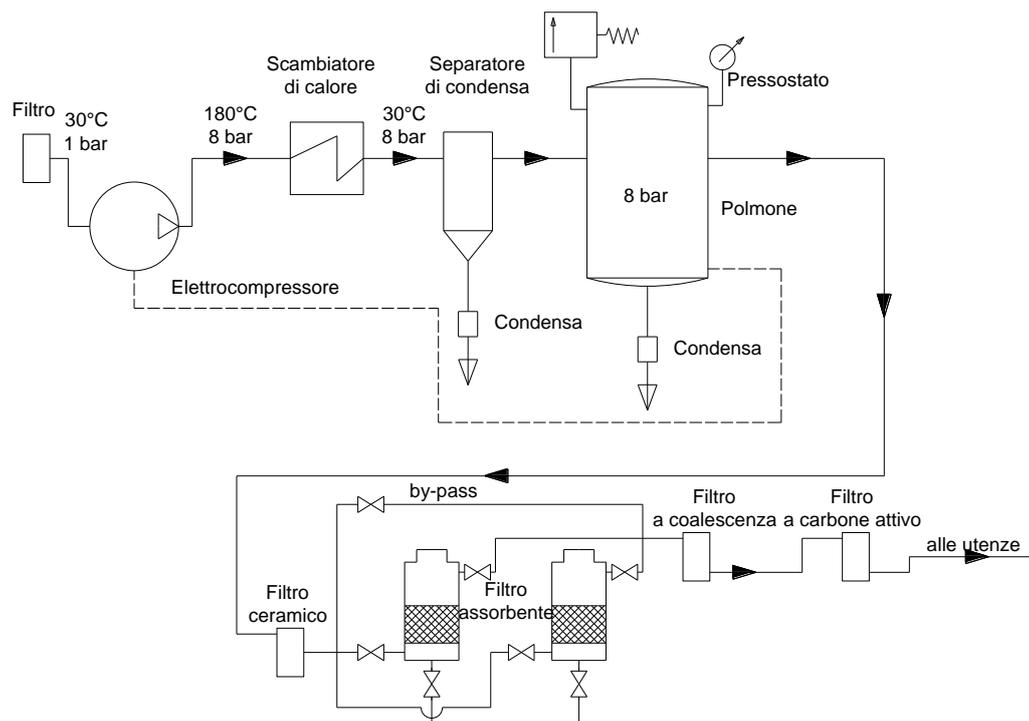


Figura VI.15

Negli impianti navali sono normalmente adoperati due filtri ad azione chimica, uno di rispetto all'altro. In tal modo il funzionamento dei filtri è di tipo intermittente, dal momento che uno è in funzione e l'altro in manutenzione. Lo spurgo delle sostanze igroscopiche transitate dallo stato solido a quello liquido può essere effettuato in modalità manuale oppure automatica. L'impianto è normalmente dotato anche di una linea di by-pass del sistema di filtraggio ad assorbimento che conduce l'aria direttamente al sistema di filtraggio a coalescenza.

VI.2.7 Impianto di deumidificazione con sistema di filtraggio per adsorbimento

Lo schema di principio degli impianti di deumidificazione con sistema di filtraggio per adsorbimento, riportato in Figura VI.16, è analogo al caso visto in precedenza. L'unica differenza risiede nelle unità filtranti interposte tra il filtro ceramico e il filtro a coalescenza. In tal caso infatti i sistemi filtranti sono del tipo ad adsorbimento. Pertanto, all'interno delle unità filtranti sono posti materiali adsorbenti, tra cui il gel di silice, l'allumina attivata o il carbone attivo, che trattengono il vapore acqueo. Nel corso del tempo i letti di materiale adsorbente contenuti nelle unità filtranti si saturano e devono pertanto essere rigenerati. Per tale motivo i filtri adsorbenti sono sempre due, in modo tale che uno è in funzione mentre l'altro è in rigenerazione. La rigenerazione dei letti adsorbenti viene effettuata insufflando aria deumidificata a pressione atmosferica all'interno dell'unità filtrante mediante un'apposita linea evidenziata in magenta nello schema. Mediante tale operazione il vapore acqueo tende a condensare ed accumularsi nella parte inferiore del filtro adsorbente, dal quale verrà rimossa mediante linee di drenaggio della condensa. Ovviamente l'aria insufflata nelle unità adsorbenti è una parte della stessa aria generata dall'impianto di deumidificazione ma ricondotta a pressione atmosferica.

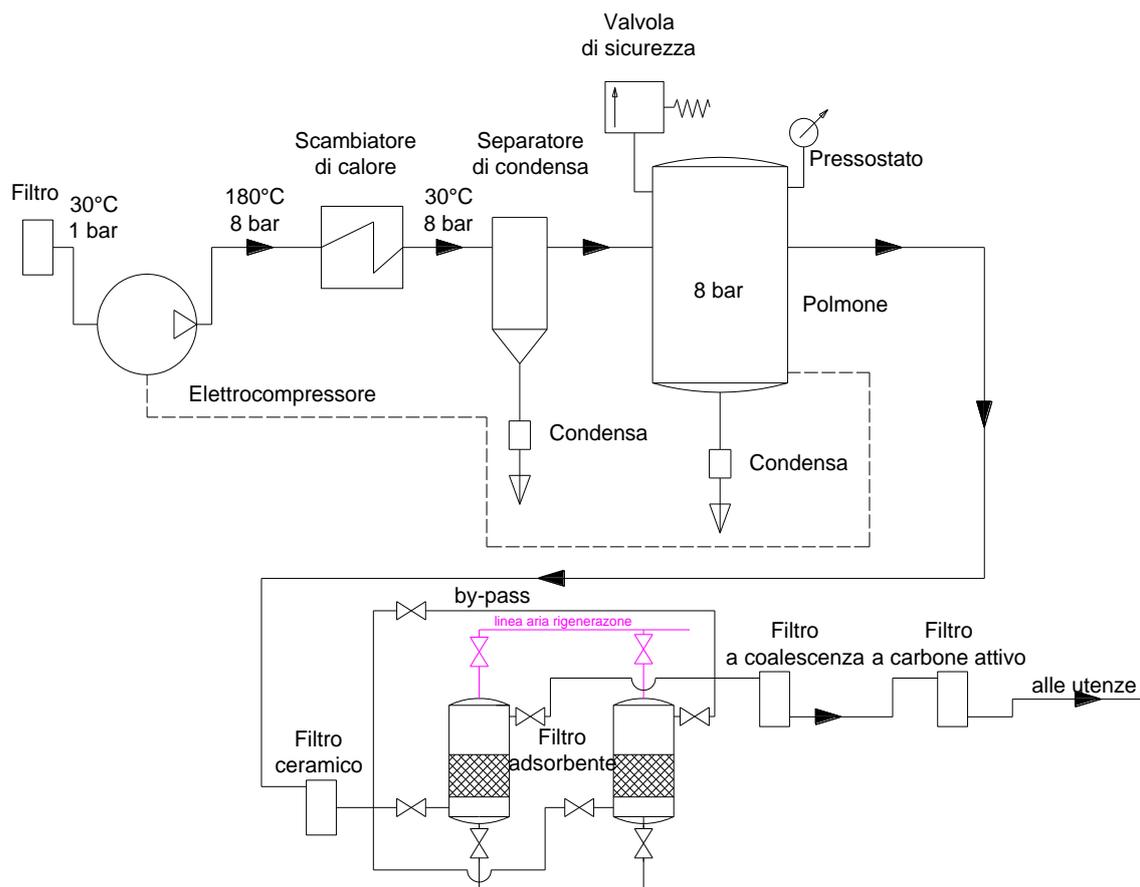


Figura VI.16

L'impianto è inoltre dotato di una linea di by-pass frapposto tra il filtro ceramico e il filtro a coalescenza che consente di escludere le unità filtranti se necessario, garantendo il funzionamento dell'impianto.

VI.2.8 Impianto di deumidificazione per refrigerazione

A differenza degli schemi precedenti, l'impianto in Figura VI.17 è dotato di un sistema di refrigerazione multistadio. Il layout impiantistico fino al serbatoio in pressione a 8 bar è del tutto analogo al caso precedente. La differenza risiede nella parte a valle del serbatoio in pressione che prevede la presenza di un filtro ceramico e un ulteriore scambiatore di calore. Pertanto, l'aria alla temperatura di 30 °C e 8 bar, viene ulteriormente raffreddata fino alla temperatura di 2 °C consentendo un'ulteriore riduzione della concentrazione di vapore acqueo che a valle dello scambiatore di calore non può superare il valore limite di 0.56 g/kg. A valle del secondo refrigeratore l'aria alla pressione di 8 bar e alla temperatura di 2 °C e ha una temperatura di rugiada di circa 10 °C. Se sulla linea di distribuzione è presente un riduttore di pressione si ha un ulteriore effetto benefico con ulteriore abbassamento della temperatura di rugiada a parità di tenore di vapore acqueo.

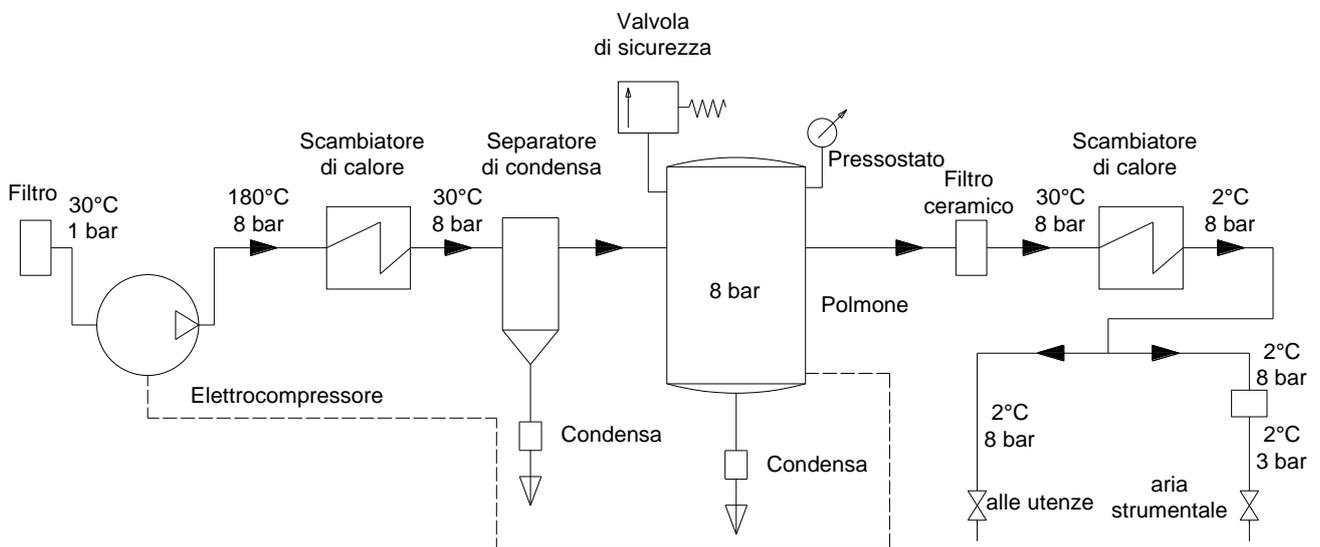


Figura VI.17

VI.2.9 Impianto di deumidificazione con linea by-pass di emergenza

Gli impianti dotati di linea di by-pass di emergenza, come quelli in Figura VI.18, hanno sempre una pressione di lavoro di 30 bar e pertanto sono sempre dotati di un sistema di refrigerazione multistadio poiché più efficace per l'abbattimento della temperatura di rugiada. A differenza dello schema precedente tale impianto, normalmente adoperato per l'avviamento dei motori principali, è dotato di due elettrocompressori in serie ai quali sono interposti due scambiatori di calore. L'aria in ingresso, a pressione atmosferica e alla temperatura nominale di 20 °C, ha un'umidità massima di 14.7 g/kg. A valle del secondo sistema di refrigerazione l'aria ha una pressione di 30 bar, una temperatura di 30°C e un tenore di umidità di 1 g/kg. A valle del polmone di stoccaggio in pressione non sono normalmente presenti ulteriori unità filtranti e l'aria è direttamente distribuita alle utenze.

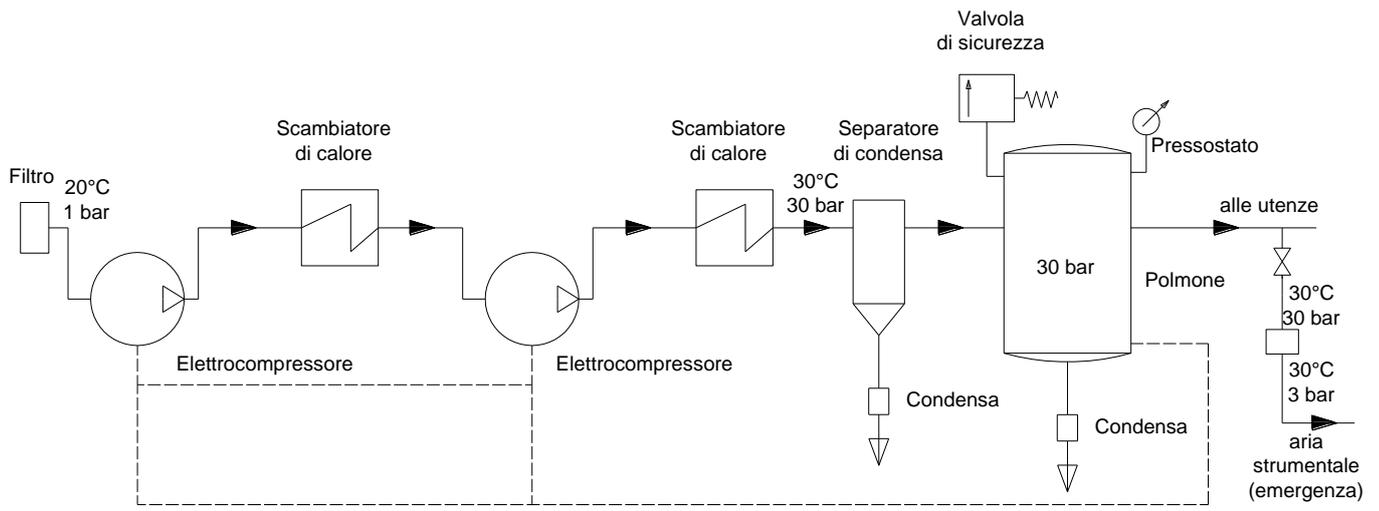


Figura VI.18