

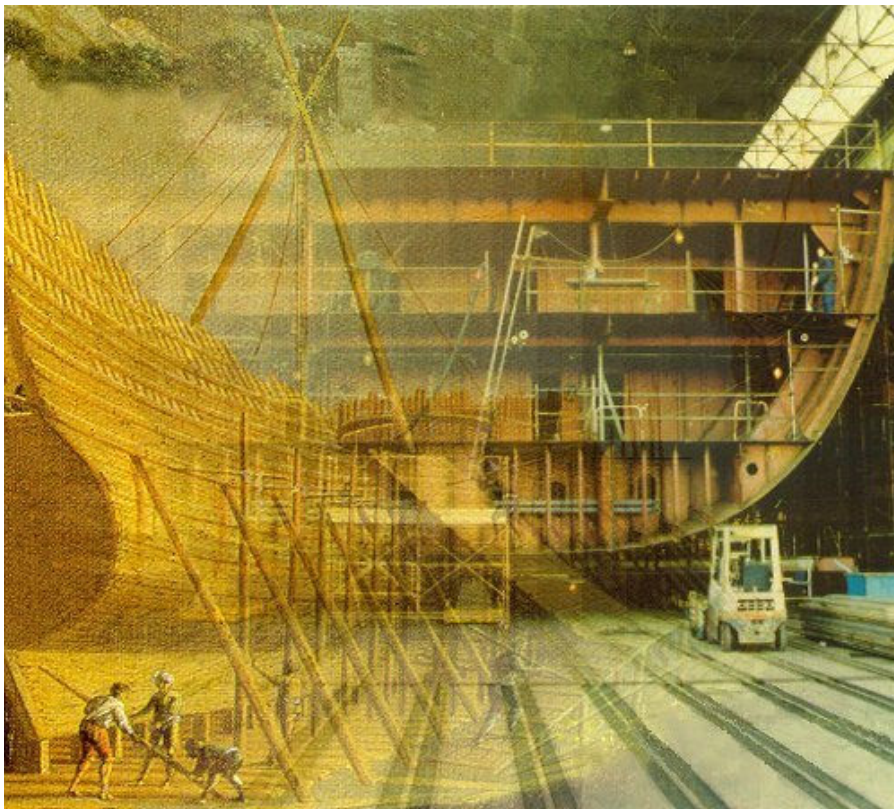
ACCADEMIA NAVALE

A.N. 5-49



NOZIONI DI ARCHITETTURA NAVALE

a cura del C.V. (GN) Giuliano ROSATI



POLIGRAFICO ACCADEMIA NAVALE
LIVORNO-2004

INDICE

GENERALITA' SULLA PROGETTAZIONE NAVALE.....	4
L'ARCHITETTURA NAVALE.....	6
1. TEORIA DELLA NAVE	7
1.1 Geometria della nave.....	7
1.1.1 Nomenclatura.....	7
1.1.2 Dimensioni principali dello scafo.....	10
1.1.3 Marche di bordo libero.....	11
1.1.4 Registri di classificazione.....	12
1.1.5 Piano di costruzione.....	13
1.1.6 Coefficienti caratteristici delle carene.....	14
1.2 Statica della nave.....	18
1.2.1 Equilibrio dei corpi.....	18
1.2.2. Corpi totalmente immersi.....	19
1.2.3. Corpi parzialmente immersi.....	19
1.2.4. Stabilità trasversale per piccole inclinazioni.....	21
1.2.5. Stabilità trasversale per inclinazioni superiori a 10°.....	23
1.2.6. Diagramma di stabilità statica trasversale.....	23
1.2.7. Stabilità di forma e di peso.....	24
1.2.8. Determinazione del centro di gravità di una nave – Prova di stabilità.....	26
1.2.9. Mezzi per aumentare il valore dell'altezza metacentrica.....	27
1.2.10. Stabilità statica longitudinale.....	27
1.3 Cause di variazione della stabilità della nave.....	28
1.3.1 Spostamento verticale.....	29
1.3.2 Nave ingavonata.....	29
1.3.3 Spostamento trasversale.....	30
1.3.4 Spostamento longitudinale.....	31
1.3.5 Spostamento generico di un peso.....	31
1.3.6 Carichi sospesi.....	32
1.3.7 Carichi scorrevoli.....	32
1.3.8 Carichi alla rinfusa.....	33
1.3.9 Carichi liquidi.....	33
1.3.10 Accostata ed evoluzione.....	34
1.3.11 Imbarco e sbarco di pesi.....	34
1.3.12 Falla ed incaglio.....	36
1.3.13 La compartimentazione stagna.....	36
1.3.14 Incaglio.....	37
1.3.15 Immissione in bacino.....	38
1.4 Cenni di dinamica della nave.....	39
1.4.1 Resistenza al rimorchio.....	39
1.4.2 Determinazione della resistenza totale.....	40
1.4.3 Calcolo della resistenza residua.....	41
1.4.4 Determinazione della potenza installata.....	41
2 COSTRUZIONE NAVALE	43
2.1 Materiali da costruzione.....	43
2.2 Materiali metallici.....	43
2.2.1 Prove progettuali.....	43
2.2.2 Lavorabilità.....	45
2.3 Impiego durevole nel tempo.....	46
2.3.1 La corrosione.....	46
2.3.2 Mezzi per ridurre gli effetti corrosivi.....	47
2.4 Materiali metallici più utilizzati.....	49
2.4.1 L'acciaio.....	49
2.4.2 Il Titanio e le sue leghe.....	51
2.4.3 Le leghe leggere.....	52

2.4.4	Rame, zinco e loro leghe.....	53
2.4.5	Materiali per la fabbricazione delle eliche	53
2.5	I materiali non metallici	54
2.5.1	Il legno	54
2.5.2	I materiali compositi.....	55
2.6	I collegamenti	59
2.6.1	Generalità	59
2.6.2	La chiodatura.....	60
2.6.3	La saldatura.....	60
2.7	Le strutture navali	61
2.7.1	Generalità	61
2.7.2	Struttura prevalentemente trasversale	62
2.7.3	Struttura prevalentemente longitudinale	63
2.7.4	Struttura mista	65
2.7.5	La struttura del fondo	65
2.7.6	La struttura del fianco.....	65
2.7.7	Strutture di rinforzo e di sostegno dei ponti	65
2.7.8	Paratie stagne	67
2.7.9	Le strutture della prora	67
2.7.10	Le strutture della poppa.....	68
2.7.11	Strutture nel locale A.M.	68
2.7.12	Il fasciame	68
	Appendice 1.....	70
	Appendice 2.....	75
	Appendice 3.....	79

INTRODUZIONE

Il presente testo è stato progettato quale ausilio didattico ai corsi informativi di “Architettura Navale” per i quali, pur se la materia non rientra nei fondamenti del piano degli studi, rimane comunque un elemento caratterizzante nella formazione per un Ufficiale di Marina.

Nel testo sono inseriti pertanto gli elementi di base della materia quali la nomenclatura, gli elementi caratteristici della geometria dei mezzi navali, gli elementi che caratterizzano la stabilità e la tenuta al mare, i materiali da costruzione e le loro caratteristiche principali, gli elementi costruttivi, il tutto in termini sintetici ed elementari, ma sufficientemente esaustivi per le finalità dei corsi.

GENERALITA' SULLA PROGETTAZIONE NAVALE

Le navi in generale, ed in particolare le navi militari, sono realizzazioni di straordinario impegno, destinate ad avere una vita utile superiore ai 25 anni, ulteriormente prolungabili mediante interventi di "ringiovanimento". Per tutta la loro esistenza esse devono conservare un elevato livello di efficienza pur operando intensamente in situazioni sfavorevoli (moto ondoso e ambiente corrosivo). Non va infine dimenticato che le navi rappresentano il caso praticamente unico di ambiente in cui il personale deve, ad un tempo, vivere ed operare per periodi molto prolungati.

Ecco perché esse sono il frutto di un'opera di progettazione e costruzione particolarmente complessa, un tempo realizzata mediante la genialità e l'abilità individuale di singoli costruttori o progettisti, oggi attraverso un imponente lavoro collettivo della parte committente e della parte realizzatrice(i cantieri).

Tralasciando il processo di progettazione del naviglio mercantile, peraltro concettualmente non diverso anche se notevolmente più semplice, per dare un'idea della complessità di quello militare è qui riportata la successione dei passi previsti dalla regolamentazione in vigore per arrivare alla commessa di un nuovo tipo di Unità.

Una volta che in sede di *pianificazione generale* viene individuata l'esigenza di un nuovo mezzo, si attiva un processo che prevede, in successione (anche se per comprimere i tempi alcune fasi possono essere parzialmente sovrapposte), i seguenti passi:

- formulazione del documento di impianto
- formulazione della bozza delle specifiche operative generali
- esecuzione del controllo di prefattibilità (ventaglio delle soluzioni possibili)
- valutazione dei tempi e dei costi nei vari casi
- scelta della soluzione più conveniente
- formulazione delle specifiche operative generali
- formulazione delle specifiche operative per i singoli sottosistemi
- determinazione della consistenza del personale
- studio di fattibilità e bozza del progetto generale
- valutazione dei tempi e dei costi
- revisione della bozza di progetto generale (compatibilità con i tempi e costi accettabili)
- stesura della bozza di specifiche tecniche e formulazione del progetto generale definitivo
- compilazione delle specifiche tecniche e verifica della loro rispondenza al progetto
- stesura ed esecuzione del contratto,

il tutto in un contesto iterativo reso necessario dalla necessità di armonizzare le ambizioni operative con i vincoli imposti dalla disponibilità di risorse finanziarie ed umane.

Se si pensa poi che le *specifiche operative* possono facilmente riempire alcuni volumi, può essere anche immaginato l'impegno del progettista, tenuto ad armonizzare numerosissimi fattori, di cui si citano soltanto alcuni dei più importanti, per ottenere il

miglior risultato possibile nell'ambito dei vincoli di tonnellaggio e costo che gli vengono imposti:

- garantire alle armi il massimo settore di tiro
- evitare interferenze tra i sensori
- massimizzare velocità ed autonomia
- minimizzare consumi e segnature
- garantire gli spazi necessari ai locali operativi ed alla vita dell'equipaggio pur mantenendo nei limiti le dimensioni delle sovrastrutture.

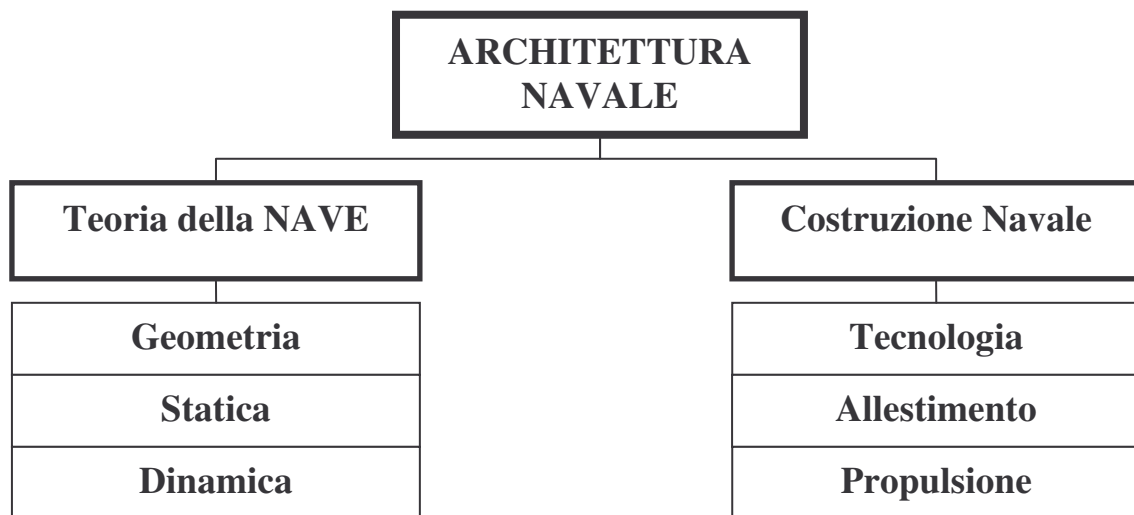
Ulteriori vincoli ed esigenze sono rappresentate, infine, dalla necessità di *compartimentare* la nave (cioè suddividerne gli spazi interni mediante paratie stagne al fine di garantirne la galleggiabilità anche nel caso di allagamento - gli standard M.M. richiedono la galleggiabilità anche nel caso di allagamento di tre compartimenti contigui) e di *disporre* l'apparato motore ed i mezzi di generazione dell'energia (oggi esclusivamente elettrica) per i servizi di bordo in modo tale da assicurare la migliore sopravvivenza degli stessi in caso di offesa nemica. A tal fine gli elementi componenti (caldaie, motrici, motori Diesel, turbine a gas (TAG), elettrogeneratori etc.) sono sistemati in locali separati e spesso distanziati fra loro.

In definitiva, la progettazione dei mezzi è una delle attività essenziali della Marina, dalla quale dipende una parte significativa dell'efficienza dello strumento militare nazionale: anche nell'ambiente odierno, ove i progetti maggiori possono essere il frutto di cooperazioni internazionali, esso richiede la dedicata professionalità di tutti coloro che vi sono coinvolti.

L'ARCHITETTURA NAVALE

Tutte le cognizioni relative alle Navi (cioè alla forma, alle dimensioni, alla produzione, alle qualità nautiche, ai particolari di costruzione e di allestimento, alla manutenzione, alla riparazione, ecc.) formano oggetto della scienza che va sotto il nome di **Architettura Navale**.

L'Architettura Navale comprende due parti distinte: la Teoria della Nave e la Costruzione Navale.



La **Teoria della Nave**, facendo astrazione dai particolari costruttivi, considera la Nave nel suo insieme e ne fa lo studio dal punto di vista geometrico.

La **Costruzione Navale** si occupa invece dello studio e della realizzazione delle parti che compongono la Nave nel suo insieme, dei materiali da costruzione, dei mezzi per metterli in opera, dell'allestimento, della propulsione, ecc..

La Teoria della Nave viene ordinariamente suddivisa in tre parti, non nettamente distinte, che sono: la Geometria, la Statica e la Dinamica della Nave.

La **Geometria** individua le dimensioni lineari, di superficie e di volume della nave e ricerca l'ottimizzazione di tali dimensioni e dei relativi punti caratteristici (baricentri, centri di carena, ecc.,...) nell'ottica del progetto di base.

La **Statica**, che è la meccanica della Nave nelle condizioni di riposo, si occupa essenzialmente dello studio della stabilità.

La **Dinamica** tratta della resistenza al moto, della manovrabilità, della tenuta al mare, dei mezzi propulsivi (elica).

1. TEORIA DELLA NAVE

Geometria della nave

1.1.1 Nomenclatura

Nave Galleggiante atto a muoversi sulla superficie del mare e dotato di propri mezzi di propulsione e governo

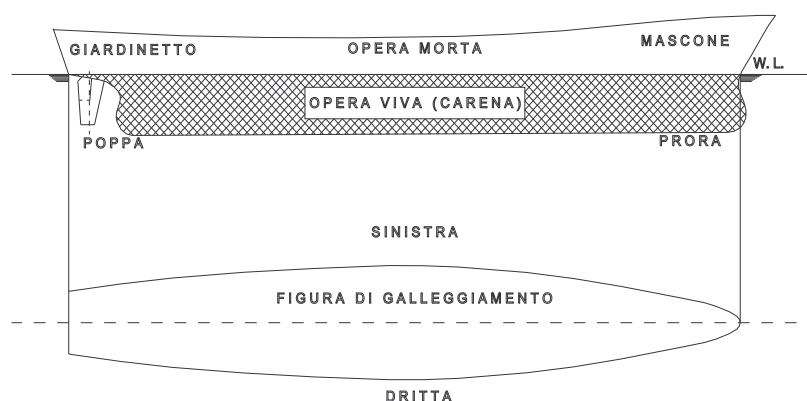


Figura 1.1

Scafo E' la parte che costituisce l'involucro stagno della nave. E' costituito dalla parte immersa detta OPERA VIVA o CARENA e dalla parte emersa detta OPERA MORTA; è chiuso superiormente dal PONTE DI COPERTA sul quale poggiano le sovrastrutture. Lo scafo è simmetrico rispetto ad un piano verticale longitudinale detto PIANO DIAMETRALE o di SIMMETRIA. Per un osservatore rivolto nel senso di avanzamento della nave le due parti definite dal longitudinale sono rispettivamente la dritta e la sinistra; la parte avanti è la PRORA o PRUA, la parte addietro è la POPPA. Le estremità risultano sempre affinate, la prora per separare la massa fluida, la poppa per colmare il vuoto lasciato dal passaggio della nave e per agevolare la sistemazione del propulsore e degli organi di manovra. tra le due parti affinate se ne trova una pressoché cilindrica detta ZONA MAESTRA.

Fasciame E' il rivestimento esterno dello scafo. Per le navi in acciaio è formato da lamiere fissate su un scheletro strutturale. Le dimensioni della nave verranno poi definite ENTRO o FUORI FASCIAME se misurate entro o fuori la superficie del fasciame.

Murate Sono la parte emersa dei fianchi della nave. La parte prodiera si dice MASCONO, quella poppiera GIARDINETTO. Per navi con poppa a incrociatore o "transom", si dice SPECCHIO la parte verticale di fasciame che chiude posteriormente lo scafo.

Insellatura (o cavallino) Si dice LINEA DI INSELLATURA o CAVALLINO la proiezione sul piano diametrale della nave della linea di intersezione della superficie interna di ciascuna murata con la superficie inferiore del ponte di coperta.

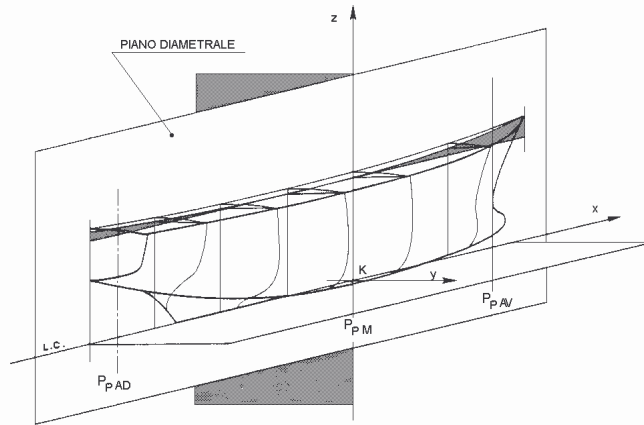


Figura 1.2

Orlo E' la linea gobba che delimita superiormente le murate dello scafo.

Retta del baglio E' la retta orizzontale passante per l'intersezione tra il ponte di coperta e le murate della nave.

Bolzone Il ponte di coperta sul piano trasversale presenta una concavità rivolta verso il basso. L'innalzamento del ponte sulla retta del baglio misurato sul piano di simmetria si dice bolzone. Tale curvatura serve a far defluire fuori bordo l'eventuale acqua imbarcata in coperta.

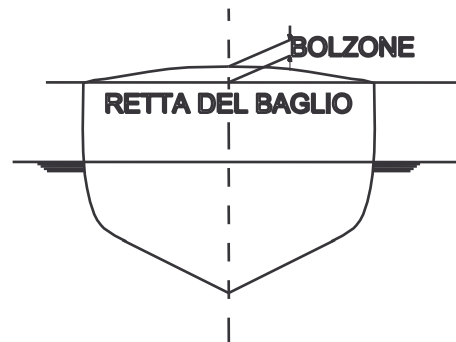


Figura 1.3

Piano di galleggiamento E' la superficie di separazione tra parte immersa e parte emersa dello scafo; definisce il livello del fluido sul quale la nave galleggia.

Linea di galleggiamento E' la linea intersezione tra lo scafo ed il piano di galleggiamento. Le linee intersezioni tra lo scafo ed i piani paralleli al piano di galleggiamento si dicono LINEE D'ACQUA.

Figura (area) di galleggiamento E' la figura racchiusa dalla linea di galleggiamento.



Figura 1.4

Centro di carena E' il baricentro del volume di carena.

Superficie di carena E' la superficie bagnata dello scafo.

Centro di galleggiamento E' il baricentro della figura di galleggiamento

Perpendicolare avanti P_{PAV} E' la perpendicolare al piano di galleggiamento di progetto passante per l'intersezione tra la traccia di tale piano con la superficie della struttura anteriore della nave detta RUOTA DI PRORA.

Perpendicolare addietro P_{PAD} E', generalmente, la perpendicolare al piano di galleggiamento passante per l'asse di rotazione del timone .

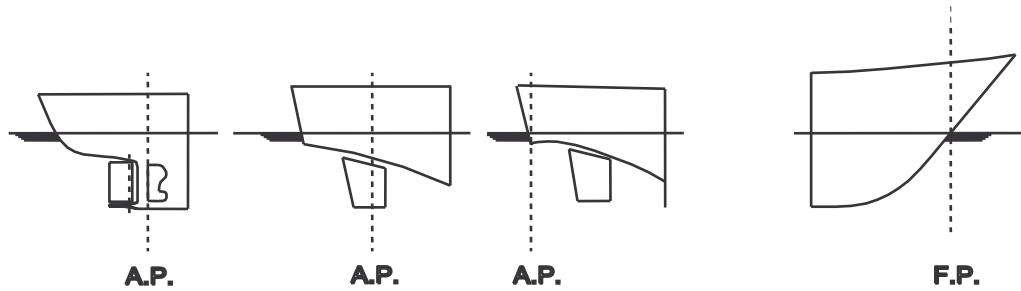


Figura 1.5

Perpendicolare al mezzo P_{PM} E' la perpendicolare al piano di galleggiamento equidistante dalle due estreme.

Punto di chiglia E' l'intersezione tra il profilo dello scafo entro fasciame e la perpendicolare al mezzo.

Linea di costruzione o di base E' la retta orizzontale, giacente sul piano di simmetria e passante per il punto di chiglia.

Linea di chiglia E' la linea intersezione tra il piano di simmetria e la superficie entro fasciame dello scafo.

Linea di sottochiglia E' la linea parallela alla linea di chiglia dalla quale differisce dello spessore della chiglia. Viene indicata con L.S.CH.

Sovrastrutture I ponti al di sopra della coperta prendono il nome di sovrastrutture. Si dicono CASSERI se estesi da murata a murata, altrimenti TUGHE. I casseri, a seconda della posizione, prendono il nome di cassero di poppa, centrale e di prora, quest'ultimo è detto anche CASTELLO.

Sezioni trasversali Si ottengono sezionando lo scafo con piani verticali normali al piano di simmetria longitudinale.

Sezione maestra E' la sezione trasversale che racchiude la massima area immersa.

Ponti

- Ponte principale è il ponte continuo e resistente più in alto
- Ponte di coperta è il ponte continuo più alto della nave, parzialmente o totalmente scoperto, delimitante verso l'alto lo scafo propriamente detto.
- Ponte di bordo libero è il più alto ponte completo le cui aperture situate nelle zone esposte sono provviste di mezzi permanenti di chiusura stagni.
- Ponte delle paratie stagne è il ponte stagno, continuo od a gradini, sotto cui sono intestate tutte le paratie stagne.
- Ponte del servizio di sicurezza è il ponte, generalmente coperto, coincidente o

sovrastante il ponte delle paratie stagne, al di sopra del quale devono essere posti tutti i maneggi e le manovre a distanza degli impianti del servizio di sicurezza; esso può coincidere con il ponte di coperta. Sulle navi militari vengono denominati dall'alto verso il basso: Coperta, 1° Corridoio (o batteria), 2° Corridoio, ecc. Si dicono COPERTINI i ponti parziali. Lo spazio sottostante l'ultimo ponte si dice STIVA; il fondo della stiva si chiama SENTINA.

1.1.2 Dimensioni principali dello scafo

Lunghezza tra le perpendicolari L_{PP} E' la distanza tra perpendicolare avanti e perpendicolare addietro. E' una misura convenzionale che caratterizza molto bene una nave: non tiene infatti conto degli slanci di prora e di poppa e viene per questo utilizzata ai fini della resistenza al moto e della robustezza strutturale.

Lunghezza al galleggiamento L_{WL} E' la lunghezza della figura di galleggiamento.

Lunghezza fuori tutto L_{OA} E' l'ingombro longitudinale massimo della nave comprendente ogni appendice.

Larghezza al galleggiamento B E' la larghezza massima della figura di galleggiamento

Larghezza massima B_{MAX} E' l'ingombro trasversale massimo della nave.

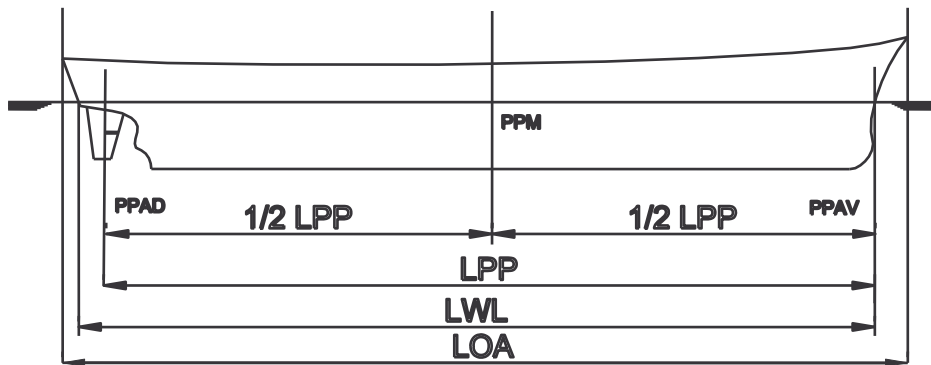


Figura 1.6

Altezza di costruzione D

Viene definita come la distanza verticale tra linea di costruzione e retta del baglio in corrispondenza della perpendicolare al mezzo.

Immersione T E' la distanza verticale tra piano di galleggiamento e linea di sottochiglia. In particolare si definiscono: IMMERSIONE AVANTI, ADDIETRO, AL MEZZO, quelle in corrispondenza delle rispettive perpendicolari.

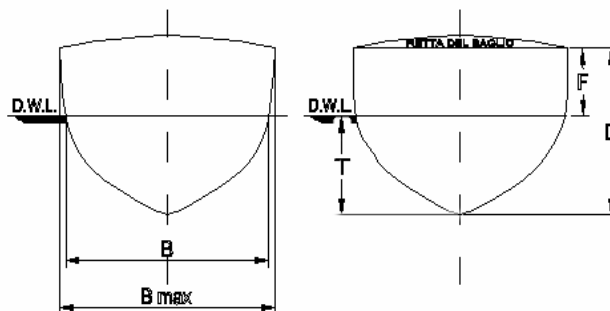


Figura 1.7

Pescaggio E' l'immersione massima che tiene conto anche di appendici di carena che possono sporgere al di sotto della linea di sottochiglia.

Marche di immersione L'immersione viene letta con l'ausilio di apposite marche saldate a scafo dette marche di immersione. Tali marche si trovano in corrispondenza delle tre perpendicolari su entrambe le murate.

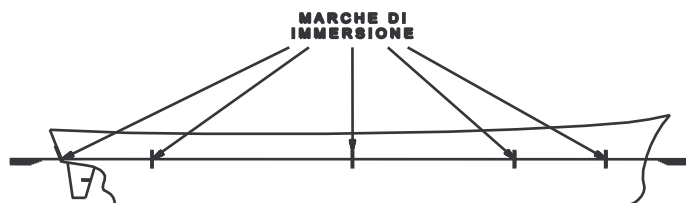


Figura 1.8

Volume di carena ∇ E' il volume racchiuso dallo scafo fino al piano di galleggiamento, cioè è il volume dell'opera viva.

Dislocamento Δ E' il peso della nave misurato solitamente in tonnellate. Per le navi militari vengono definiti diversi dislocamenti in funzione delle condizioni di carico previste:

- Dislocamento di nave scarica ed asciutta (senza liquidi, munizionamento ed equipaggio).
- Dislocamento alle prove (dislocamento a pieno carico – 1/3 dei carichi consumabili).
- Dislocamento di pieno carico.
- Dislocamento standard (dislocamento a pieno carico – peso dei liquidi per la propulsione).

Portata lorda E' la differenza tra dislocamento di pieno carico e quello di nave scarica ed asciutta. E' cioè il peso di tutto quello che la nave può trasportare.

Portata netta E' il peso del carico pagante, cioè delle merci, cose e persone trasportate.

Stazza E' la misura rappresentativa del volume degli spazi chiusi di una nave. E' dunque una misura di volume e viene calcolata in tonnellate di stazza pari a 100 piedi cubici inglese (2,832 m³).

Bordo libero F E' la distanza verticale tra piano di galleggiamento di pieno carico e retta del baglio misurata in corrispondenza della perpendicolare al mezzo. Il suo valore minimo è stabilito per le navi mercantili da una apposita normativa internazionale la cui applicazione è controllata dai **REGISTRI DI CLASSIFICAZIONE**. Lo scopo del bordo libero è:

- a) costituire una riserva di spinta che è la differenza tra il peso di acqua che la nave sposterebbe quando fosse con il ponte di coperta affiorante ed il dislocamento di pieno carico;
- b) costituire una riserva di stabilità in modo che la nave possa reagire a forze inclinatorie trasversalmente in modo adeguato;
- c) dare alla nave una idonea altezza di piattaforma per preservare apparecchiature e personale da danni dovuti a colpi di mare.

1.1.3 Marche di bordo libero

Il bordo libero definisce la massima immersione che la nave può avere in acqua salata nella stagione estiva. Essa è indicata dall'orlo superiore di una striscia orizzontale, posta sulle murate a metà nave, attorno a cui è posizionata una corona circolare nota come "occhio di Plimsoll".

Superiormente al disco è situata, su ambedue le murate, una striscia di metallo, saldata allo scafo, il cui orlo superiore è alla stessa quota della retta del baglio del ponte di bordo libero.

Sono inoltre presenti un certo numero di tacche complementari:

- INA MASSIMA IMMERSIONE INVERNALE NORD ATLANTICO
- I MASSIMA IMMERSIONE INVERNALE
- E MASSIMA IMMERSIONE ESTIVA
- ET MASSIMA IMMERSIONE ESTIVA TROPICALE
- AD MASSIMA IMMERSIONE ACQUA DOLCE
- ADT MASSIMA IMMERSIONE ACQUA DOLCE TROPICALE

Le zone ed i periodi stagionali sono riportati sopra una cartina allegata al regolamento di bordo libero.

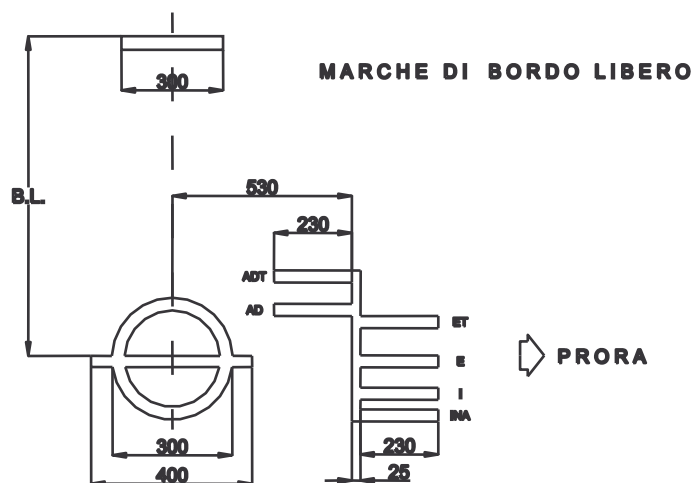


Figura 1.9

Si osservi che la costruzione delle navi militari non è soggetta a controlli da parte dei registri di classificazione non è inoltre prevista l'assegnazione del bordo libero in quanto gli standard di sicurezza imposti sono maggiori di quelli previsti per il naviglio mercantile.

1.1.4 Registri di classificazione

I registri di classificazione sono enti che hanno molteplici compiti, i più importanti dei quali sono:

- approvazione dei disegni elaborati dai cantieri
- sorveglianza e classificazione delle nuove costruzioni
- sorveglianza sulle riparazioni e trasformazioni delle navi già classificate
- sorveglianza periodica su scafo, apparato motore ed allestimento
- collaudo dei materiali impiegati per la costruzione e la riparazione

- verifica delle condizioni di stabilità
- verifica della sicurezza della vita umana in mare
- assegnazione del bordo libero.

A tali fini i registri stabiliscono delle norme alle quali i costruttori devono attenersi per quanto riguarda il dimensionamento di strutture, la costruzione di apparati motore, linee d'assi, eliche ecc., la scelta dei materiali, le loro lavorazioni e la scelta dell'allestimento.

Queste norme sono raccolte in volumi che vengono continuamente aggiornati in base al progresso tecnologico.

I Registri più importanti sono quelli che operano in paesi che hanno una maggiore tradizione nel campo delle costruzioni navali mercantili; tra questi ricordiamo: il Lloyd's Register (Gran Bretagna), l'American Bureau of Shipping (USA), il Norske Veritas (Svezia, Norvegia), l'IJMC (Giappone), il Bureau Veritas (Francia), il RINA (Italia).

Tutta la flotta mercantile mondiale è iscritta ad uno o più registri di classificazione che assegnano a ciascuna nave una classe in base alle qualità nautiche e strutturali rilevate dalle visite dei propri ispettori ed in base al tipo di impiego.

Le flotte militari non sono soggette a questo tipo di classifica.

In Italia il primo istituto di classifica fu fondato nel 1861 con il nome di Registro Navale. Attualmente le funzioni del Registro (oggi RINA) assumono una duplice veste: come Ente Pubblico, delegato dallo Stato, con compiti riguardanti la stazzatura delle navi, l'assegnazione del bordo libero, l'accertamento della navigabilità e della sicurezza della vita umana in mare; come ente privato per i compiti restanti.

Per ognuna di queste operazioni il RINA rilascia un'apposita certificazione probatoria.

1.1.5 Piano di costruzione

Ogni carena presenta una superficie a doppia curvatura derivante da analisi di tipo sperimentale su modelli intesi ad ottenere la minima resistenza al moto compatibilmente alle esigenze di impiego della nave.

Non essendo possibile rappresentare la carena univocamente con un unico disegno o mediante una espressione analitica, si ricorre ad una rappresentazione grafica della superficie fuori ossatura detta PIANO DI COSTRUZIONE.

Questo è costituito da tre viste ottenute sezionando lo scafo con tre famiglie di piani paralleli a quelli principali:

- piano diametrale o longitudinale (è il piano di simmetria della nave)
- piano orizzontale (perpendicolare al piano diametrale e passante per la linea di costruzione)
- piano trasversale o verticale perpendicolare agli altri due piani

Si vengono pertanto ad individuare tre famiglie di curve-sezioni che proiettate sui piani principali, secondo il metodo delle proiezioni ortogonali, formano i piani di costruzione.

Per l'esistente simmetria rispetto al piano longitudinale diametrale si disegna soltanto metà del piano orizzontale e del piano trasversale, ed in quest'ultimo si disegnano a destra del piano diametrale le sezioni relative al corpo prodiero ed a sinistra quelle relative al corpo poppiero.

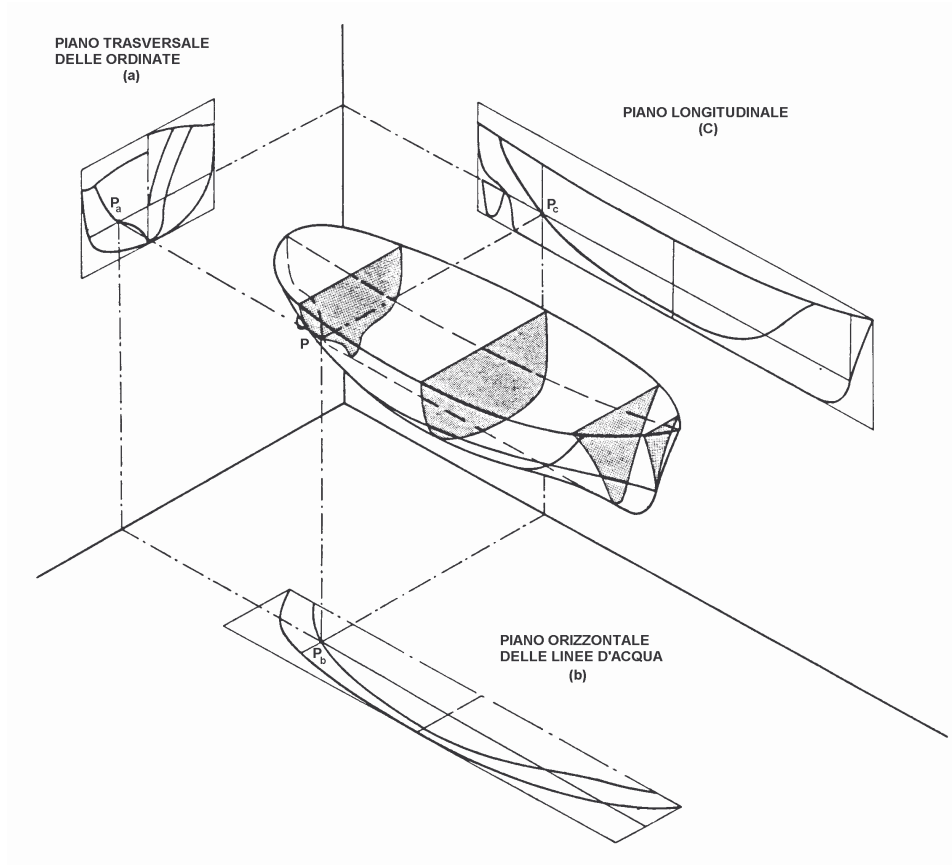


Figura 1.10

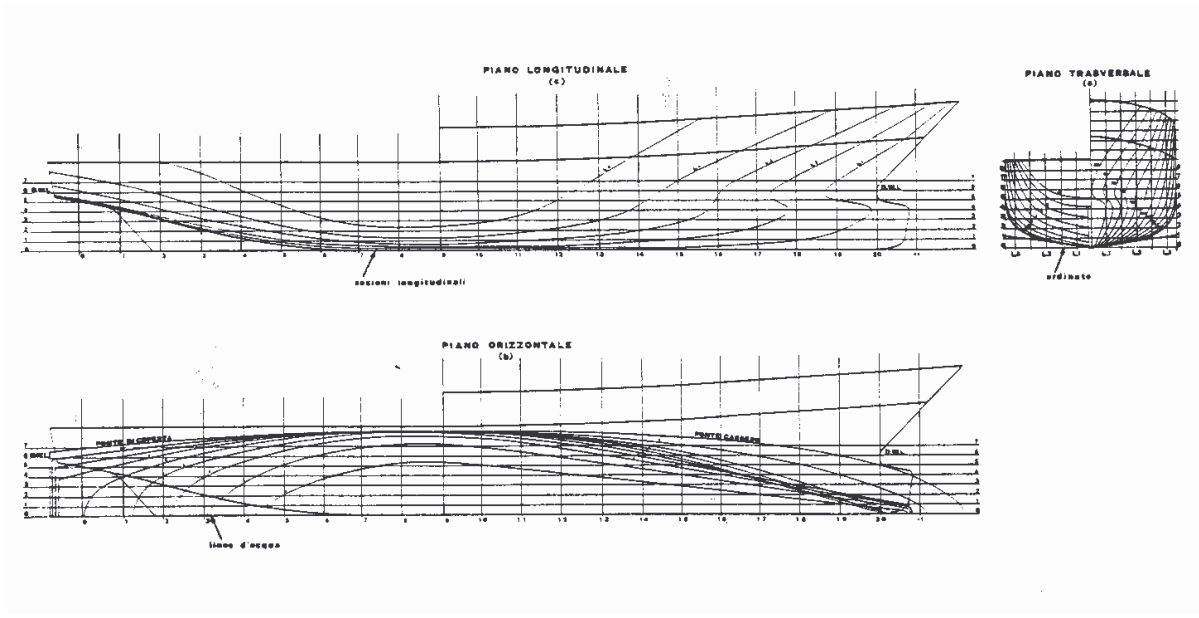


Figura 1.11

1.1.6 Coefficienti caratteristici delle carene

Per caratterizzare ulteriormente la geometria della nave è bene definire dei rapporti e dei coefficienti adimensionali utilizzabili nella fase di progettazione ed in qualsiasi confronto tra carene diverse. I parametri usati si riferiscono alle condizioni di carico di progetto a meno che non sia diversamente specificato.

I principali rapporti sono:

- lineari
- di superficie
- di volume

Rapporti lineari:

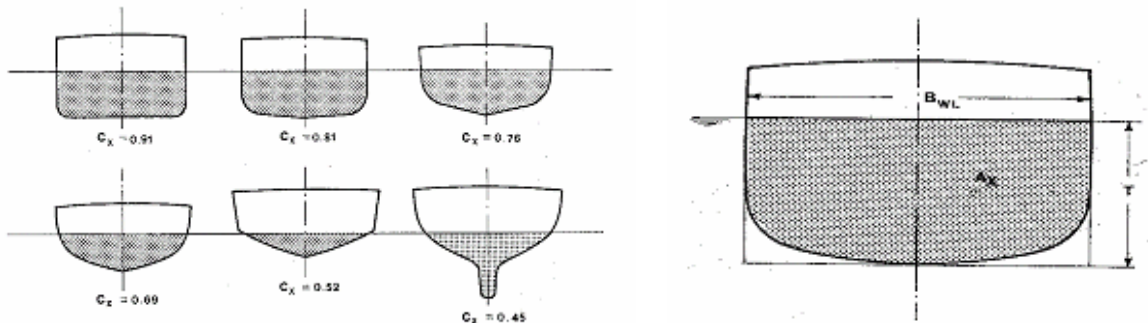
- L/B dà un'idea della snellezza della nave (4-10)
- B/T è in relazione con la stabilità e la forma trasversale della carena (1.8-4.5)

Rapporti di superficie

- coefficiente di finezza della sezione maestra:

$$C_x = \frac{A_x}{B_{wl} * T}$$

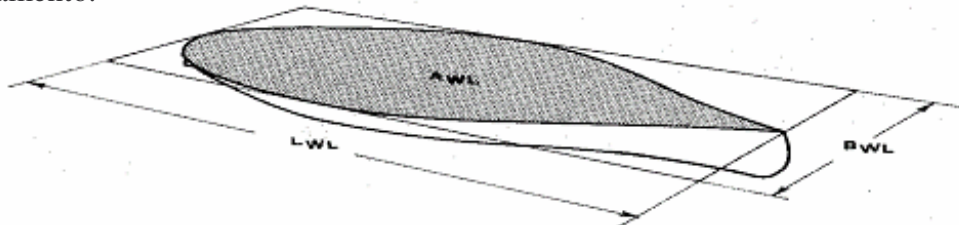
dove A_x , B_{wl} e T sono rispettivamente l'area immersa, la larghezza e l'immersione della sezione maestra.



- coefficiente di finezza al galleggiamento:

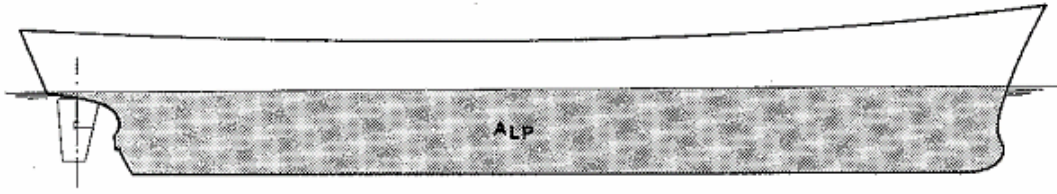
$$C_{wl} = \frac{A_{wl}}{B_{wl} * L_{wl}}$$

dove A_{wl} , B_{wl} e L_{wl} sono rispettivamente area, larghezza e lunghezza della figura di galleggiamento.



- coefficiente di deriva :

$$Clp = \frac{A_{LP}}{L_{wl} * T}$$

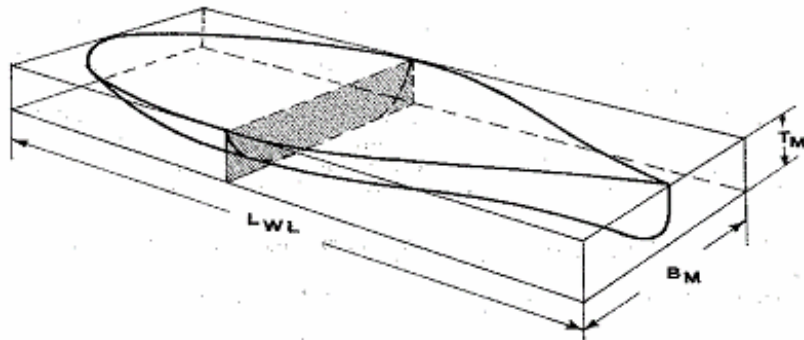


Rapporti di volume:

- coefficiente di finezza totale

$$C_B = \frac{\nabla}{L_{wl} B_{wl} T_{wl}}$$

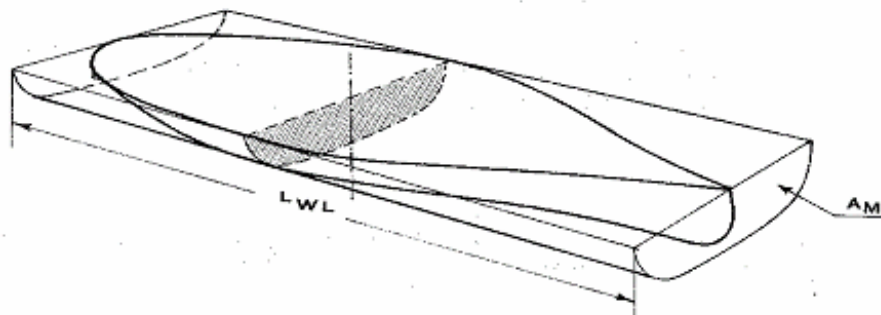
è il rapporto tra il volume della carena ed il parallelepipedo che ha come dimensioni lunghezza, larghezza ed immersione.



- coefficiente di finezza longitudinale o prismatico:

$$C_P = \frac{\nabla}{A_m L_{wl}}$$

è il rapporto tra il volume della carena e quello del solido avente come altezza la lunghezza al galleggiamento e come base la sezione maestra.



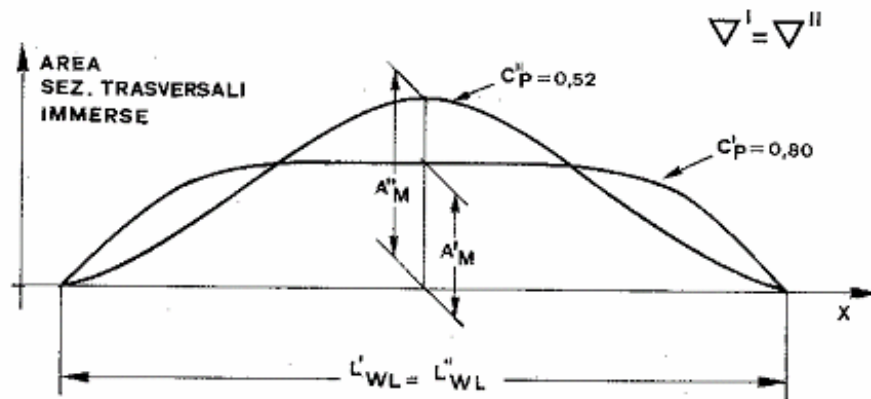
Il coe

X del volume di carena: a parità di volume e di lunghezza quella avente il C_P più piccolo presenterà un' area immersa della sezione maestra maggiore e quindi una

concentrazione di volume nella zona maestra, mentre la carena avente il C_p più grande sarà caratterizzata da volumi distribuiti più uniformemente su tutta la lunghezza.

Ciò può essere evidenziato graficamente riportando in un diagramma le aree delle sezioni immerse in funzione della loro posizione longitudinale.

Dall' eguaglianza dei volumi deriva che l' area sottesa alle due curve è la stessa.



Statica della nave

1.1.1 Equilibrio dei corpi

Dalla statica dei corpi rigidi sappiamo che condizione necessaria e sufficiente affinché un corpo sia in equilibrio è che:

- la sommatoria delle forze agenti sul corpo sia nulla
- la sommatoria dei momenti di dette forze rispetto ad un polo sia nulla.

Su un corpo totalmente o parzialmente immerso agiscono due sole forze:

- la forza peso del corpo detta **dislocamento**, pari alla somma di tutti i pesi interni, diretta verticalmente verso il basso ed applicata nel **centro di gravità (G)**.
- la spinta idrostatica diretta verticalmente verso l'alto e passante per il **centro di carena (B)**.

Tale spinta è nota, secondo il Principio di Archimede, conoscendo il volume immerso del corpo in esame, infatti :

" Un corpo totalmente o parzialmente immerso in un fluido in quiete riceve una spinta dal basso verso l'alto pari al peso del volume del liquido spostato".

$$S = \nabla \omega$$

dove:

∇ = Volume del liquido spostato

S = Spinta

ω = Peso specifico del liquido (1,026 t/m³ per acqua di mare a 15°C e condizioni standard di salinità)

Sono così individuate intensità, direzione e verso della spinta ricevuta dal corpo, ma non il CENTRO DI SPINTA che è il suo punto di applicazione. Essendo questo punto di difficile determinazione e di scarsa applicazione pratica, in Architettura navale si preferisce definire un altro punto, il CENTRO DI CARENA (baricentro del volume dell'opera viva) per il quale passa la retta d'azione della spinta e le cui coordinate sono facilmente individuabili.

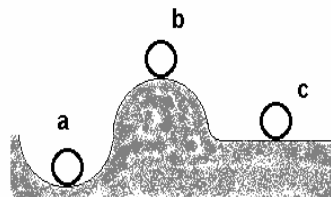
Affinché siano quindi verificate le condizioni di equilibrio prima indicate, occorre che peso e spinta:

- abbiano lo stesso valore (modulo) e verso opposto ($\Sigma F = 0$)
- giacciono sulla stessa retta d'azione ($\Sigma M = 0$)

Oltre alle condizioni generali di equilibrio, dovranno essere soddisfatte anche le condizioni di stabilità; sappiamo infatti che esistono tre condizioni di equilibrio per un corpo qualsiasi:

- EQUILIBRIO STABILE
- EQUILIBRIO INSTABILE
- EQUILIBRIO INDIFFERENTE

(a)
(b)
(c)



STABILE quando, perturbando il sistema in modo da spostare il corpo dalla posizione iniziale di una piccola quantità, la risultante delle forze applicate è tale da riportare il corpo nella configurazione originaria, al cessare della causa perturbatrice.

INSTABILE quando, spostando il corpo dalla posizione iniziale di una piccola quantità, al cessare della causa perturbatrice, le forze agenti tendono ad allontanare il sistema dalla configurazione iniziale di equilibrio in modo irreversibile.

INDIFFERENTE quando il sistema non risente della causa perturbante e qualsiasi posizione è di equilibrio.

Stabilite le condizioni iniziali di equilibrio, verificheremo le condizioni di stabilità nei due casi di corpo parzialmente immerso o galleggiante e di corpo totalmente immerso.

1.2.2. Corpi totalmente immersi

Se il peso (Δ) è uguale alla spinta (S) ed ambedue giacciono sulla stessa retta d'azione il corpo è in equilibrio.

Possono verificarsi tre condizioni di equilibrio a seconda della reciproca posizione del baricentro e del centro di carena.

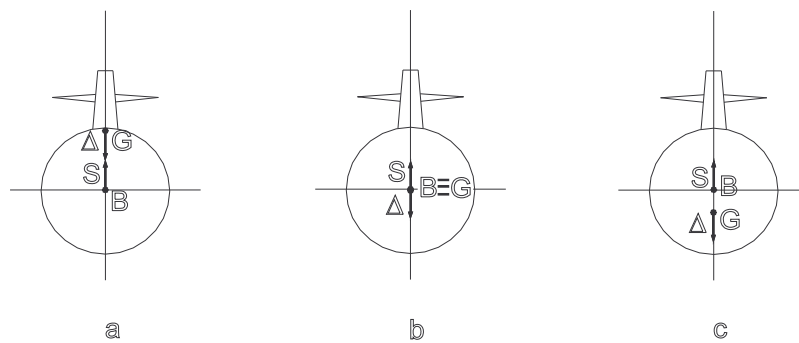


Figura 1.13

E' verificabile che se il corpo viene allontanato per una causa esterna dalla posizione iniziale di equilibrio e inclinato trasversalmente, la sola condizione di stabilità è che il baricentro sia sotto al centro di carena (c), infatti è l'unica situazione in cui, al cessare della causa perturbatrice, il corpo tenderà a ritornare nella condizione iniziale grazie alla nascita di un momento raddrizzante tra spinta e peso.

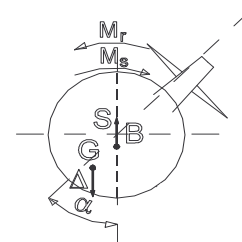


Figura 1.14

1.2.3. Corpi parzialmente immersi

La sostanziale differenza nei riguardi dell'equilibrio fra corpi totalmente immersi (ad esempio sommergibili in immersione) e corpi parzialmente immersi (ad esempio navi), è che nei primi la posizione del centro di carena non varia al variare dell'inclinazione del corpo, mentre nei secondi, la posizione del centro di carena, ossia del punto per il quale passa la linea di azione della spinta, varia al variare della posizione o dell'inclinazione del corpo stesso.

Il centro di gravità della nave, indicato nei disegni con la lettera G, è il baricentro dei pesi che costituiscono la nave stessa. In genere il centro di gravità di una nave si trova sul piano longitudinale di simmetria ad una altezza di poco maggiore della metà dell'altezza dello scafo e leggermente spostato a poppavia della mezzeria.

Come il centro di gravità, anche il centro di carena di una nave galleggiante in posizione diritta ed in equilibrio si trova sul piano longitudinale di simmetria, in quanto la spinta è simmetricamente distribuita sui due lati della carena.

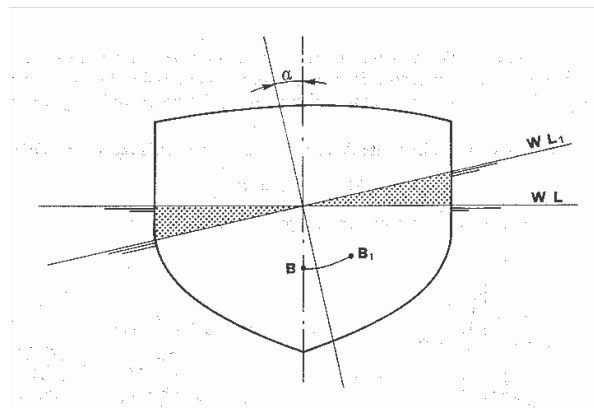


Figura 1.15

Poiché l'acqua spostata si trova tutta al di sotto del piano di galleggiamento, con le consuete forme di carena, il centro di carena B si trova poco sopra la metà dell'immersione, quindi in posizione sensibilmente inferiore al baricentro G.

La forza peso della nave è applicata nel centro di gravità mentre la spinta passa per il centro di carena. Queste due forze sono sempre dirette verticalmente ed hanno verso contrario. Affinché la nave sia in equilibrio, esse devono risultare uguali in modulo ed avere la stessa linea d'azione.

Incliniamo trasversalmente la nave, mediante una causa esterna, di un angolo generico α ; la sua nuova posizione sia quella indicata in figura 3.15 .

Dato che il displacement non è cambiato, la nuova carena, individuata dal piano WL₁, ha lo stesso volume della carena individuata dal piano WL, ma la sua forma è evidentemente diversa. Le due carene si dicono *ISOCARENE*, cioè carene di uguale volume. L'inclinazione avvenuta si chiama *ISOCARENICA*.

Data la forma delle due carene, mentre il centro di volume, ossia il centro di carena, della carena iniziale si trova in B, il centro della nuova carena dopo l'inclinazione si sarà spostato, verso dritta e verso l'alto nel punto B₁ e sarà uscito dal piano del disegno a causa delle diversità di forme di prora e di poppa.

Una nave in posizione diritta è in equilibrio stabile quando, spostata dalla sua posizione iniziale diritta, origina una coppia di forze che tendono a riportarla nella posizione iniziale.

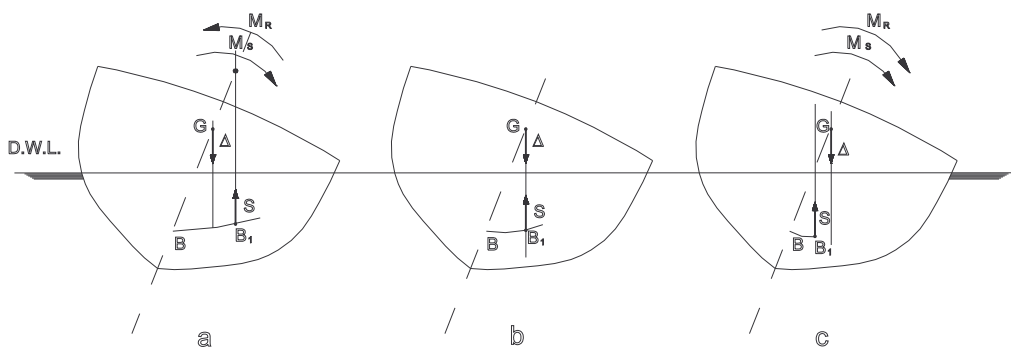


Figura 1.16

Se il centro di carena si è spostato in B_1 , la coppia di stabilità dovuta alle forze Δ ed S ha un effetto raddrizzante e quindi l'equilibrio della nave si dice *STABILE* (figura 3.16a), oppure può avere un effetto ulteriormente sbandante e quindi l'equilibrio si dice *INSTABILE* (figura 3.16c). Nel caso che peso e spinta abbiano la stessa linea d'azione siamo nel caso di equilibrio indifferente (figura 3.16b), caso comunque puramente teorico. Risulta evidente che, a parità di posizione di G , la stabilità dell'equilibrio di una nave e la reazione che essa oppone ad essere allontanata dalla sua posizione iniziale diritta, dipendono dallo spostamento laterale del centro di carena, determinato dal cambiamento di forma conseguente all'avvenuta inclinazione, cioè in definitiva dalla forma di carena.

1.2.4. Stabilità trasversale per piccole inclinazioni

Consideriamo ora una nave che sia in equilibrio stabile nella posizione iniziale diritta come devono essere normalmente tutte le navi, e diamole un'inclinazione isocarenica di un angolo α . Per le considerazioni già fatte, il centro di carena B si sposta in B_1 e la nuova linea d'azione della spinta $\overline{B_1M}$ incontrerà la linea d'azione della spinta iniziale \overline{BM} nel punto M . Il punto M si chiama *METACENTRO TRASVERSALE* relativo al volume di carena V . Se l'angolo di inclinazione è di piccola entità ($<10^\circ$) si può ammettere, con sufficiente approssimazione, che la curva descritta dal centro di carena, nel passare da B a B_1 , sia un arco di circonferenza e che tutte le successive linee d'azione delle spinte relative ai centri di carena da B a B_1 passino per il punto M che rappresenta quindi il centro di curvatura della curva descritta da B .

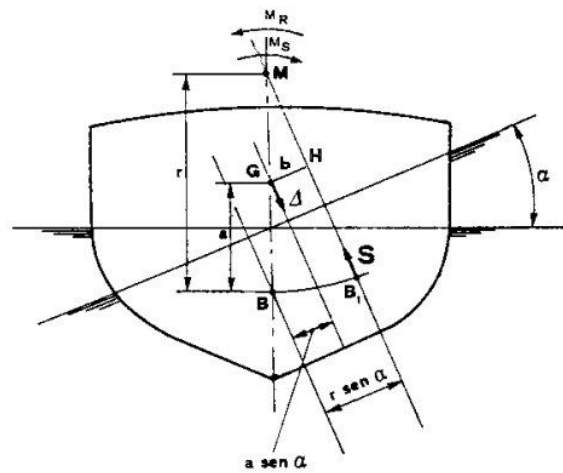


Figura 1.17

Con tale definizione risulta evidente che, affinché la nave in posizione diritta sia in equilibrio stabile, è necessario che M si trovi al disopra di G . Infatti in tale caso la coppia che si determinerà per un piccolo angolo di inclinazione della nave sarà positiva e tenderà a riportare la nave nella sua posizione iniziale diritta. Se chiamiamo " r " il *RAGGIO METACENTRICO TRASVERSALE* \overline{BM} ed " a " la misura del segmento \overline{BG} , cioè la sovrelevazione del baricentro sul centro di carena a nave diritta, si definisce *ALTEZZA METACENTRICA TRASVERSALE INIZIALE* il segmento $(r-a)$, che in definitiva rappresenta la distanza tra il metacentro ed il centro di gravità. Il momento della coppia di stabilità trasversale, considerando il triangolo rettangolo MGH vale:

$$M_\alpha = \Delta \cdot b = \Delta \cdot \overline{GH} = \Delta \cdot \overline{GM} \sin \alpha$$

cioè:

$$M_\alpha = \Delta(r - a) \sin \alpha$$

Il valore di $(r-a)$ si chiama anche *INDICE DI STABILITA' INIZIALE* e dà un'idea della capacità della nave a reagire a cause sbandanti esterne nell'intorno della sua posizione diritta.

Un valore elevato di $(r-a)$ sarebbe perciò consigliabile per la stabilità, soprattutto per le navi militari. D'altra parte, un valore troppo elevato di $(r-a)$, se va bene in mare tranquillo, rende la nave eccessivamente "dura" in acqua agitata, tendendo la nave a mantenere i ponti paralleli al profilo dell'onda (in gergo marinaro "cavalca l'onda") causando continui movimenti ed accelerazioni trasversali e longitudinali. Tali accelerazioni, oltre che essere dannose per il "benessere" e quindi l'operatività dell'equipaggio, possono ostacolare il corretto funzionamento delle apparecchiature installate a bordo. Nel caso che il valore $(r-a)$ sia basso, sarà meno stabile, ma si comporterà meglio in mare agitato (in gergo "taglia l'onda") e si dirà "nave cedevole".

Pertanto i valori adottati di $(r-a)$ per i vari tipi di navi sono i risultati di un compromesso tra le varie necessità.

I valori medi dell'altezza metacentrica possono essere, orientativamente:

- Portaerei 2.5...3.0 m
- Incrociatori 1.0...1.6 m
- Fregate 0.7...1.5 m
- Sommergibili 0.3...0.5 m (in superficie)

Una relazione approssimata per calcolare il raggio metacentrico trasversale è la seguente:

$$r = \frac{I_x}{V}$$

dove: I_x è il momento d'inerzia della figura di galleggiamento rispetto all'asse baricentrico longitudinale xx . Il momento d'inerzia della figura rispetto all'asse baricentrico x è dato dalla sommatoria dei prodotti delle aree elementari in cui si può scomporre la figura, per il quadrato della distanza dei baricentri di queste areole dall'asse x ;

per cui:

$$I_x = \sum_{i=1}^n a_i y_i^2$$

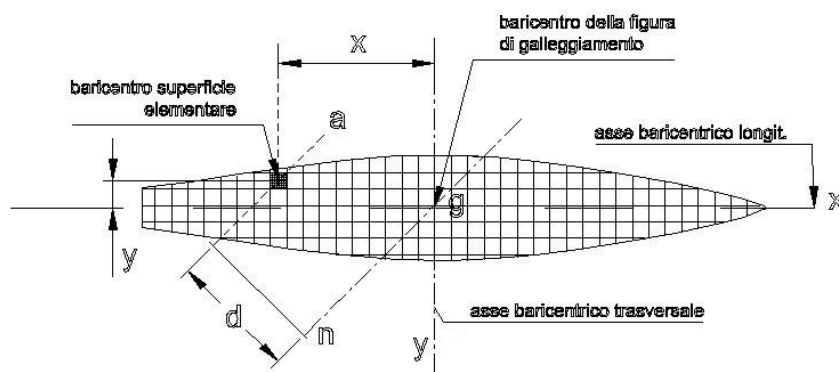


Figura 1.18

1.2.5. Stabilità trasversale per inclinazioni superiori a 10°

Per angoli di inclinazione $\alpha > 10^\circ$ le considerazioni precedentemente fatte non sono più valide. Infatti la traiettoria dei centri isocarenici di carena non è più assimilabile ad una circonferenza di centro M, ma ad una serie di archi di circonferenza di raggio variabile, rispettivamente di centri M_1, M_2, M_3, \dots

Si può quindi vedere che mentre il centro di carena descrive la *traiettoria dei centri isocarenici di carena* (B_0, B_1, B_2, \dots) i relativi metacentri descrivono una traiettoria nota come *evolva metacentrica* (insieme dei centri dei raggi metacentrici istantanei).

Il momento della coppia di stabilità, analogamente a quanto già visto per piccole inclinazioni, vale:

$$M_\alpha = \Delta \cdot b = \Delta \cdot \overline{GH}$$

Volendo esprimere tale braccio \overline{GH} in funzione di quantità note, conviene fare riferimento ai punti P_1, P_2, P_3, \dots , intersezione della linea d'azione della spinta iniziale (verticale della nave) con linee d'azione delle successive spinte relative ai centri di carena B_0, B_1, B_2, \dots tali punti vengono chiamati *prometacentri* o *falsi metacentri*.

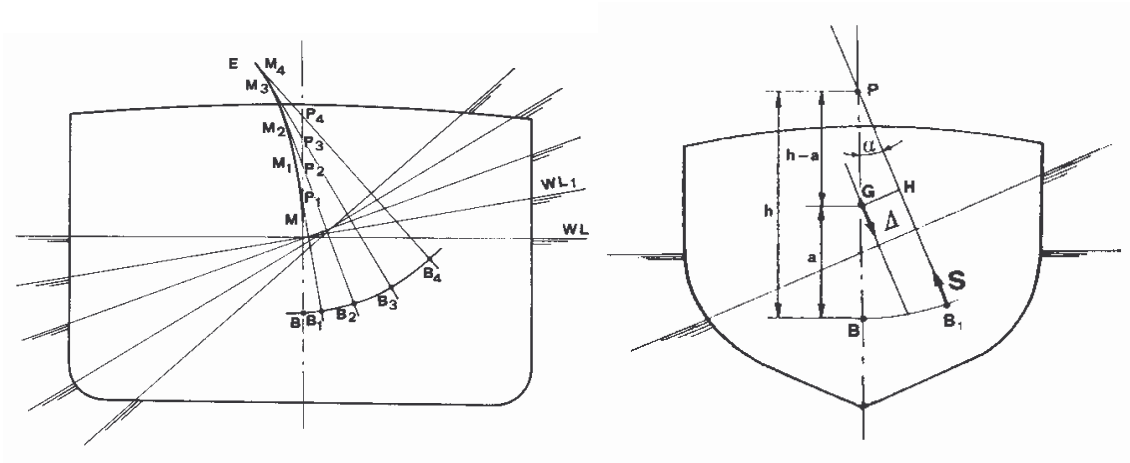


Figura 1.19

La distanza del generico prometacento P_i dal centro di carena iniziale B_0 prende il nome di *altezza prometacentrica* "h".

Si può pertanto scrivere:

$$M_\alpha = \Delta \cdot \overline{GH} = \Delta \cdot \overline{GP} \sin \alpha = \Delta (h - a) \sin \alpha$$

Per facilitare lo studio della stabilità di una nave si ricorre ai diagrammi di stabilità statica.

1.2.6. Diagramma di stabilità statica trasversale

Portando su due assi ortogonali, in ascissa i valori degli angoli di inclinazione α (in gradi), ed in ordinata i valori dei momenti M_α corrispondenti (in tonn. m.), ricavati mediante l'espressione sopra scritta, si ottiene un diagramma chiamato diagramma di stabilità statica trasversale che fornisce i valori dei momenti di coppia di stabilità al variare dell'angolo di inclinazione trasversale α della nave.

Come si vede nella figura, che rappresenta l'andamento di un generico diagramma di stabilità in funzione dell'angolo di inclinazione, il valore del momento varia da zero per $\alpha=0$ ad un valore massimo e poi decresce sino ad annullarsi nuovamente in corrispondenza di $\alpha=\alpha_c$. Tale angolo α_c è detto angolo di **capovolgimento statico**.

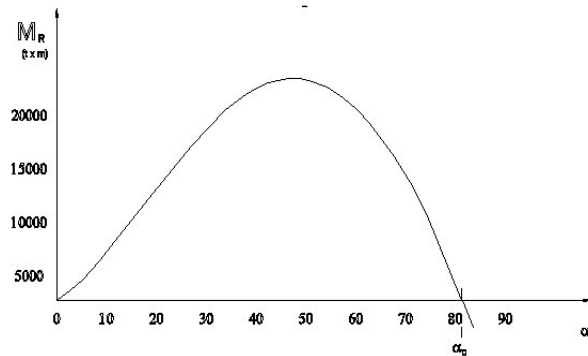


Figura 1.20

Le posizioni $\alpha=0$ e $\alpha=\alpha_c$ sono entrambe posizioni di equilibrio, ma, mentre la prima è una posizione di equilibrio stabile

poiché la nave ha tendenza, se inclinata, a ritornare in questa posizione (momento positivo), la seconda è una posizione di equilibrio instabile, in quanto, inclinando la nave verso angoli maggiori, la coppia di stabilità risulta negativa e quindi tende ad inclinare ulteriormente la nave, fino al suo capovolgimento.

1.2.7. Stabilità di forma e di peso

Il valore del raggio metacentrico trasversale dipende dalla forma della carena, mentre il valore della sovrerelevazione "a" di G su B, dipende dalla distribuzione dei pesi sulla nave.

Può essere interessante mettere in evidenza i rispettivi contributi della forma e dei pesi nel momento di stabilità, suddividendolo rispettivamente la **componente di stabilità di forma** e la **componente di stabilità di peso**:

$$M_\alpha = \Delta(r - a)\text{sen}\alpha = \Delta r \text{sen}\alpha - \Delta a \text{sen}\alpha \quad (\text{forma} - \text{peso})$$

La forma e l'estensione del diagramma di stabilità statica trasversale, sono (a parità di altre condizioni) influenzate dai seguenti parametri:

- altezza delle murate (stabilità di forma);
- forma delle murate (stabilità di forma);
- posizione del centro di gravità della nave G (stabilità di peso);
- larghezza della nave (stabilità di forma).

Tale influenza è evidente valutando i diagrammi di stabilità che si riportano nella figura seguente.

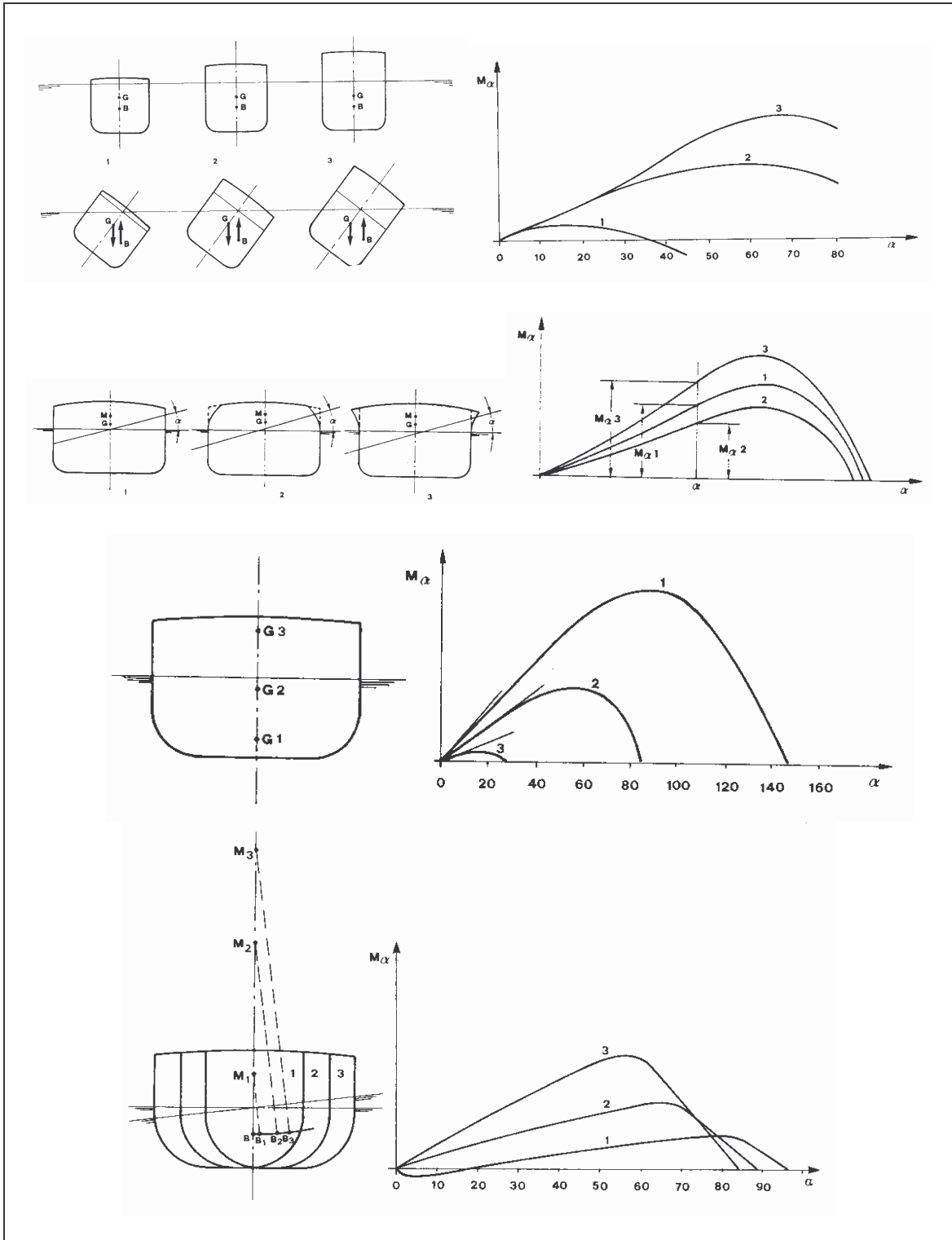


Figura 1.21

1.2.8. Determinazione del centro di gravità di una nave – Prova di stabilità

Abbiamo visto che il valore di $(r-a)$ dipende sia da elementi geometrici (r) che meccanici (a).

Mentre la determinazione di quelli geometrici, mediante conoscenza del piano di costruzione, non pone alcun problema, esistono invece possibili incertezze per quanto concerne l'esatta posizione del baricentro.

Tale posizione viene stimata in sede progettuale per le diverse condizioni di carico dall'analisi dei pesi costituenti la nave e la loro posizione; ma occorre condurre ulteriori prove pratiche durante la vita della nave.

La prova ordinariamente si esegue:

- dopo che la nave è stata varata;
- dopo che la nave è stata completamente allestita e portata alla voluta condizione di carico (per le dovute verifiche contrattuali);
- dopo che la nave ha subito lavori di trasformazione o modifica (per apportare eventuali aggiornamenti o variazioni alla stabilità);
- periodicamente durante il suo servizio.

La prova si effettua portando la nave sullo specchio d'acqua di un bacino, in assenza di vento, in posizione perfettamente diritta eliminando eventuali assetti longitudinali ed assicurandosi che gli ormeggi siano in bando.

Prima di effettuare la prova occorre controllare che non vi siano a bordo carichi scorrevoli o specchi liquidi liberi e che a bordo sia rimasto solo il personale interessato alla prova.

Si sistemano sul ponte di coperta nella zona più larga della nave due ferroguidi su cui si fa poggiare un carrello, all'uopo imbarcato, portante un peso di zavorra, libero di scorrere da murata a murata.

Si dispongono anche uno o più fili a piombo per misurare le inclinazioni trasversali che nascono dallo spostamento trasversale del carrello di prova.

Il peso sul carrello deve essere di entità trascurabile rispetto al dislocamento della nave e tale da provocare, quando spostato a murata, delle piccole inclinazioni trasversali.

Posto il carrello inizialmente sul piano di simmetria, si sposta successivamente a murata.

Il peso p del carrello una volta spostato trasversalmente creerà una coppia sbandante equilibrata dalla coppia di stabilità trasversale e la nave assumerà una inclinazione α ricavabile dall'eguaglianza dei momenti:

$$\Delta(h-a)\text{sen}\alpha = p y \cos\alpha$$

dove x è lo spostamento trasversale del peso p (figura 3.22).

Il peso p viene opportunamente scelto in modo che l'inclinazione finale α sia relativamente piccola e quindi si possa applicare la semplificazione del metodo metacentrico:

$$\Delta(r-a)\text{sen}\alpha = p y \cos\alpha \quad \text{ovvero} \quad r-a = \frac{p y}{\Delta \text{tg}\alpha}$$

da cui, essendo tutti i termini noti, si può ricavare a :

$$a = r - \frac{py}{\Delta \operatorname{tg} \alpha}$$

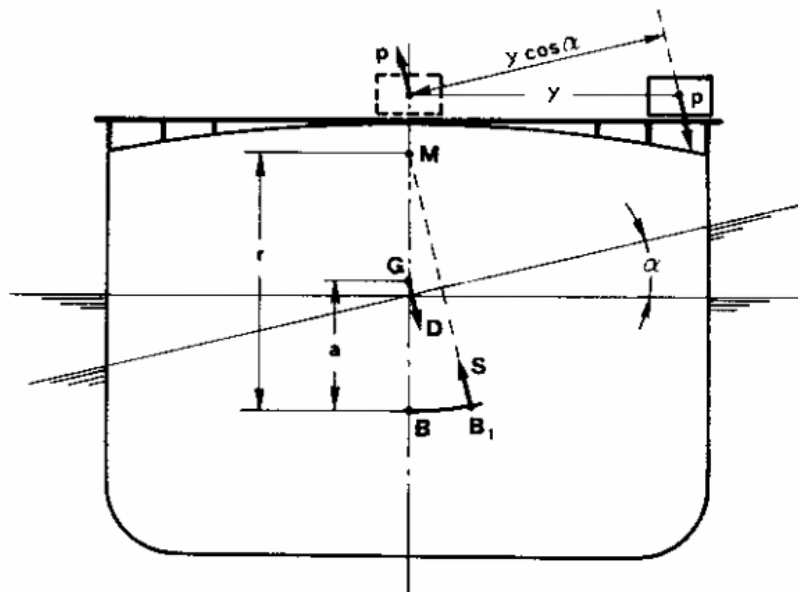


Figura 1.22

1.2.9. Mezzi per aumentare il valore dell'altezza metacentrica

Può accadere che, eseguita la prova di stabilità, si trovi un valore dell'altezza metacentrica ($r-a$) diverso da quello previsto in sede di progetto.

I metodi correttivi da adottare sono due ed agiscono sulla stabilità di peso o di forma:

- abbassare pesi verso il basso, qualora possibile;
- zavorrare la nave imbarcando in sentina pani di ghisa o blocchi di cemento con conseguente aumento del dislocamento e diminuzione della velocità contrattuale;
- aumentare il momento d'inerzia minimo della figura di galleggiamento agendo cioè sul rapporto $r = I_x/V$, ovvero allargando la figura stessa con l'applicazione nella zona di galleggiamento di controbordi o bottazzi.

1.2.10. Stabilità statica longitudinale

Lo studio della stabilità statica longitudinale non influenza direttamente la sicurezza della nave, in quanto la nave reagisce alle inclinazioni longitudinali con altissimi valori della coppia di stabilità come successivamente dimostrato; lo studio ha invece una grande importanza per la verifica dell'assetto della nave e le sue variazioni nelle diverse condizioni di carico. Lo studio degli assetti, cioè delle differenze di immersione tra prora e poppa, è di grande importanza ai fini dell'analisi della resistenza al moto e del comportamento della nave in moto ondosso.

La coppia di stabilità statica longitudinale viene determinata con ragionamenti del tutto analoghi a quelli effettuati per la coppia trasversale. Bisogna però considerare che le inclinazioni longitudinali, a causa della grande inerzia che la nave oppone ai movimenti di beccheggio, sono dell'ordine di pochi gradi, rientrando sempre nel campo di applicazione del metodo metacentrico. Il raggio metacentrico longitudinale è molto più alto del raggio metacentrico trasversale essendo $R = J_y/V$ perché $J_y \gg J_x$ si avrà $R \gg r$.

Il momento di stabilità longitudinale varrà (figura 3.23):

$$M_\beta = D \cdot \overline{GH} = D \cdot \overline{GM} \sin \beta$$

sostituendo:

$$M_\beta = D(R - a) \sin \beta$$

e trascurando a essendo molto più piccolo di R :

$$M_\beta \cong DR \sin \beta$$

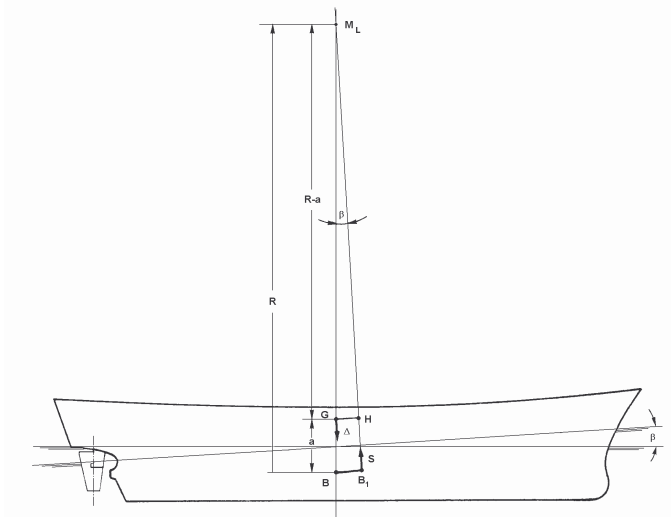


Figura 1.23

Cause di variazione della stabilità della nave

Le cause principali di variazione della stabilità sono:

- Spostamento dei pesi
- Sospensione di un peso
- Carichi scorrevoli
- Materiali caricati alla rinfusa
- Carichi liquidi
- Imbarco e sbarco di pesi
- Allagamento per falla
- Incaglio
- Immissione della nave in bacino
- Accostata ed evoluzione
- Azione del vento al traverso combinata con il rollio

Di queste esamineremo solo le più significative.

1.3.1 Spostamento verticale

Quando un peso p viene innalzato verticalmente della quantità z , il centro di gravità della nave si sposta verticalmente da G a G_1 della quantità:

$$\overline{GG_1} = \frac{pz}{\Delta} \quad (1)$$

infatti indicando con Z_G e con Z_{G_1} le posizioni del baricentro rispetto alla linea di costruzione e con z_p e $z_{p'}$ le posizioni iniziali e finali del peso p si avrà dal teorema dei momenti statici:

$$\Delta Z_{G_1} = \Delta Z_G + pz_{p'} - pz_p$$

da cui essendo $z = z_{p'} - z_p$ e $\overline{GG_1} = Z_{G_1} - Z_G$ si ottiene la relazione (1).

Ne consegue che l'altezza metacentrica risulterà variata e varrà:

$$(r-a)' = (r-a + pz/\Delta)$$

Tale grandezza ovviamente risulterà accresciuta o diminuita a seconda che lo spostamento sia avvenuto verso il basso o verso l'alto. In particolare si nota come uno spostamento verso l'alto sia penalizzante ai fini della stabilità riducendo il valore $(r-a)$ della quantità pz/Δ .

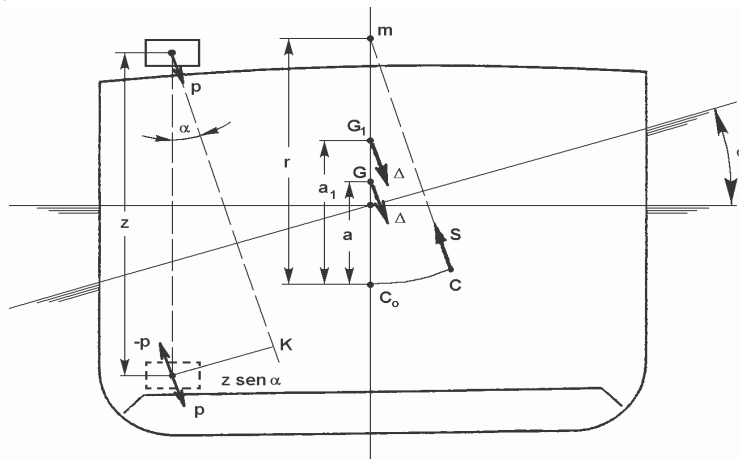


Figura 1.24

1.3.2 Nave ingavonata

Se l'innalzamento di peso è tale da portare il baricentro al di sopra del metacentro trasversale iniziale M , la nave non risulterà essere in equilibrio stabile nella posizione diritta in quanto $r-a < 0$.

Bisognerà quindi analizzare il comportamento della nave nell'intorno della posizione diritta; valutando l'andamento dell'evolva metacentrica.

Se l'evoluta è a rami inizialmente ascendenti, la nave si inclinerà e troverà un angolo di equilibrio stabile, detto ANGOLO DI INGAVONAMENTO, ottenuto portando dal baricentro G' la tangente all'evoluta stessa.

La nave ingavonata si inclinerà quindi non per eccentricità del carico ma per instabilità iniziale. Per raddrizzarla occorre spostare dei carichi verso il basso in modo da riportare il baricentro G al di sotto del metacentro trasversale iniziale M . In questo caso spostando trasversalmente del carico sul lato opposto a quello di inclinazione, come l'intuito potrebbe addurci, otterremo come risultato quello di portare la nave

inizialmente in posizione diritta ma, non appena raggiunta tale condizione, la nave si inclinerà dal lato opposto con una inclinazione maggiore della precedente.

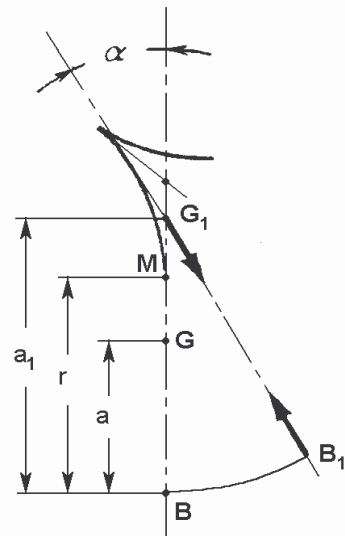


Figura 1.25

1.3.3 Spostamento trasversale

Quando il peso p viene spostato trasversalmente della quantità y viene ad esercitarsi sulla nave l'azione della coppia sbandante pari a :

$$M_{\alpha} = p y \cos \alpha$$

che dà luogo all'inclinazione trasversale α .

Tale inclinazione sarà facilmente individuabile dall'equilibrio dei momenti:

$$p y \cos \alpha = \Delta (h - a) \sin \alpha$$

da cui:

$$\tan \alpha = \frac{p y}{\Delta (h - a)}$$

Se l'angolo di inclinazione non supera i 10° si potrà ricorrere alla semplificazione del metodo metacentrico sostituendo h con r .

Per cui:

$$\tan \alpha = \frac{p y}{\Delta (r - a)}$$

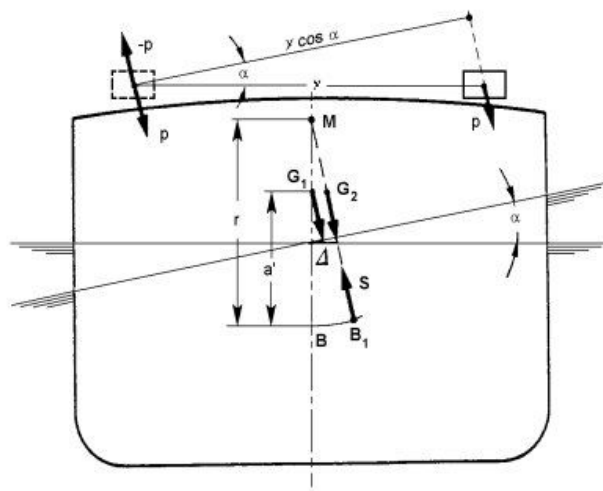


Figura 1.26

1.3.4 Spostamento longitudinale

Quando un peso p , facente parte del dislocamento Δ della nave, viene spostato orizzontalmente in senso longitudinale per un tratto x , si viene ad esercitare sulla nave l'azione di una coppia sbandante pari a:

$$M_{\beta} = px \cos \beta$$

dove β rappresenta l'angolo per il quale il momento di stabilità longitudinale bilancia il momento sbandante.

$$\Delta(R - a) \sin \beta = px \cos \beta$$

da cui:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{px}{\Delta R}$$

Generalmente uno spostamento di peso in senso longitudinale non compromette la stabilità longitudinale, ma risulta essere importante per le variazioni di assetto che provocano

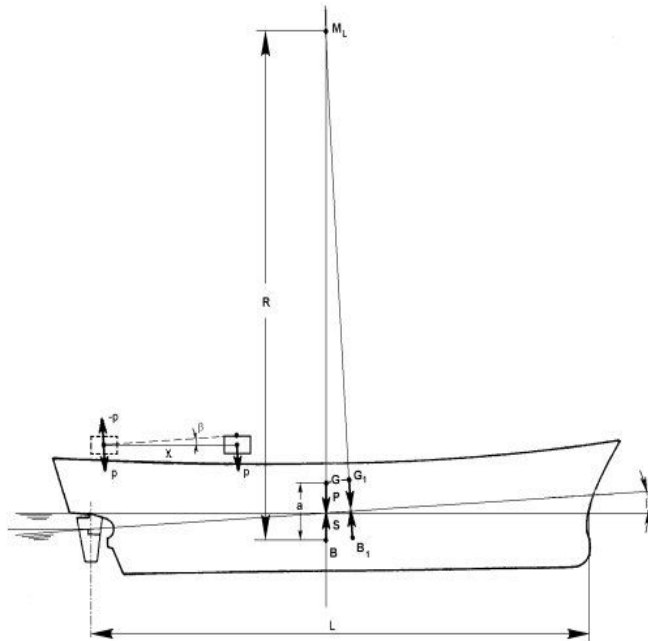


Figura 1.27

cambiamenti nei riguardi della resistenza al moto e della tenuta al mare in generale.

1.3.5 Spostamento generico di un peso

Se un peso facente parte del dislocamento Δ viene spostato dal punto A al punto D, il dislocamento non varia, varia invece la posizione del baricentro della nave e di conseguenza l'assetto trasversale, longitudinale e gli attributi di stabilità. Osservando che a spostamento avvenuto le condizioni di stabilità ed assetto sono le stesse qualunque sia il percorso effettuato da p per passare da A a D, si può pensare che lo spostamento \overline{AD} avvenga parallelamente ai tre assi principali xyz, ovvero:

1. spostamento verticale \overline{AB} (punto avente la stessa altezza di D) con conseguente variazione delle caratteristiche di stabilità trasversale come verificato per uno spostamento verticale di peso;
2. spostamento trasversale \overline{BC} (punto avente la stessa ascissa di D) con la variazione delle caratteristiche di stabilità trasversale studiate per lo spostamento trasversale;
3. spostamento longitudinale \overline{CD} , con la relativa variazione dell'assetto

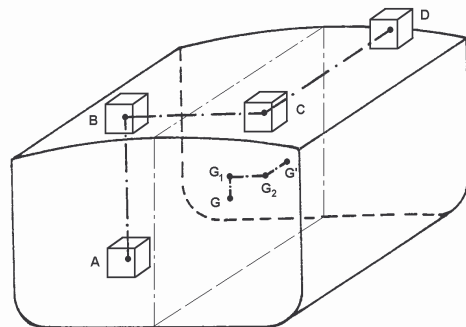


Figura 1.28

longitudinale.

Il risultato finale sarà dato dalla somma dei tre effetti.

1.3.6 Carichi sospesi

Un peso p , sospeso ad un punto sopraelevato e libero di oscillare, influenza le caratteristiche di stabilità della nave. Infatti per qualunque inclinazione la retta d'azione di tale peso passa proprio per il punto di sospensione e , ai fini della stabilità, è come se il carico fosse applicato proprio in tale punto.

Si ricadrà dunque nel caso di spostamento verticale di peso. Si può pensare ad una causa inclinante per cui:

$$M = pt \sin \alpha$$

dove $t \sin \alpha$ è il braccio della coppia fittizia $p, -p$, creata dalla sospensione del carico e t è l'altezza del punto di sospensione.

Il baricentro risulterà innalzato dunque della quantità pt/Δ che è la riduzione dell'altezza metacentrica (vedi spostamento verticale del peso).

Da quanto precede risulta chiaro come sia importante, nell'elevare pesi di una certa entità, vincolarli con paranchi di ritenuta, venti ed altri mezzi che ne riducano le oscillazioni; questo sia per contenere le riduzioni di stabilità trasversale quando ci si trovi in condizioni critiche, sia perché il carico non urti danneggiandosi o provocando danni a persone o strutture.

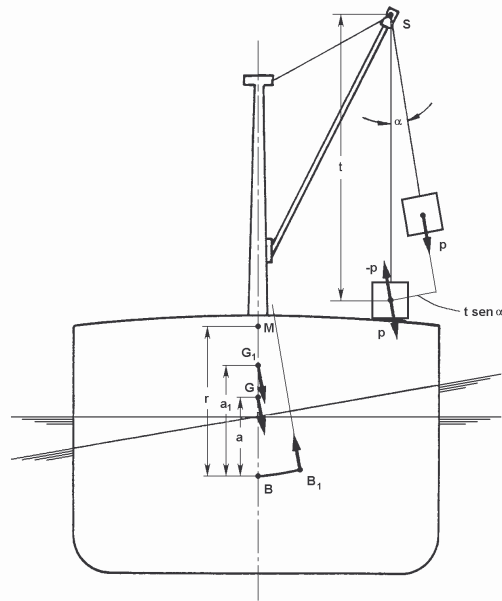


Figura 1.29

1.3.7 Carichi scorrevoli

Se a bordo di una nave, inizialmente dritta e stabile, si trova un carico non rizzato e la nave si inclina per una causa qualunque, possono nascere notevoli problemi per quanto riguarda la stabilità. Infatti quando l'angolo di inclinazione trasversale sarà pari all'angolo di attrito di primo distacco, il corpo comincerà a strisciare o rotolare andando a fermarsi contro un eventuale ostacolo che può essere rappresentato da una paratia. Se tale angolo non viene superato il carico si comporta come se fosse rigidamente vincolato alla nave.

Si ricade dunque nel caso di spostamento trasversale di peso in cui il momento di stabilità dovrà equilibrare il momento sbandante:

$$M_{\alpha} = pycos \alpha$$

e ciò accadrà per un certo valore α di sbandamento della nave (vedi spostamento trasversale di pesi).

Tale spostamento trasversale, essendo improvviso ed incontrollato, può essere pericoloso per l'equipaggio, le strutture e le apparecchiature; nel caso di navi che trasportano carichi pesanti come lamiere o tondini d'acciaio, gli spostamenti trasversali del carico possono essere tali da portare la nave a situazioni critiche di stabilità e sicurezza, soprattutto in condizioni di mare molto agitato.

1.3.8 Carichi alla rinfusa

La presenza a bordo di carichi alla rinfusa (cereali, granaglie, carbone, minerali) provoca dei problemi simili a quelli visti per i carichi scorrevoli).

Si definisce angolo di naturale declivio quell'angolo in cui il materiale si va a posizionare naturalmente quando viene rovesciato su un piano.

Inclinazioni trasversali piccole, minori dell'angolo di naturale declivio del carico, non provocano alcuna variazione della stabilità in quanto il carico si comporta come se fosse rigidamente collegato allo scafo; appena si supera questo angolo, il carico comincia a scorrere e si sposta senza tornare nella posizione originaria anche se la nave torna nella posizione diritta. Tale fenomeno può presentarsi, in maniera pericolosa, sia pure per angoli inferiori a quello di naturale declivio, per le azioni dinamiche dovute alle accelerazioni provocate dal mare molto agitato. Tale situazione è riconducibile ad uno spostamento trasversale di peso.

Per ovviare e diminuire i pericoli di spostamento del carico alla rinfusa le navi adibite a tale trasporto vengono costruite con stive di forma opportuna, dette "AUTOSTIVANTI" in modo da limitare la possibilità e l'entità dello spostamento.

Nelle piccole navi, le cui stive non sono progettate come sopra descritto, occorre, se possibile, caricare "a tappo" oppure, inserire durante il caricamento paratie longitudinali mobili in legno o lamiera (a cascio).

Nel caso di granaglie è opportuno fare una "saccatura" sulla superficie libera.

1.3.9 Carichi liquidi

Tra i carichi che costituiscono il dislocamento Δ di una nave vi sono sempre dei carichi liquidi che comportano problemi di stabilità.

Se il liquido riempie completamente un recipiente o una cassa chiusa si comporta come un carico solido rigidamente collegato allo scafo. Se invece il carico liquido (di peso p e peso specifico Ω) non riempie completamente il compartimento, allora, a causa della sua fluidità, inizia ad agitarsi con l'inclinarsi della nave, tendendo a portare il pelo libero parallelo al galleggiamento istantaneo, per cui il suo baricentro (che coincide sempre con il centro del volume) si sposterà rispetto alle pareti del recipiente e quindi allo scafo. Il centro di volume istantaneo descriverà una curva dando luogo ad uno spostamento del centro di gravità della nave, variabile con l'inclinazione.

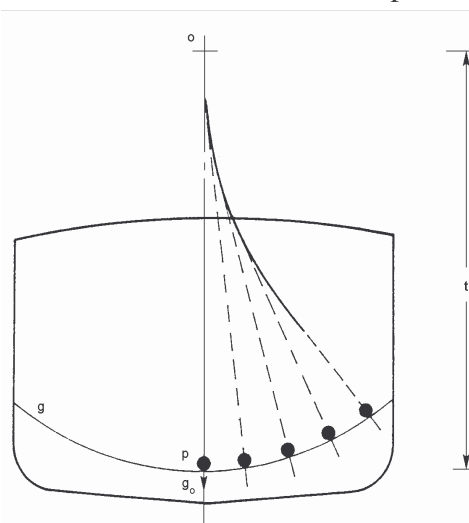


Figura 1.30

L'azione della liquidità del carico sulla stabilità trasversale della nave, è riconducibile pertanto a quella di un peso p libero di scorrere secondo la curva g in figura 3.30 e a sua volta riconducibile agli effetti di un carico sospeso nel punto O .

Sotto queste ipotesi, l'altezza metacentrica, per effetto dello specchio libero, anziché essere $(r-a)$ sarà: $(r-a-pt/\Delta)$, dove t è il raggio di curvatura della curva g nel punto g_0 , baricentro del liquido a nave dritta e punto di sospensione fittizio.

1.3.10 Accostata ed evoluzione

La diminuzione di stabilità trasversale dovuta all'azione del timone può essere particolarmente sensibile specie per le navi militari a causa delle elevate qualità evolutive richieste.

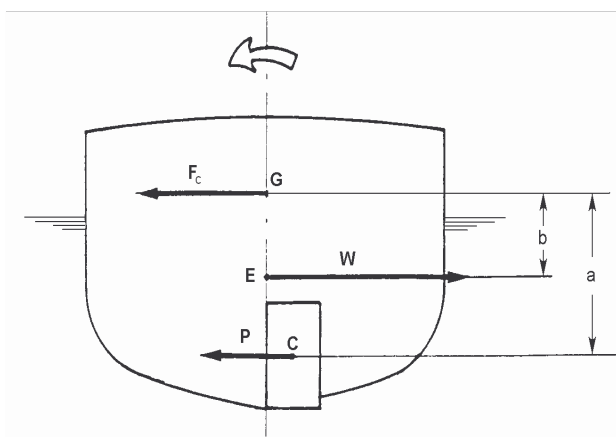


Figura 1.31

Durante la fase di evoluzione a seguito della impostazione di un certo angolo di barra sono presenti le seguenti forze.

1. la componente della forza centrifuga applicata nel centro di gravità G ;
2. la risultante delle azioni idrodinamiche applicate nel centro di deriva E (baricentro della figura di deriva);
3. la portanza del timone applicata nel centro di pressione C .

La risultante dei momenti creati da queste forze rispetto ad un polo di riferimento, viene equilibrata dalla coppia di stabilità della nave. Dall'equilibrio dei momenti si deduce l'angolo di equilibrio statico secondo cui si dispone la nave in accostata, infatti, se calcoliamo i momenti rispetto all'asse baricentrico otterremo:

$$M_1 = W \cdot b \quad \text{e} \quad M_2 = P \cdot a$$

Essendo $M_1 > M_2$ la nave si sbanderà verso l'esterno durante tutta la fase di evoluzione. L'angolo di sbandamento dipenderà dall'angolo di barra e dalla velocità della nave.

N.B. Si definisce fase di evoluzione quel periodo in cui a causa della variazione dell'angolo di barra la nave cambia di direzione e raggiunge un nuovo angolo costante di girazione.

1.3.11 Imbarco e sbarco di pesi

L'imbarco di un peso in un punto qualunque della nave si può sempre considerare come un'operazione suddivisa in due tempi:

1. imbarco del peso in un punto della nave tale che la nave si immerga parallelamente al galleggiamento che aveva prima dell'imbarco;
2. spostamento del peso dalla posizione fittizia di cui al punto precedente fino a quella finale effettiva.

Come conseguenza della prima fase la nave aumenterà la sua immersione media; come conseguenza della seconda varieranno, in generale, l'inclinazione trasversale, l'assetto longitudinale e la stabilità.

Affinché accada che, imbarcando o sbarcando un peso, la nave si immerga o emerga parallelamente al precedente galleggiamento, cioè senza variazioni di assetto né trasversale né longitudinale, occorre che il baricentro del peso venga imbarcato o sbarcato sulla stessa verticale passante per il centro di spinta della carena di sovraimmersione. In tal modo infatti la forza p del peso imbarcato o sbarcato verrà perfettamente equilibrata dalla forza spinta dovuta alla zona di carena che si aggiunge o si sottrae alla precedente per effetto della variazione di peso conseguente all'imbarco o allo sbarco.

Se il peso p è piccolo e quindi è piccola la differenza di immersione conseguente, il calcolo viene notevolmente semplificato potendosi ammettere che la verticale che passa per il baricentro della carena di sovraimmersione passi anche per il baricentro della figura di galleggiamento. In quest'ultimo caso, essendo:

w = peso specifico dell'acqua di mare

A = area della figura di galleggiamento

p = peso imbarcato o sbarcato

v = volume della carena di sovraimmersione

ε = altezza della carena di sovraimmersione

si può scrivere:

$$p = v \cdot w = (A\varepsilon)w$$

ed anche:

$$\varepsilon = \frac{p}{wA}$$

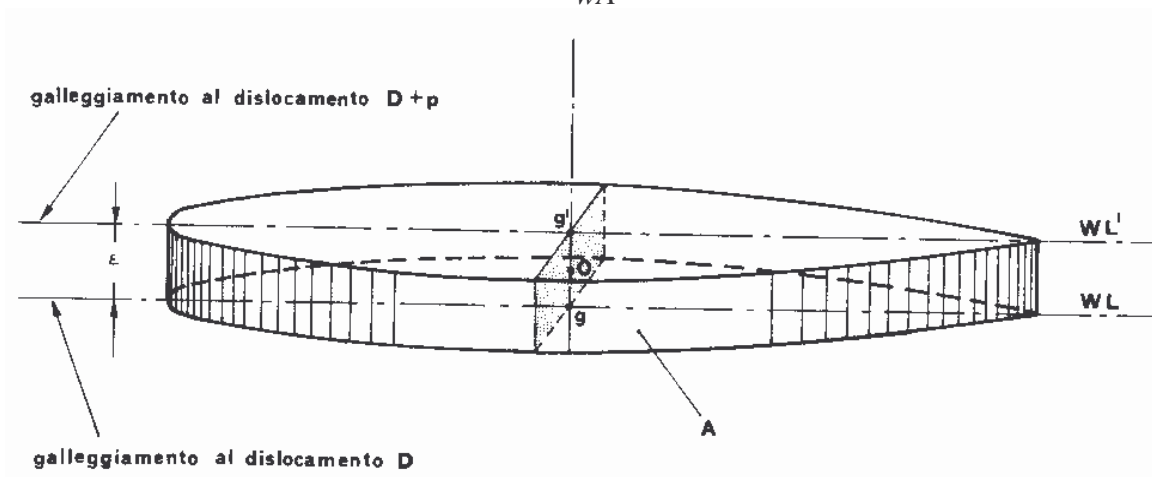


Figura 1.32

Possiamo determinare le variazioni di assetto di prora e di poppa conseguenti ad un imbarco o ad uno sbarco di un peso piccolo in un punto qualunque della nave, come sommatoria delle immersioni di prora e di poppa iniziali, della sovraimmersione/emersione ε e delle variazioni di assetto dovute allo spostamento fittizio del peso dal baricentro della figura di galleggiamento al reale punto di imbarco/sbarco.

Per quanto riguarda la stabilità trasversale possiamo dire che:

- L'imbarco di un peso in basso (sotto il galleggiamento) aumenta la stabilità.
- L'imbarco di un peso in alto (sopra il galleggiamento) diminuisce la stabilità.
- Lo sbarco di un peso in basso (sotto il galleggiamento) diminuisce la stabilità.
- Lo sbarco di un peso in alto (sopra il galleggiamento) aumenta la stabilità.

1.3.12 Falla ed incaglio

La falla è una via d'acqua nell'opera viva della nave che comporta l'allagamento di parte di essa con sensibili alterazioni della stabilità e dell'assetto iniziale dalla nave.

Generalmente il baricentro della massa d'acqua imbarcata è al di sotto del baricentro iniziale della nave e quindi la falla sembrerebbe provocare un aumento della stabilità.

Trattandosi di un carico liquido a specchio libero di notevole entità, normalmente il relativo effetto negativo sulla stabilità è preponderante rispetto all'effetto positivo dell'imbarco sotto il galleggiamento.

In definitiva la falla provoca generalmente una riduzione di tutti gli attributi di stabilità e una variazione di assetto longitudinale e, soltanto se il locale allagato è eccentrico rispetto al piano diametrale della nave, anche un'inclinazione trasversale.

1.3.13 La compartimentazione stagna

Lo scopo principale della compartimentazione mediante paratie stagne è quello di limitare le zone di allagamento causato da accidentali imbarchi di acqua riducendo nello stesso tempo la presenza di specchi liquidi

Il numero ed il posizionamento di dette paratie è regolato da norme di sicurezza redatte dai Registri di classificazione (per le navi mercantili) in base al tipo di nave ed alla navigazione cui è destinata.

È comunque previsto un numero minimo di paratie stagne:

- quella prodiera “di collisione”;
- quelle delimitanti l’A.M.;
- quella poppiera “del premitrecce” (così detta perché dotata di passaggi stagni per l’asse/assi portaelica);

Per le navi militari, che per il loro impiego operativo, sono maggiormente soggette ai rischi dell’allagamento, sono previste norme costruttive più severe.

In ambito nazionale vengono applicati gli standard contenuti nella Pubblicazione NAV-04-A013 “Norme per la stabilità e la riserva di galleggiabilità delle navi di superficie”.

In relazione al principio che l’entità del danno debba essere commisurata all’importanza della nave, i criteri per determinare l’estensione dell’allagamento a cui la nave dovrà resistere (mantenendo quindi sufficiente galleggiabilità e stabilità) variano in relazione alla lunghezza nave e sono visibili nella figura 1.33 in cui si evidenzia che per navi fino a 30m di lunghezza dovrà essere assicurata la galleggiabilità con un solo compartimento allagato, per navi fino a 95m con due compartimenti allagati e per navi oltre 95m con tre compartimenti allagati.

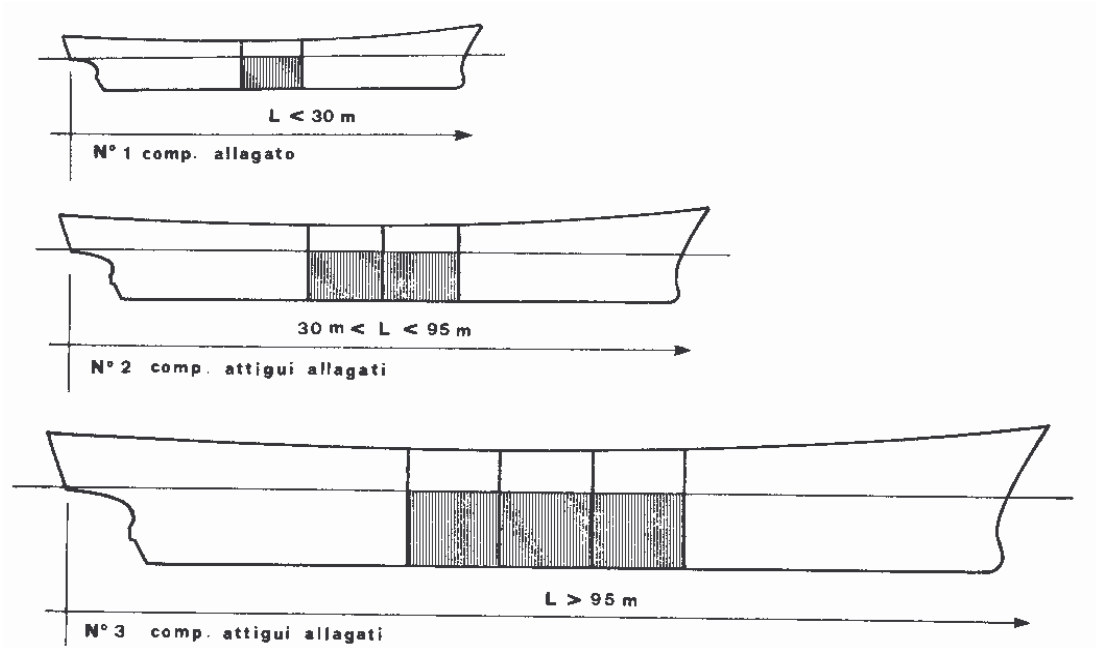


Figura 1.33

La nave sarà quindi compartimentata da paratie stagne trasversali estese da murata a murata, dal fondo fino al ponte delle paratie stagne. Tale ponte stagno può essere continuo o a gradini e sotto di esso sono intestate tutte le paratie trasversali principali stagne.

1.3.14 Incaglio

Si definisce "incaglio" l'appoggio sul fondo della nave in uno o più punti della carena, tale che il peso del volume di acqua spostata S' dopo l'incaglio (diverso da S prima dell'incaglio), sia inferiore al peso della nave (D).

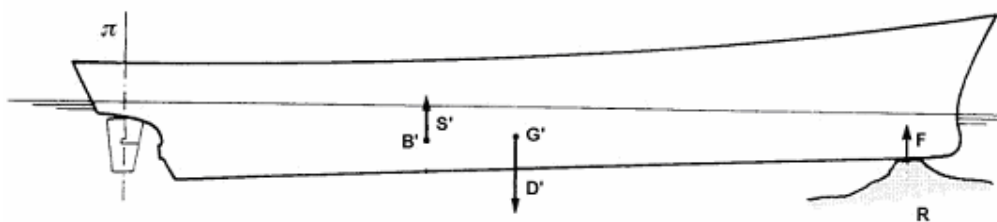


Figura 1.34

Poiché deve essere comunque assicurato l'equilibrio delle forze agenti sulla nave, se la nave è in equilibrio, essendo $S' < D$, evidentemente nel punto di incaglio si manifesta una reazione di appoggio F di entità tale da annullare la differenza tra peso e spinta e tale che sia:

$$F = D - S'$$

Tale reazione diretta verso l'alto può essere considerata come lo sbarco di un peso di pari entità dal punto in cui essa è applicata.

Essendo tale punto sul fondo della nave, cioè al di sotto del baricentro iniziale della stessa, si ha in conseguenza un effetto negativo sulla stabilità.

Se l'incaglio non ha provocato falla, né menomato la resistenza strutturale della nave, si può procedere al disincaglio, dopo essersi assicurati che la stabilità residua della nave lo consenta, (eventualmente abbassando dei pesi o sbarcandone altri).

Le operazioni di disincaglio possono essere effettuate con le eliche della nave, con il tiro di rimorchiatori o di argani e verricelli previo sbarco o spostamento di pesi nelle zone opportune o con l'impiego dei "cilindri di spinta" (contenitori posti lateralmente allo scafo e collegati tra loro con opportune catene o braghe allo scopo di fornire una spinta suppletiva).

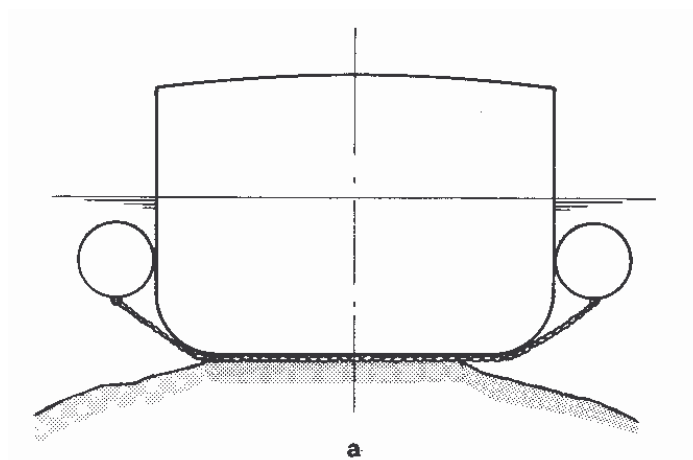


Figura 1.35

1.3.15 Immissione in bacino

Si tratta dell'operazione di messa a secco della nave (per carenamento, controlli e manutenzioni varie) durante la fase iniziale della quale si riproducono, volutamente e sotto controllo, le condizioni dell'incaglio, con i relativi problemi.

L'operazione avviene in tre fasi principali:

1. la nave a seguito dell'esaurimento dell'acqua all'interno del bacino si abbassa parallelamente a se stessa fino a toccare con una estremità il piano delle taccate;
2. la nave ruota attorno a tale estremità fino ad adagiarsi completamente sulle taccate (è questa la fase più critica nella quale si riproducono le condizioni dell'incaglio);
3. la nave ormai appoggiata per tutta la sua lunghezza sulle taccate è completamente a secco ed il bacino è prosciugato.

Per l'immissione della nave in bacino la nave dovrà essere scarica e asciutta e l'assetto longitudinale dovrà essere regolato in modo da rendere minima la rotazione sulle taccate poste nella platea del bacino assicurando comunque un minimo di appruamento alla nave.

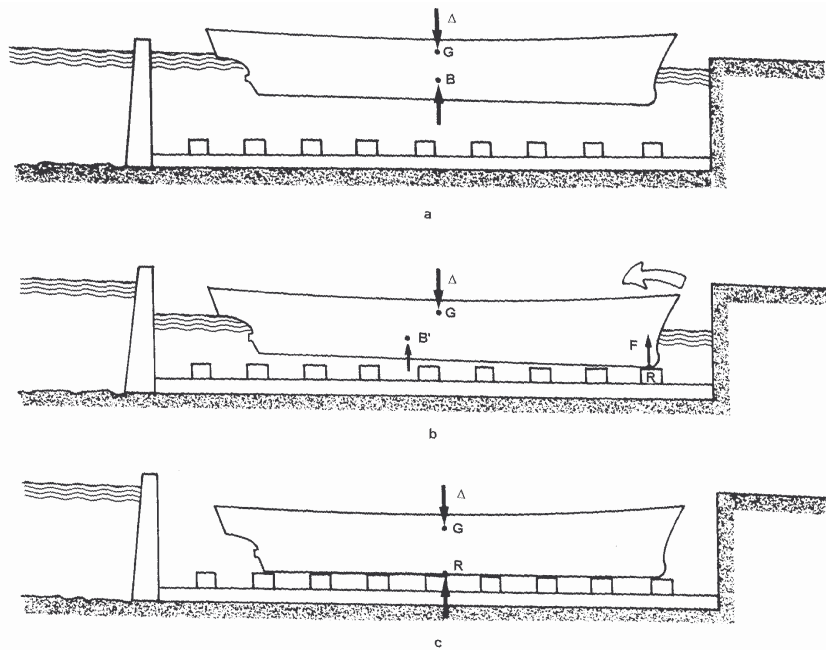


Figura 1.36

Tale condizione assicura che il primo punto di contatto avvenga nella zona prodiera (molto robusta) preservando la zona poppiera da urti accidentali che potrebbero danneggiare gli organi di propulsione e manovra (eliche e timoni).

Cenni di dinamica della nave

1.4.1 Resistenza al rimorchio

Si definisce resistenza al rimorchio di una nave ad una certa velocità la forza necessaria per rimorchiarla a quella velocità in acqua tranquilla. La resistenza così definita è la **resistenza totale**, formata da un certo numero di componenti che interagiscono in modo molto complesso.

Noi supporremo che i vari tipi di resistenza coesistano senza influenzarsi e che la resistenza totale sia data dalla somma delle seguenti componenti:

- *Resistenza di attrito (R_f)*, energia spesa per fare avanzare la carena in un fluido viscoso.
- *Resistenza d'onda (R_w)*, energia che deve essere fornita dalla nave al sistema di onde che essa genera sulla superficie dell'acqua; tali treni di onde, divergenti e trasversali, sono prodotti dalle sovrappressioni e depressioni che la carena genera nel suo moto dando luogo a variazioni di livello del pelo libero (figura 1.37).
- *Resistenza di scia o dei vortici (R_v)*, energia dispersa nei vortici creati dalla carena e dalle appendici, tale dissipazione è tanto maggiore quanto minore è l'avviamento delle forme.
- *Resistenza dell'aria (R_a)*, energia spesa per far avanzare l'opera morta e le sovrastrutture.

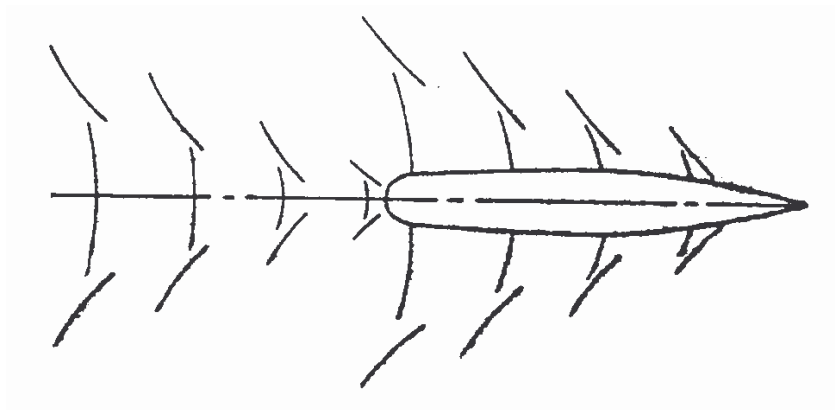


Figura 1.37

Pertanto risulta:

$$R_t = R_f + R_w + R_v + R_a$$

In genere le componenti R_w ed R_v vengono conglobate nella cosiddetta **Resistenza residua** (R_r), per cui si ha:

$$R_r = R_w + R_v$$

ed infine:

$$R_t = R_f + R_r + R_a$$

1.4.2 Determinazione della resistenza totale

Il calcolo della resistenza totale si basa sull'**ipotesi di Froude**, secondo la quale resistenza di attrito e resistenza residua sono indipendenti (cioè non interagiscono tra loro). Sotto queste ipotesi la resistenza di attrito viene calcolata mediante la formula:

$$R_f = C_f \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 \quad (1)$$

in cui:

C_f = coefficiente di attrito da ricavare con formule empiriche .

ρ = densità dell'acqua

S = superficie bagnata

V = velocità

Importanza fondamentale agli effetti della componente di attrito ha la *superficie bagnata* cui questa resistenza è direttamente proporzionale: può essere calcolata, con buona approssimazione, in via preliminare per mezzo di formule sperimentali.

Esistono comunque programmi di calcolo che forniscono l'esatto valore di S avendo come dati di ingresso la geometria della carena rilevata dal "piano di costruzione".

1.4.3 Calcolo della resistenza residua

Il calcolo della resistenza residua della nave, non calcolabile direttamente, viene effettuato tramite prove su modelli appositamente costruiti e provati alla vasca navale in cui viene misurata con appositi carri dinamometrici la Resistenza totale del modello. Ad essa viene sottratta la Resistenza di attrito calcolata con la formula (1) ricavando la Resistenza residua del modello. Dalla resistenza residua del modello tramite appropriate ipotesi e formulazioni si calcola la Resistenza residua della nave (passaggio vasca-mare).

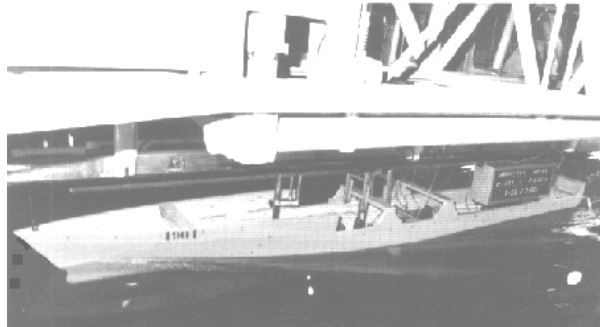


Figura 1.38

Sommando la Resistenza di attrito della nave alla Resistenza residua calcolata si ottiene la Resistenza totale della carena liscia. Per ottenere la resistenza effettiva di rimorchio occorre aggiungere la resistenza dovuta alla **rugosità di carena** (che fa aumentare la resistenza di attrito), la **resistenza dell'aria** e la resistenza delle appendici (ottenibile da formule empiriche).

1.4.4 Determinazione della potenza installata

Ottenuta la resistenza totale della nave R_{ts} si ricava la potenza effettiva di rimorchio Pe (Effective Horsepower) con la relazione:

$$Pe = R_{ts} V_S$$

dove V_S è la velocità di progetto della nave.

Per il dimensionamento dell'apparato motore occorre passare dalla potenza di rimorchio alla potenza da installare a bordo; tenendo conto dei diversi rendimenti che caratterizzano i vari organi della propulsione:

- η_0 = **rendimento di elica isolata**: l'elica, come organo motore, ha un rendimento che si aggira intorno allo 0.5 - 0.65 nelle condizioni ottimali di progetto;
- η_h = **rendimento di carena**: tiene conto del fatto che la carena avanzando trascina una certa massa di acqua, per cui l'elica rispetto all'acqua avanza ad una velocità diversa da quella della nave;
- η_r = **rendimento rotativo**: tiene conto del fatto che il flusso che investe l'elica non è regolare, ma disturbato dalla presenza della carena;

- η_s = **rendimento della linea d'assi**; tiene conto delle perdite di attrito sui cuscinetti e sul riduttore.

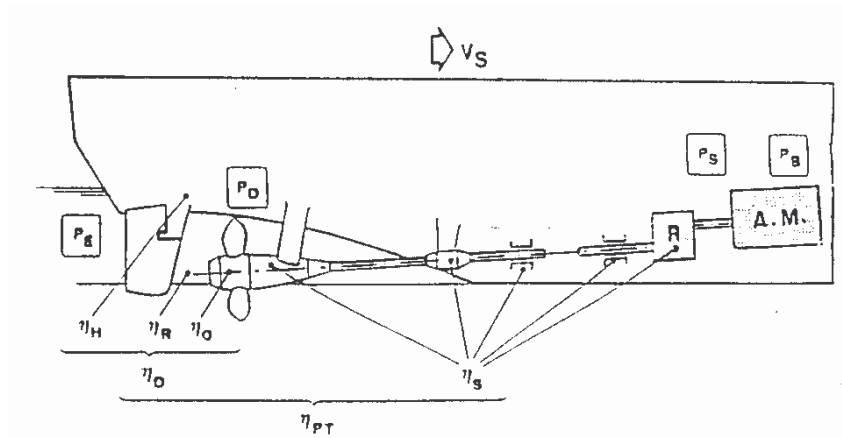


Figura 1.39

Si ricava così prima la **potenza all'elica** P_d (Delivered Horsepower) dalla relazione:

$$P_d = \frac{1}{\eta_o \eta_h \eta_r} P_e = \frac{1}{\eta_d} P_e$$

dove η_d = **rendimento propulsivo**.

Si ricava la **potenza all'asse** P_s (Shaft Horsepower) dalla relazione:

$$P_s = \frac{P_d}{\eta_s}$$

dove η_s = rendimento meccanico della linea d'assi.

La P_s non è la potenza che viene installata a bordo, ma viene solitamente maggiorata del 10-15% per avere un margine di potenza per potere mantenere la velocità corrispondente alla massima potenza continuativa con mare mosso e carena sporca; si ricava così la **potenza al freno** P_b (Brake Horsepower) ed il **rendimento propulsivo totale** η_{pt} legati dalla relazione:

$$\eta_{pt} = \frac{P_e}{P_b}$$

La conoscenza della potenza P_b permette al progettista di definire il tipo di apparato motore da installare e le sue caratteristiche.

2 COSTRUZIONE NAVALE

2.1 Materiali da costruzione

Le caratteristiche dei materiali da costruzioni navali devono rispondere alle seguenti esigenze:

- **Peso specifico:** il più basso possibile compatibilmente con le caratteristiche di resistenza meccanica, allo scopo di ottenere un basso peso scafo;
- **Capacità di conservazione del materiale nel tempo:** cioè resistenza all'attacco degli agenti marini corrosivi;
- **Economicità di lavorazione:** ai fini del costo di costruzione e del tempo di produzione.

A tale scopo è necessario individuare i vari materiali mediante le caratteristiche atte a qualificarlo, valutando di conseguenza il campo di impiego, nonché le limitazioni qualitative ed operative. Suddividiamo i materiali impiegati in:

- **Metallici:** acciaio, leghe leggere, rame, zinco e loro leghe, titanio;
- **Non Metallici:** legno, gomma, ecc.;
- **Compositi.**

2.2 Materiali metallici

Sono i materiali più ampiamente utilizzati in campo navale. Per caratterizzarli vengono effettuate delle prove che forniscono indicazioni utilizzabili ai fini:

- progettuali;
- della lavorazione;
- dell'impiego durevole.

2.2.1 Prove progettuali

Al primo gruppo appartengono quelle prove effettuate su provini per mezzo di idonee apparecchiature, ed in particolare:

Prova di TRAZIONE: viene effettuata mediante macchina idraulica fissando il provino con dei morsetti. Dalla prova si ottiene un diagramma di trazione: forza agente - allungamenti (figura 2.1).

Questo diagramma può essere suddiviso in quattro zone:

- OA = zona **elastica** (al cessare della sollecitazione il provino ritorna alle dimensioni iniziali), considerevole per gli acciai e molto minore in metalli come Alluminio e Rame;
- AB = zona di **snervamento generale** e permanente con notevole aumento della lunghezza del provino senza rilevante aumento del carico;
- BC = zona di **incrudimento** in cui all'allungamento del campione corrisponde un aumento del carico in misura molto minore della parte elastica;
- CD = zona di **snervamento locale** con rottura del campione nel punto D.

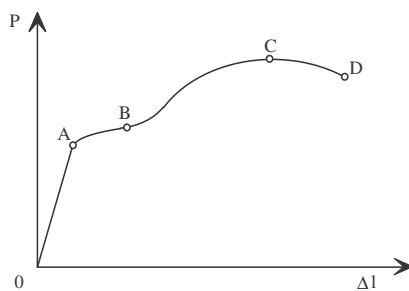


Figura 2.1

Sostituendo al carico di trazione P e all'allungamento del provino rispettivamente la **tensione** σ e la **deformazione** ε , definiti tramite i rapporti:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad [\text{N/mm}^2]$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

dove

A = area della sezione trasversale del provino;

l = lunghezza del provino;

si ottengono indicazioni sulle caratteristiche del materiale e non del provino in quanto i valori si riferiscono all'unità di superficie e all'unità di lunghezza.

L'andamento del diagramma è del tutto simile al precedente (fig. 4.2).

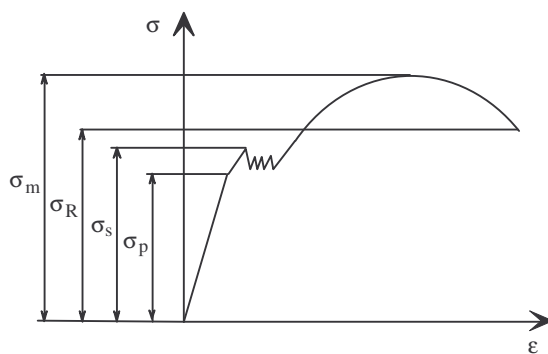


Figura 2.2

Più in particolare si definiscono:

- σ_R = tensione di rottura;
- σ_S = tensione di snervamento;
- σ_p = limite di elasticità.

Generalmente nel campo elastico la deformazione è proporzionale alla sollecitazione; nel diagramma tensione - deformazione (fig. 2.3) tale relazione è indicata da una retta la cui pendenza rappresenta il **modulo di elasticità normale** (o **modulo di Young**):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

La legge di proporzionalità tra sollecitazione σ e deformazione ε nel campo elastico è detta **legge di Hooke**.

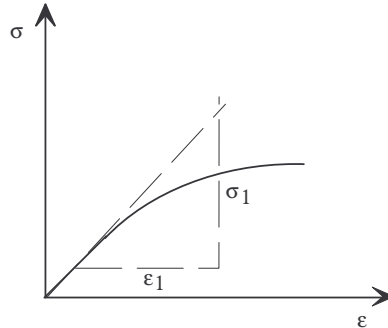


Figura 2.3

Prova di RESILIENZA: serve ad indagare la capacità di un materiale di assorbire un lavoro prima di giungere a rottura in presenza di un intaglio e quindi di concentrazione di tensioni; il provino, di sezione quadrata e dimensioni standard, presenta un intaglio a U o a V e viene colpito con un pendolo dalla parte opposta dell'intaglio (figura 2.4). L'energia potenziale del pendolo che porta alla rottura del provino è la resilienza (Nm), indice della attitudine del materiale a funzionare da **crack-arrester** (impedita propagazione di cricche, lesioni e fessurazioni); le prove vengono effettuate a temperature diverse, e si osserva che diminuendo la temperatura, la resilienza diminuisce, per poi crollare ad una temperatura, detta **temperatura limite di resilienza**.

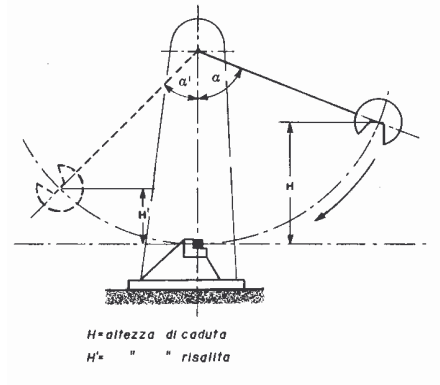


Figura 2.4

Prova di FATICA: quando una struttura viene sottoposta a sforzi di tipo ciclico (vedi nave sottoposta al moto ondoso), può giungere a collasso dopo un certo tempo anche se la sollecitazione massima di esercizio risulta essere inferiore al limite di elasticità del materiale. È questo il fenomeno detto di fatica e le prove servono a determinare il limite sotto il quale il materiale sottoposto a sforzi ciclici resiste indefinitivamente.

2.2.2 Lavorabilità

La lavorabilità del materiale è definita dalle seguenti prove e caratteristiche tecnologiche:

- **Piegabilità a freddo:** analizza la duttilità del materiale; un provino rettangolare viene piegato prima a 90°, poi a 180°, fino a far combaciare i lati opposti: sulla superficie tesa non devono apparire lesioni o cricche.
- **Lavorabilità meccanica o di taglio alla fiamma:** certe lavorazioni meccaniche a freddo, in particolare il taglio con la fiamma, la foratura con punzone, la piegatura al maglio, sottopongono il materiale ad intensi sforzi, con alterazione della sua struttura interna che vanno sotto il nome di **incrudimento**, e che sono causa di eccessiva fragilità.
- **Saldabilità:** caratteristica essenziale per eseguire i collegamenti tra le parti strutturali mediante saldatura.

2.3 Impiego durevole nel tempo

2.3.1 La corrosione

Si definisce corrosione in senso generico quell'insieme di fenomeni di natura fisica, chimica ed elettrochimica che hanno come conseguenza la parziale modifica ed asportazione del materiale costituente un manufatto metallico. Tale azione oltre a provocare dei danni economici, crea problemi di sicurezza di estrema gravità; la corrosione non determina soltanto un deterioramento superficiale visibile e controllabile, ma penetra e si insinua tra grano e grano della struttura metallica fino alla disgregazione dell'edificio cristallino. Tale fenomeno è di difficile identificazione e come conseguenza si può avere un'incontrollabile perdita di resistenza delle struttura sia alle sollecitazioni statiche e sia a quelle dinamiche.

La corrosione penetra nell'interno delle opere infiltrandosi tra le chiodature, tra le giunzioni, oppure la via di accesso è semplicemente un angolo brusco che la superficie presenta o una discontinuità non opportunamente raccordata; talvolta in assenza dei punti di innesco precedentemente elencati le vie sono microscopiche eterogeneità della struttura granulare e cristallina causate da precedenti lavorazioni tecnologiche, dalla presenza di tensioni interne o dalle stesse sollecitazioni meccaniche cui la struttura metallica è sottoposta.

È possibile fare una suddivisione del processo degenerativo in oggetto in base al mezzo responsabile, per cui distinguiamo fenomeni di:

- **Abrasione:** dovuta a particelle dure spinte contro la superficie del metallo da liquidi, gas o aria.
- **Erosione:** dovuta all'effetto abrasivo di liquidi o gas defluenti ad alta velocità.
- **Ossidazione:** dovuto all'azione chimica superficiale dell'ossigeno sui materiali con formazioni (tipica è la "ruggine" per i materiali metallici)
- **Corrosione secca:** dovuta al contatto tra metalli e altri composti metallici o metalli
- **Corrosione umida:** dovuta alla presenza di eterogeneità tra metalli uniti da soluzioni liquide (elettrolita) con creazione di effetti di natura elettrochimica.

2.3.2 Mezzi per ridurre gli effetti corrosivi

I metodi per circoscrivere e ridurre gli effetti corrosivi sono di tipo progettuale e con mezzi protettivi.

Mezzi progettuali

- Scelte dei materiali da costruzione

La scelta dei materiali deve essere orientata verso la maggiore omogeneizzazione, cercando di limitare al massimo l'uso di materiali con grande differenza di potenziale elettrochimico.

Tale orientamento è notevolmente contrastante con la necessità di uso di materiali di particolari qualità tecnologiche intrinseche per certe realizzazioni quali eliche, linee d'assi, cuscinetti, basamenti, riduttori, pompe, valvole, tubolature e strutture in genere.

- Disegno e realizzazioni di strutture e collegamenti

La realizzazione di corrette forme delle strutture è fondamentale per evitare l'innescò di fenomeni corrosivi: si dovrà evitare di costruire strutture con sbalzi repentini, dovranno essere evitati intagli e zone con spigoli vivi, dovranno essere evitati il sovrapporsi di cordoni di saldatura (uso degli scarichi di saldatura), le saldature dovranno seguire tempi e modi in maniera da evitare ogni possibile addensamento di tensioni. Si dovrà, dopo particolari azioni meccaniche, "calmare" il materiale con trattamenti di distensione, usando tutte le conoscenze che la scienza delle tecnologie dei metalli ci propone. Per approfondimenti si lascia lo studente a testi specialistici.

Mezzi protettivi

- Preparazione dei materiali da costruzione

Molti metalli hanno, in misura più o meno sensibile, la vantaggiosa proprietà di autoprotettersi superficialmente, con la formazione di strati di ossidi superficiali impermeabili tali da precludere ulteriori effetti corrosivi.

Tale effetto non è però affidabile in quanto l'ossido naturale superficiale non è sufficientemente compatto e resistente meccanicamente.

Per quanto sopra è consuetudine sostituire artificialmente questo ossido protettivo con un altro film superficiale con caratteristiche di affidabilità e resistenza più consistenti.

La prima operazione per la preparazione di superfici di acciaio è la pulitura delle superfici stesse.

Essa avviene con uso di mezzi meccanici tipo sabbiatura con graniglia metallica a recupero seguito da un abbondante lavaggio con getti d'acqua in pressione per togliere dalla superficie residui di ossidi.

Azione successiva di preparazione è il decapaggio chimico che consiste nell'immergere per un certo periodo il materiale in soluzioni aggressive diluite.

Per il materiale ferroso si usano soluzioni calde di acido solforico al 10-15% e soluzioni con acido nitrico all'1-5%.

Il decapaggio viene completato con lo sgrassaggio e abbondante lavaggio in acqua.

Il materiale è pronto per l'azione successiva che è la fosfatizzazione. Alla base del processo abbiamo il fosforo ed i suoi sali che applicati opportunamente alla superficie del pezzo creano una patina resistente meccanicamente ed anche ad alta resistenza elettrica.

Il pezzo così trattato è pronto o per la conservazione, ed in questo caso le superfici verranno oleate e quindi stoccate, o per i successivi trattamenti superficiali come la verniciatura. Per gli scafi sono state studiate vernici sintetiche particolarmente resistenti all'ambiente salino quali le vernici bicomponenti a base di resine bituminose autoleviganti e antivegetative con base ramata per l'opera viva, resine bituminose fotoresistenti per i bagnasciuga (zona particolarmente interessata da processi corrosivi), resine al clorocaucciù per i ponti esterni, resine epossidiche per casse e depositi.

- Protezione attiva delle navi

Le correnti galvaniche (effetto pila) sono le cause primarie dei processi elettrochimici di corrosione. Tipico è l'esempio di materiali messi in contatto da una soluzione liquida (acqua di mare) come le diverse parti di uno scafo in cui la concomitante presenza di un circuito elettrico chiuso e di due materiali con diverso potenziale elettrico crea nel circuito una differenza di potenziale e quindi un passaggio di corrente elettrica nel circuito. La parte di metallo dove esce la corrente si chiama anodo e la parte dove entra catodo.

In particolare la zona anodica è quella che si corrode in quanto la fuoriuscita di corrente è accompagnata dalla messa in soluzione di materiale. Il sistema di protezione attivo o protezione catodica si basa sul concetto di imporre che lo scafo da proteggere funzioni da catodo. Questa imposizione viene realizzata applicando dei pani di zinco all'esterno dello scafo a diretto contatto con esso.

In questo modo i pani di zinco, essendo più elettronegativi dell'acciaio funzioneranno da anodo e saranno proprio i pani di zinco a subire processi corrosivi preservando le lamiere dello scafo. In particolare saranno posizionati nei punti di maggiore attività elettrochimica come la volta di poppa, gli astucci porta asse, le prese a mare, le zone A.M.

La protezione catodica è realizzata anche internamente alla nave per proteggere tubolature e strutture varie quali condensatori e scambiatori di calore mediante l'inserimento in opportuni pozzetti di anodi sacrificali sotto forma di cilindretti sagomati; possono essere di materiale diverso dallo zinco quale il ferro dolce e comunque più elettronegativo della struttura da proteggere.

A titolo indicativo si trascrive nella tabella seguente la serie galvanica in acqua di mare di metalli e loro leghe particolarmente interessante per le costruzioni navali :

- | | |
|------------------------------|---------------------------------------|
| 1) Magnesio (il più anodico) | 16) Ottone navale |
| 2) Leghe di magnesio | 17) Nickel |
| 3) Zinco | 18) Bronzo al silicio |
| 4) Acciaio zincato | 19) Ottone ammiragliato |
| 5) Leghe di alluminio | 20) Rame |
| 6) Cadmio | 21) Cupro-Nickel |
| 7) Duralluminio | 22) Nickel passivato |
| 8) Acciaio | 23) Monel |
| 9) Ghisa | 24) Inossidabile 18/8 (304) passivato |
| 10) Acciaio inossidabile | 25) Inossidabile 18/8 (316) passivato |
| 11) Acciaio inossidabile 304 | 26) Argento |
| 12) Acciaio inossidabile 316 | 27) Oro |
| 13) Piombo | 28) Platino (il più catodico) |
| 14) Stagno | |
| 15) Bronzo al manganese | |

2.4 Materiali metallici più utilizzati

2.4.1 L'acciaio

L'acciaio, materiale costituito da ferro con l'apporto di una percentuale di carbonio, è divenuto col tempo il principale materiale da costruzione navale ed ha subito nel tempo una graduale evoluzione che ne ha migliorato le caratteristiche tecnologiche e meccaniche.

L'uso dell'acciaio presenta i seguenti vantaggi e svantaggi:

- Riduzione del peso strutturale di circa il 40% rispetto ad una analoga costruzione in legno;
- Aumento della capacità interna destinabile al carico a seguito delle semplificazioni strutturali e le ridotte dimensioni delle ossature (anche il 15÷20% a parità di dislocamento);
- Una maggiore sicurezza per quanto riguarda il pericolo di incendio e una maggiore impermeabilità dei fasciami;
- Facilità di costruzione e riparazione;
- Maggiore durata;
- Peggiori condizioni di vivibilità derivante dalla conduttività termica dei metalli e dalla condensazione del vapor d'acqua sulle parti in acciaio;
- Minore resistenza agli urti;
- Presenza di corrosione, la cui azione si riesce solamente a rallentare, ma non ad eliminare.

In base alla **composizione chimica**, che ne condiziona l'impiego sia in relazione all'importanza dell'elemento strutturale, sia in relazione al tipo di collegamento, gli acciai vengono designati dal R.I.Na. con le sigle A, S, D, SS, E; in relazione alle **caratteristiche meccaniche** degli acciai da scafo si suddividono in:

- acciai **ordinari**: con carico di snervamento minimo compreso tra 235 e 265 N/mm² e carico di rottura compreso tra 400 e 530 N/mm²;
- acciai ad **elevata resistenza (ER)**: con carico di snervamento minimo compreso tra 285 e 380 N/mm² e carico di rottura tra 430 e 645 N/mm²; sono particolarmente usati nelle grandi costruzioni e nelle navi militari, nelle zone maggiormente sollecitate, perché a parità di resistenza hanno un peso sensibilmente minore, ovvero a parità di peso consentono la realizzazione di strutture più resistenti; inoltre grazie alla elevata resilienza, funzionano da crack-arrester; unici inconvenienti, il costo più elevato (che per grandi navi può essere comunque compensato dal guadagno effettivo di peso).

Le principali caratteristiche meccaniche degli acciai ordinari da scafo e di quelli ad elevata resistenza ER sono riassunte e comparate in tabella.

Designazione tipo di Acciaio	ACCIAI ORDINARI		ACCIAI ER			
	A-S-D- SS-E	S27- SS27-E27	ER29	ER32	ER36	ER39
Snervamento σ_s N/mm ² (kg/mm ²)	235 (24)	265 (27)	285 (29)	315(32)	355(36)	380(39)

Rottura σ_R N/mm ² (kg/mm ²)	400÷490 (41÷50)	400÷530 (41÷54)	430÷540 (44÷55)	470÷590 (48÷60)	490÷620 (50÷63)	510÷645 (52÷66)
Allungamento (%)	22	22	22	22	21	20
Resilienza Joule (kgm)	27 (2.8)	27 (2.8)	27 (2.8)	31 (3.2)	31 (3.2)	39 (4.0)

L'acciaio speciale HY 80 (High Yield 80000 lb/sq in)

Nella costruzione dei sommergibili sono stati impiegati acciai speciali dotati di resistenza meccanica sempre più elevata, specie per quanto riguarda il limite di snervamento e la tenacità. Tali caratteristiche tecnologiche sono ottenute mediante l'aggiunta di elementi di lega e trattamenti termici, che creano per contro particolari problemi, specie nei riguardi della saldabilità.

Per la costruzione dello scafo resistente dei smg classe "Sauro" è stato impiegato l'HY 80, un acciaio speciale messo a punto negli USA.

Esso presenta le seguenti caratteristiche meccaniche (confrontate con quelle di alcuni acciai ordinari ed un acciaio ER).

Confronto tra le Caratteristiche Meccaniche dell'acciaio HY80 con altri acciai					
Tipo di acciaio		HY80	E	E27	ER39
Caratteristiche Meccaniche	σ_R (N/mm ²)	716	490	530	645
	σ_S (N/mm ²)	567	235	265	380
	A (%)	24	22	22	20
	Hv (J)	23	27	27	39

Sono possibili applicazioni di acciai con resistenza ancora più elevata, quali l'HY 100 ed HY 140, con valori del limite elastico di circa 1000 N/mm².

Per la costruzione dei nuovi sommergibili (U212) della M.M.I. viene impiegato acciaio inossidabile per le doti di amagnetività del materiale.

2.4.2 Il Titanio e le sue leghe

È un elemento metallico appartenente al IV Gruppo del Sistema Periodico; è contenuto in metalli quali il Rutilio (biossido di Titanio, TiO₂) e l'Ilmenite (ossido di Ferro e Titanio). Viene impiegato, con l'aggiunta di elementi quali Alluminio, Stagno, Molibdeno, Vanadio, Nichel e Ferro, sotto forma di leghe, che presentano caratteristiche meccaniche comparabili a quelle di un ottimo acciaio legato, con il vantaggio di un peso specifico che è poco più della metà ed una temperatura di fusione di 1668°C; la sua eccezionale resistenza alla corrosione ed alla erosione consente di

mantenere in quasi tutti gli impieghi lo stato iniziale di finitura superficiale. Il costo di produzione è elevato, inoltre è considerato materiale strategico, terzo per importanza dopo Cromo e Cobalto, in quanto impiegato nelle costruzioni belliche ed aerospaziali.

I settori di impiego del Titanio sono molteplici:

- **Aeronautico:** sia per gli elementi strutturali che per i motori, a causa dell'eccellente rapporto resistenza-peso specifico ($2 \div 2.5$ volte superiore a quello dell'acciaio), resistenza meccanica agli sbalzi termici, alla corrosione, alla fatica;
- **Industriale:** impianti chimici relativi alla produzione di sostanze corrosive, scambiatori di calore, parti di macchine termiche come turbine e caldaie;
- **Navale:** sono svariati e dipendono, come già detto, dal favorevole rapporto resistenza-peso specifico, (eliche, assi, parti di motore, ...).

2.4.3 Le leghe leggere

Le leghe leggere hanno come costituente principale l'Alluminio unito ad altri metalli, i quali variamente dosati danno luogo a gruppi di leghe aventi, rispetto all'acciaio, le seguenti caratteristiche:

- **Peso specifico basso**, compreso tra 2700 e 3000 kg/m^3 , cioè $1/3$ circa rispetto all'acciaio (7800 kg/m^3);
- **Modulo di elasticità E basso**, pari a 70000 N/mm^2 , contro i 206000 N/mm^2 dell'acciaio; a parità di sollecitazione una struttura in lega leggera subisce deformazioni triple rispetto ad una identica struttura in acciaio;
- **Carichi di rottura, snervamento e limiti di elasticità**, variabili entro un ampio campo di valori, non solamente a seconda del tipo di lega, ma anche, per una stessa lega, a seconda del grado di incrudimento subito per lavorazioni meccaniche;
- **Resistenza alla corrosione generalmente modesta**, dato che l'Alluminio essendo più elettronegativo degli altri metalli da costruzione a contatto con essi si comporta da anodo, andando incontro a rapida usura; ciò comporta la necessità di isolarlo completamente dal contatto con gli altri metalli a mezzo di guarnizioni o vernici;
- **Facile lavorabilità a freddo;**
- **Sensibilità all'affaticamento maggiore:** si traduce nel fenomeno della cosiddetta corrosione da sforzo, causa di fessurazioni, dovuta a fenomeni di fatica (sollecitazioni ripetute nel tempo) ed alla presenza di tensioni residue di saldatura;
- **Bassa temperatura di fusione**, circa 700°C , che rappresenta un grosso pericolo in caso di incendio; è questo fatto che ne limita pesantemente, allo stato attuale, l'applicazione in campo navale militare;
- **Difficile saldabilità**, dovuta alla elevata affinità dell'Alluminio con l'Ossigeno, particolarmente alle alte temperature, ove si ha formazione di Allumina, che tra l'altro ha punto di fusione molto superiore a quello della lega leggera; la saldatura viene effettuata in ambiente inerte (Argon, Elio), per impedire la formazione di questo strato di ossido;
- **Costo del materiale molto elevato**, pari a circa 6 volte quello dell'acciaio; tenendo conto della economia di peso che ne deriva, il costo finale del prodotto

risulta essere tre volte superiore; inoltre il processo di saldatura in atmosfera inerte richiede attrezzature costose e personale specializzato.

L'impiego delle leghe leggere in campo navale è limitato alla costruzione di piccoli scafi leggeri e veloci, e delle sovrastrutture di grandi navi mercantili, per limitare l'entità dei pesi posti in alto, ottenendo così un abbassamento della quota del baricentro a vantaggio della stabilità di peso della nave. In campo militare dopo l'esperienza delle Falkland, l'impiego delle leghe leggere è stato drasticamente ridotto.

2.4.4 Rame, zinco e loro leghe

Altri materiali impiegati in campo navale sono i seguenti:

- **Rame:** utilizzato per tubolature, condutture elettriche, guarnizioni, e come componente per le sue leghe, quale il **cupronichel** (70% Cu, 30% Ni), impiegato per la costruzione di tubolature per la circolazione di acqua mare;
- **Bronzo:** è una **lega di rame e stagno**, usata per parti di macchinari e valvolame; con l'aggiunta di particolari elementi si ottengono i cosiddetti **bronzi speciali**; l'aggiunta di Alluminio, per esempio, garantisce alla lega una forte resistenza alla corrosione in acqua salata e facilità di fusione, e la rende particolarmente adatta per la costruzione delle eliche navali;
- **Ottone:** è una **lega di rame e zinco** utilizzata per parti di allestimento (tubi, passamano, ecc.);
- **Zinco:** usato puro sotto forma di pani per la protezione contro le correnti galvaniche.

2.4.5 Materiali per la fabbricazione delle eliche

Le leghe impiegate per la costruzione delle eliche devono soddisfare i seguenti requisiti:

- possedere elevata colabilità e fluidità, necessarie per le operazioni di fonderia;
- possedere caratteristiche idonee alla lavorazione per asportazione di truciolo, necessarie per finire il prodotto entro lo stretto campo di tolleranza richiesto;
- presentare elevate caratteristiche di resistenza ai carichi dinamici a fatica, in ambiente corrosivo quale è l'acqua di mare;
- presentare eccellente durezza superficiale per la resistenza alla erosione;
- possedere caratteristiche che le rendono idonee ad essere riparate o raddrizzate mediante saldatura o deformazione plastica a caldo.

La lega più antica impiegata per la costruzione di eliche è l'ottone ad elevata resistenza a trazione contenente il 60% di rame ed il 40% di zinco.

Il bronzo invece è una lega rame-stagno (fino al 25÷30%) che presenta una notevole resistenza alla corrosione, alla fatica, alla trazione, all'usura, nonché durezza, saldabilità ed attitudine ad essere lavorata all'utensile.

Tutti i bronzi presentano grande attitudine alla fusione (800÷1000°C) bassissimo ritiro e scarsa tendenza alle fessurazioni.

La richiesta di leghe per eliche con qualità meccaniche più spinte, ha portato allo sviluppo dei bronzi all'alluminio ed in particolare il bronzo al nickel-alluminio ed al manganese-alluminio.

2.5 I materiali non metallici

2.5.1 Il legno

Sino alla fine del XVIII secolo il legno fu l'unico materiale usato nelle costruzioni navali, poiché nessun altro materiale era così prontamente disponibile e facilmente lavorabile con le attrezzature del tempo.

Il legno però a causa delle scarse caratteristiche di resistenza e delle difficoltà nella realizzazione dei collegamenti tra i vari elementi costruttivi della nave non permetteva la realizzazione di scafi molto grandi.

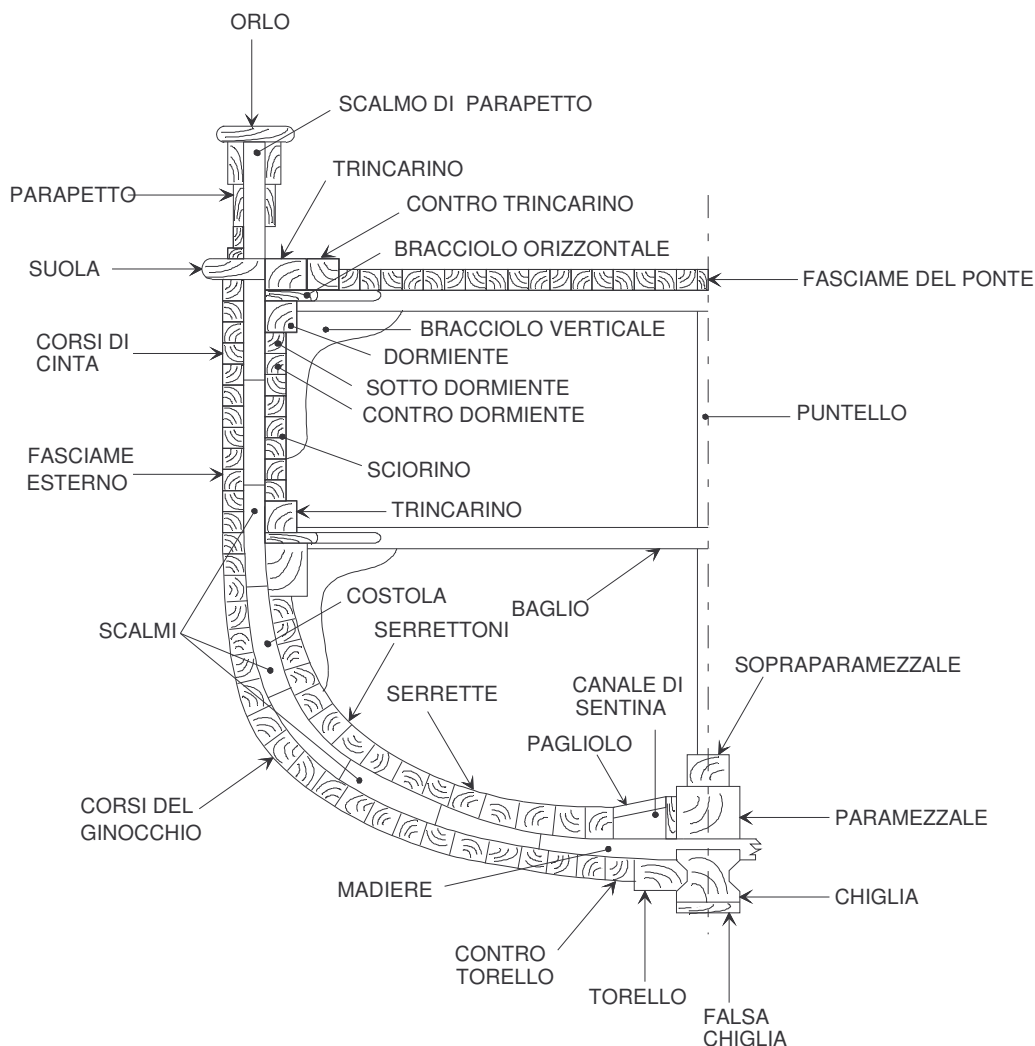
Verso il 1830, con l'avvento della propulsione a vapore, si cominciarono a costruire le prime navi in ferro, e verso il 1870 fu introdotto gradualmente l'uso dell'acciaio. L'uso del legno fu quindi progressivamente abbandonato, tranne che per la costruzione di piccole imbarcazioni da diporto e dei dragamine (prima dell'avvento della vetroresina), ma soprattutto per l'allestimento.

Il legname per la costruzione navale deve resistere all'ambiente marino ed all'attacco dei parassiti, dovrebbe essere ottenuto in grossi pezzi a fibra dritta, privo di nodi e naturalmente possedere buone caratteristiche di resistenza e basso peso specifico.

I principali tipi di legno (e le loro caratteristiche) sono i seguenti:

- **Quercia, olmo, iroko:** legni compatti adatti per le parti fondamentali dello scafo (chiglia, ordinate, dritto di poppa e prua);
- **Acacia, frassino:** legni molto elastici e resistenti usati per elementi che devono essere sagomati con piegatura;
- **Teak:** legno molto grasso, compatto e di lunga durata, adatto per il rivestimento dei ponti;
- **Noce, mogano, pino, larice:** legni elastici di facile lavorazione molto indicati per il fasciame.

Oltre all'impiego del legno come massello viene usato anche il **compensato marino**, prodotto unendo sottili fogli di legno a fibre alternate a 90 gradi con colle sintetiche ad alta resistenza.



2.5.2 I materiali compositi

I materiali compositi, noti fin dall'antichità, sono ottenuti accoppiando due o più materiali per ottenere proprietà complessive superiori o diverse (argilla-paglia, calcestruzzo-tondino di ferro, ecc.).

In generale essi si definiscono come "Sistemi eterogenei costituiti da due o più fasi macroscopiche diverse tra loro o nella forma o nella composizione chimica o in entrambe".

Tra i materiali compositi della prima generazione che interessano maggiormente il settore navale vi sono i **plastici rinforzati con fibre di vetro**, disponibili sul mercato dal 1940, quando negli Stati Uniti è iniziata la produzione su scala industriale.

I costituenti principali dei materiali compositi fibrosi quali il G.R.P. sono la **matrice**, con funzione essenzialmente legante, e le **fibre**, che esplicano la funzione di rinforzo e di sopportazione del carico.

L'unione tra matrice e fibra deve essere tale da resistere alle sollecitazioni presenti nell'interfaccia, che costituisce la zona di transizione tra le due componenti.

Un materiale composito è un materiale **anisotropo**, in quanto presenta proprietà meccaniche diverse a seconda della direzione delle sollecitazioni alle quali viene sottoposto; diviene **isotropo**, come nel caso del multistrato, se ogni lamina viene orientata diversamente.

Le fibre di vetro

Il vetro è un materiale di natura inorganica impiegato per primo nella fabbricazione delle fibre artificiali; è un materiale a basso costo che presenta temperature di fusione relativamente basse alle quali, per trafilazione in apposite filiere, si ottengono delle fibre con buone proprietà meccaniche.

Per la fabbricazione delle fibre esistono due tipi di vetro, **vetro E** e **vetro S**.

Il vetro E è il tipo di vetro più impiegato per il suo basso costo, mentre il vetro S, per le sue superiori proprietà meccaniche (modulo di elasticità, carico di rottura, ecc.) viene impiegato quando sono richiesti alti valori di resistenza specifica in costruzioni che devono resistere ad elevate sollecitazioni.

Le principali proprietà delle fibre di vetro, sono le seguenti:

- Elevata resistenza specifica;
- Buona elasticità, con allungamenti massimi, a rottura, dell'ordine del 5%;
- Buone proprietà di riscaldamento: non sono combustibili, hanno un basso coefficiente di dilatazione ed una elevata conducibilità termica, conservano una buona resistenza meccanica anche alle temperature elevate (il 50% a 350°C, il 25% a 500°C);
- Buona stabilità chimica e basso assorbimento di umidità;
- Buona resistenza agli attacchi degli agenti chimici;
- Elevata resistenza elettrica;
- Costo inferiore a quello di tutte le altre fibre.

Le fibre di vetro si trovano in commercio sotto forma di:

- **Roving**: fascio di fili continui di vetro, riuniti assieme con o senza torsione;
- **Mat**: feltro più o meno spesso di filamenti continui o non disposti a caso nelle varie direzioni come i feltri di lana o cotone;
- **Chops**: fibre corte di vetro, generalmente ottenute tagliando il roving, e normalmente depositate a spruzzo insieme alla resina;
- **Stuoia**: tela di vetro tessuta con roving ad alto titolo con trama uguale all'ordito;
- **Tessuti**: di vario genere, ottenuti con roving a basso titolo (e quindi molto più leggeri delle stuoie), con trama e ordito di peso generalmente diverso;
- **Nastri**: fasci di roving di larghezza limitata (alcuni centimetri) tenuti insieme da una trama molto leggera, e quindi con resistenza prevalente secondo la lunghezza.

Matrici organiche

Gli **alti polimeri sintetici** sono i materiali più idonei per tenere insieme le fibre dei materiali compositi fibrosi; questi costituenti a funzione legante vengono distinti in **termoindurenti** e **termoplastici**, in relazione al loro diverso comportamento nel processo di produzione.

Le matrici termoindurenti sono materie plastiche sintetiche che per effetto del calore o in presenza di catalizzatori o radiazioni assumono una struttura rigida, tridimensionale, praticamente infusibile e insolubile nei solventi organici.

Il termine "termoindurente" è improprio perché il processo può avvenire anche a temperatura ambiente.

Le matrici termoplastiche sono materie plastiche sintetiche a struttura lineare o ramificata, capaci di rammollirsi o fondere per azione del calore e di sciogliersi nei solventi organici; al raffreddamento o per evaporazione del solvente il materiale indurisce e riprende le caratteristiche di partenza.

Il G.R.P.

Nel campo della costruzione navale l'utilizzo delle fibre composite è limitato essenzialmente al G.R.P. (Glassfibre Reinforced Plastic).

Dopo la II Guerra Mondiale se ne iniziò l'impiego, specie per prodotti di piccole dimensioni quali imbarcazioni da diporto e pescherecci; la tendenza dei primi costruttori era quella di riprodurre in G.R.P. strutture tradizionali realizzate in legno, acciaio e lega leggera; il risultato fu una struttura costosa, intrinsecamente debole, con un ridotto periodo di efficienza.

Successivamente è stato impiegato anche nella costruzione navale militare: falsetorri di sommergibili, scafo esterno di sottomarini a grande profondità (DDU e DRSU) della USN e, nel 1973, per la costruzione del cacciamine britannico MILTON da 450 t.

In Italia la comparsa del G.R.P. quale materiale per la costruzione di imbarcazioni militari è iniziata con mezzi minori, ma soprattutto con la costruzione, da parte del Cantiere INTERMARINE S.p.A., dei **Cacciamine Classe "LERICI"**. La scelta di questo materiale per navi contromisure mine (MCM Vs) è dovuto alle migliori caratteristiche antishock rispetto al legno (con il quale fino ad allora erano stati costruiti i dragamine) ed alla assenza di segnatura magnetica.

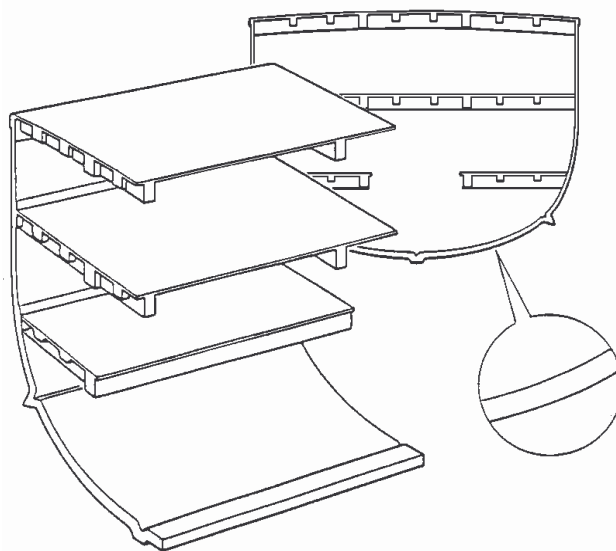
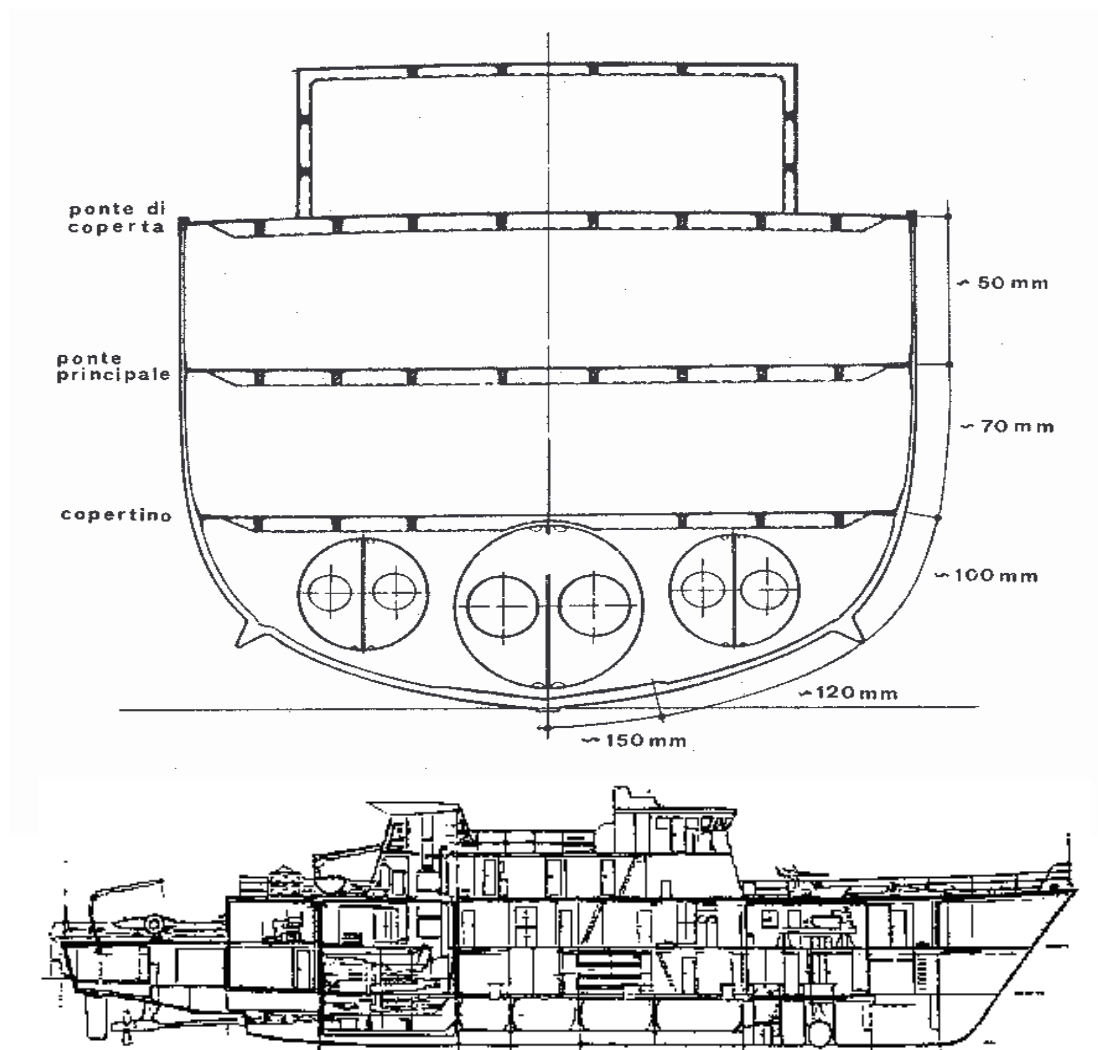


Figura 2.5

Opportunamente usato, il G.R.P. presenta interessanti proprietà rispetto ai materiali tradizionali da costruzione:

- Non si decompone o corrode, richiede bassissima manutenzione ed ha conseguentemente una lunga vita operativa e costi relativamente bassi;
- Non presenta magnetismo permanente o indotto;
- Presenta eccellenti proprietà di isolamento termico/acustico ed alle vibrazioni;
- Possiede una eccezionale resistenza all'impatto ed eccellenti caratteristiche balistiche;
- Con l'adozione di determinate concezioni strutturali si hanno imbarcazioni estremamente semplici da costruire e riparare, difficilmente danneggiabili anche sotto severi carichi dinamici da shock, mentre il peso della struttura resta comparabile con quello di una equivalente nave costruita in acciaio;
- Eccellenti proprietà di resistenza a fatica.

Da notare che, per permettere allo scafo deformazioni elastiche sensibili, la robustezza sul fondo della nave è assicurata solo dal "guscio" in G.R.P. e non sono presenti nervature interne come nelle normali navi in acciaio.



2.6 Collegamenti

2.6.1 Generalità

Quando si costruivano navi in legno si incontravano non poche difficoltà per unire con la necessaria rapidità e garanzia di robustezza i diversi elementi costituenti lo scafo ed ottenere una soddisfacente impermeabilità dei fasciami.

Per dare forma alle ossature e collegarle tra loro si dovevano infatti realizzare numerosi incastri che venivano rinforzati con perni, chiodi e caviglie.

Dopo essere stati fissati alle ossature, i fasciami venivano sottoposti ad una operazione di impermeabilizzazione, detta calafataggio, che consisteva nel chiudere con stoppa e pece liquida tutte le fessure, "comenti", tra le tavole.

Con il passaggio alle costruzioni metalliche si realizzarono notevoli semplificazioni nei procedimenti di unione tra le varie parti; anche se il solo procedimento impiegabile era quello della chiodatura, ottenuta a mezzo di chiodi inseriti e bloccati entro fori appositamente praticati negli elementi da collegare.

A partire dal 1940 venne introdotta, seppure in maniera lenta e graduale, la saldatura, dapprima nei collegamenti meno importanti, quindi in zone sempre più estese, fino alla completa realizzazione dello scafo; si nutrivano infatti dubbi sulla sua resistenza agli sforzi e soprattutto si temevano inaccettabili variazioni delle caratteristiche meccaniche del metallo nelle immediate vicinanze dei lembi saldati.

L'esperienza acquisita negli anni con il progredire delle tecniche di saldatura ed il miglioramento delle qualità meccaniche e tecnologiche degli acciai da scafo hanno messo comunque in luce i vantaggi di questo tipo di collegamento:

- Impiego di manodopera non altamente specializzata;
- Riduzione dei tempi di lavorazione;
- Riduzione del peso scafo, a seguito della eliminazione di sovrapposizioni di lamiera, contropesce ed una grande quantità di angolari di collegamento e di ali di attacco dei profilati alla lamiera.

Dal canto suo, la chiodatura presentava i seguenti vantaggi:

- Riduzione dei tempi di prefabbricazione: la presenza di orli chiodati infatti semplificava il montaggio e soprattutto riduceva le tensioni residue interne dovute al violento apporto termico della saldatura e quindi le deformazioni complessive, fastidiose in sede di collegamento dei vari "blocchi" prefabbricati;
- Azione di "crack-arrester": quando si produceva una lesione nella lamiera infatti, si innescava una cricca che, propagandosi in presenza di chiodatura, si limitava alla sola lamiera di origine (a meno che non incontri il foro nel suo cammino).

Tali caratteristiche hanno determinato la sopravvivenza della chiodatura fino a pochi anni fa.

2.6.2 La chiodatura

La chiodatura è un sistema di collegamento fisso tramite chiodi; l'operazione consiste nel sovrapporre tra loro le due parti da collegare, preventivamente forate, e nel ribadire a caldo o a freddo la porzione sporgente del gambo del chiodo infilato nelle forature allineate in modo da formare una testa analoga a quella esistente.

La contrazione del gambo durante il raffreddamento oppure la ribaditura a freddo determinano una energica azione di compressione tra le superfici da collegare e l'insorgere di una resistenza di attrito che si oppone al mutuo scorrimento; il gambo del chiodo risulta pertanto soggetto a trazione, mentre le lamiere sono compresse.

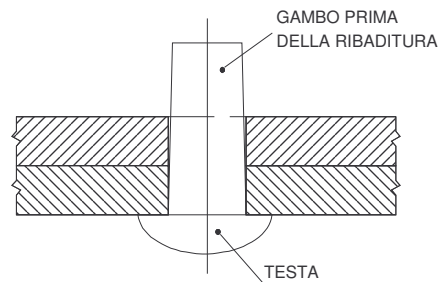


Figura 2.6 a

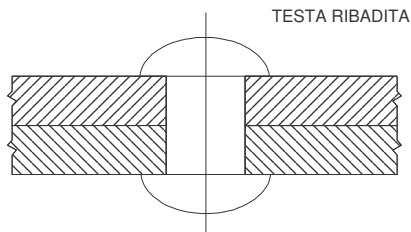


Figura 2.6 b

Dunque il collegamento è assicurato non dalla resistenza a taglio del gambo dei chiodi (peraltro molto modesta nei confronti delle sollecitazioni in gioco), ma dall'attrito che nasce tra lamiera e lamiera per effetto della contrazione del gambo.

Quando in un giunto chiodato si arriva allo scorrimento delle lamiere, la rottura può avvenire perché i gambi dei chiodi cedono al taglio, oppure perché si rompe la lamiera indebolita dalla presenza dei fori.

Calafataggio

Per realizzare un'unione stagna è necessario procedere all'operazione di calafataggio sia della testa dei chiodi, sia dei lembi delle lamiere, che vanno preventivamente preparati (cianfrinati). Con tale operazione il materiale, a mezzo di appositi attrezzi, viene ricalcato. Se le lamiere sono di piccolo spessore anziché eseguire il calafataggio, si interpone fra le lamiere della tela imbevuta di biacca ed olio di lino cotto, o una qualunque altra sostanza ferma-liquidi.

2.6.3 La saldatura

La saldatura è un procedimento di giunzione che consente di unire permanentemente parti solide, realizzando la continuità del materiale mediante la fusione dei lembi da unire con l'aggiunta di materiale d'apporto.

Le costruzioni saldate, a differenza di quelle realizzate con altri tipi di giunto (come la chiodatura, l'imbullonatura, l'aggraffaggio, ecc.), risultano quindi monolitiche, poiché non vi è interruzione in corrispondenza delle giunzioni.

Ciò rappresenta un vantaggio in quanto viene assicurata la continuità della struttura.

Il processo della saldatura ha soppiantato completamente le altre tecniche di collegamento in quanto le moderne tecnologie permettono di realizzare saldature perfette senza indebolire il materiale nelle vicinanze ed assicurando un alto valore di resilienza tramite l'apporto di particolari componenti nel materiale base e nel materiale di apporto.

2.7 Le strutture navali

2.7.1 Generalità

Per sopportare i carichi cui è soggetta, la nave presenta una struttura formata da pannelli di lamiera saldata, irrigiditi da travi e profilati di vario genere, a costituire un insieme di telai trasversali e longitudinali.

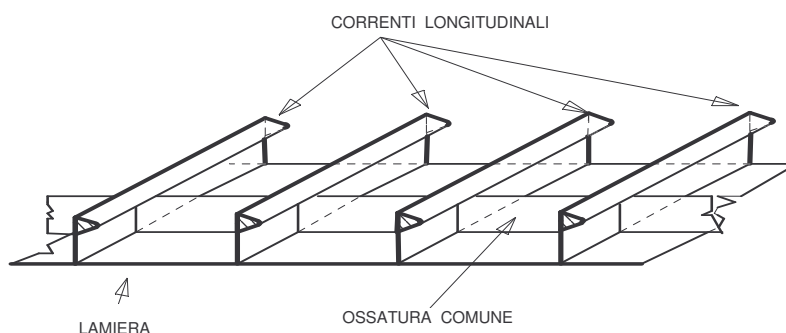


Figura 2.7

Le lamiere ed i rinforzi che formano i telai trasversali, costituiscono una struttura resistente alle sollecitazioni prevalentemente trasversali.

I telai longitudinali, invece, conferiscono allo scafo metallico la necessaria rigidità nei confronti di carichi longitudinali sia in acqua tranquilla che sull'onda.

Per quanto detto è chiaro che la tipologia strutturale di una nave non sarà mai solo di tipo trasversale o longitudinale, ma saranno presenti entrambi i telai. A seconda del tipo di sollecitazioni prevalenti avremo una maggiore o minore presenza di telai trasversali o longitudinali; in particolare si possono riscontrare tre tipologie strutturali:

- struttura "prevalentemente" **trasversale**;
- struttura "prevalentemente" **longitudinale**;
- struttura **mista**.

Oltre a questo, per ogni tipologia strutturale si possono individuare due tipi di elementi di rinforzo:

- **travi principali**: dette anche "rinforzi primari" o "travi rinforzate"; offrono la resistenza alle sollecitazioni principali cui è soggetta la nave e garantiscono la continuità strutturale;
- **travi ordinarie**: dette anche "rinforzi secondari", conferiscono la robustezza locale e fanno da irrigidimento ai pannelli di lamiera del fondo, dei fianchi e dei ponti; questi, inoltre ripartiscono il carico gravante sulle travi principali.

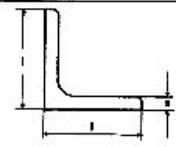

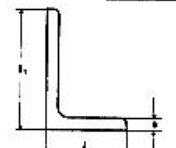
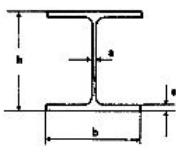
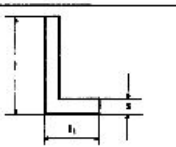
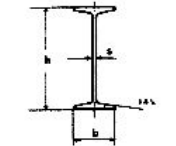
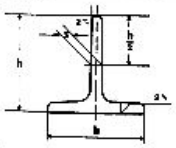
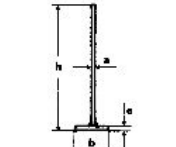
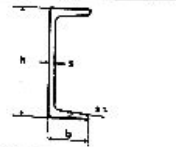
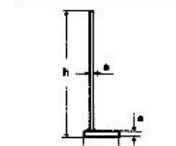
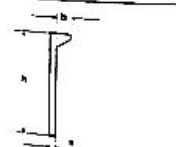
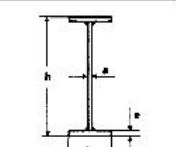
	- Angolari a lati uguali e spigoli tondi. (Correnti, Costole, Bagli per imbarcazioni in ferro o alluminio di piccole dimensioni).		- Larghi Piatti. (Rinforzi ordinari nelle navi di piccole dimensioni e nelle sovrastrutture).
	- Angolari a lati disuguali e spigoli tondi. (Correnti, Costole, Bagli per imbarcazioni in ferro o alluminio di piccole dimensioni).		- Travi HE ad ali larghe. (Anguille, Bagli, Costole rinforzate, Madieri, Paramezzali, ma poco usate).
	- Angolari a lati disuguali e spigoli vivi. (Correnti, Costole, Bagli per imbarcazioni in ferro o alluminio di piccole dimensioni).		- Travi IPN ad ali strette. (Anguille, Bagli, Costole rinforzate, Madieri, Paramezzali, ma poco usate).
	- Profilati a T a spigoli tondi. (Anguille, Costole e Bagli rinforzati per imbarcazioni di piccole dimensioni).		- Travi composite a T. (Largamente usate in tutte le travi rinforzate: Costole, Bagli, Anguille, Madieri, Paramezzali).
	- Profilati a U. (Puntoni di rinforzo del doppio fondo).		- Travi composite ad L. (Largamente usate in tutte le travi rinforzate: Costole, Bagli, Anguille).
	- Profilati a bulbo dissimmetrico. (Correnti, Costole, Bagli, rinforzi di paratie, sovrastrutture, casse, ecc.).		- Travi composite a doppio T. (Largamente usate in tutte le travi rinforzate: Costole, Bagli, Anguille, Madieri, Paramezzali).

Tabella 2.8 : Varie tipologie di travi (o profilati)

2.7.2 Struttura prevalentemente trasversale

Tale struttura si adotta su navi di ridotte dimensioni che non presentano elevate sollecitazioni longitudinali, ma principalmente problemi di robustezza trasversale e locale.

La struttura dello scafo è costituita da un insieme di telai trasversali costituiti da:

- **madiere:** lamiera o profilato a T di rinforzo del fondo;
- **costola:** profilato a bulbo o ad L di rinforzo del fianco;
- **baglio:** profilato a bulbo o ad L di sostegno del/dei ponti.

Tali telai sono posti ad opportuna distanza tra loro, detta **intervallo di ossatura**; ogni 3÷5 intervalli di ossatura viene inserita una ossatura rinforzata costituita da travi primarie.

In senso longitudinale vi sono solo travi principali a costituire telai rinforzati per conferire alla nave la necessaria robustezza flessionale. I vari elementi sono opportunamente collegati fra loro mediante squadre o strutture di raccordo.

Le ossature rinforzate sono caratterizzate dagli stessi elementi, ma di dimensioni maggiori (generalmente travi a T) che prendono il nome di:

- madiere rinforzato;
- costola rinforzata;
- baglio rinforzato.

Longitudinalmente si hanno:

- travi di rinforzo del fondo detti **paramezzali**;
- del ponte dette **anguille**.

In funzione della larghezza nave si possono avere più di una di queste travi rinforzate avendo così un paramezzale ed una anguilla centrale e uno o più paramezzali e anguille laterali. Queste travi si raccordano con gli elementi rinforzati verticali delle paratie stagne della nave, montanti rinforzati, a costituire uno o più anelli longitudinali.

2.7.3 Struttura prevalentemente longitudinale

L'esigenza di una struttura prevalentemente longitudinale nasce come conseguenza dell'aumento delle dimensioni ed in particolare della lunghezza della nave.

Le maggiori sollecitazioni di flessione longitudinale necessitano di un maggior numero di elementi strutturali che possano sopportare detti sforzi. La soluzione di adottare una struttura prevalentemente trasversale con un infittimento degli elementi longitudinali primari, presenta lo svantaggio di risultare assai pesante e di fatto inaccettabile. Nasce così una struttura con rinforzi ordinari longitudinali e solo ossature rinforzate, caso tipico delle navi cisterna.

La struttura ha come travi secondarie dei profilati posti longitudinalmente:

- **correnti** del fondo;
- **correnti** del cielo del doppio fondo (se presente);
- **correnti** del fianco;
- **correnti** del ponte.

Sempre in senso longitudinale si hanno un paramezzale ed una anguilla centrale ed uno o più paramezzali e anguille laterali come travi rinforzate. Trasversalmente, ogni 4÷5 intervalli di ossatura sono sistemate le ossature rinforzate costituite da elementi rinforzati.

Oggi la maggior parte delle navi è realizzata con questo tipo di struttura, fermo restando l'adozione della struttura trasversale in quelle zone della nave dove maggiori sono i carichi trasversali e concentrati (gavone di prua, gavone di poppa, locali destinati all'Apparato Motore).

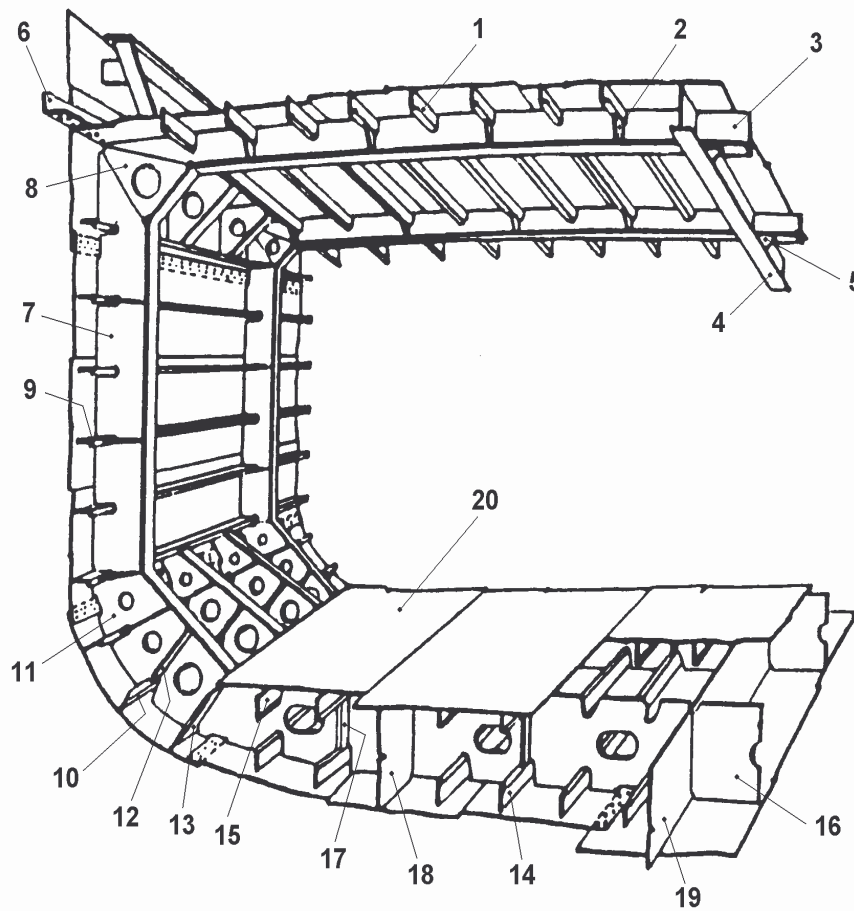


Figura 2.9

Sezione maestra di nave a struttura longitudinale con doppio fondo

- | | |
|---|---|
| 1 - corrente del ponte | 11 - squadra esterna marginale (collega la costola rinforzata con la lamiera del doppio fondo) |
| 2 - squadrette di collegamento del corrente con il baglio rinforzato | 12 - barrotto di irrigidimento della squadra esterna marginale |
| 3 - baglio rinforzato | 13 - lamiera esterna marginale |
| 4 - anguilla | 14 - corrente del fondo |
| 5 - squadretta di collegamento del baglio rinforzato con il ponte | 15 - corrente del cielo del doppio fondo |
| 6 - angolare di trincarino | 16 - madiere piano |
| 7 - costola rinforzata | 17 - barrotto di irrigidimento del madiere e di collegamento dei correnti con il madiere stesso |
| 8 - squadra di collegamento della costola rinforzata con il baglio rinforzato | 18 - paramezzale laterale |
| 9 - corrente di murata | 19 - paramezzale centrale |
| 10 - corrente di ginocchio | 20 - fasciame del cielo del doppio fond |

2.7.4 Struttura mista

La struttura mista è una struttura intermedia tra le precedenti; essa, infatti, presenta struttura prevalentemente longitudinale sul fondo e sotto il ponte, ma mantiene quella trasversale sui fianchi.

Tale struttura è nata con l'avvento delle grosse navi "bulk carriers" ed offre il vantaggio di avere una buona resistenza alla flessione per la presenza di elementi longitudinali nelle zone maggiormente sollecitate della nave, ma l'adozione di costole sui fianchi in modo da non intralciare lo stivaggio del carico solido alla rinfusa, per il loro limitato ingombro trasversale. Si avranno quindi **correnti longitudinali** come nel caso precedente e **costole ordinarie** ad ogni intervallo di ossatura.

L'ossatura rinforzata è al solito composta da madiere, costola e baglio rinforzato.

2.7.5 La struttura del fondo

Il fondo è uno degli elementi strutturali principali della nave in quanto si trova, come il ponte, alla maggiore distanza dalla mezzeria della sezione considerata e sopporta le massime sollecitazioni.

Tale struttura può essere:

- a **fondo semplice**;
- a **doppio fondo**;

a seconda delle dimensioni della nave e del carico trasportato.

Il fondo semplice si adotta su navi di piccole dimensioni, su gasiere ed in genere su tutte le navi in cui il tipo di carico non richiede stive di particolare forma.

Il doppio fondo, ormai largamente usato, si adotta qualora la movimentazione del carico richieda una stiva con fondo completamente piano; è il caso delle navi portarinfuse, delle portacontenitori, dei traghetti ecc.. Il doppio fondo inoltre consente di poter disporre di ampie casse e cisterne, dette "strutturali", per il contenimento di carichi liquidi (combustibile, acqua, olio, zavorra).

Per le navi militari costituisce, inoltre, un importante elemento di difesa passiva contro le esplosioni subacquee, falle ed incagli.

Il doppio fondo, oltre ai pregi già accennati, costituisce una struttura "scatolare", caratterizzata da una elevata resistenza sia alle sollecitazioni verticali dovute al carico che a quelle longitudinali. Il cielo del doppio fondo, infatti, costituisce un notevole apporto di materiale resistente posto ad elevata distanza dal centro nave.

2.7.6 La struttura del fianco

I fianchi, oltre a partecipare attivamente alla robustezza longitudinale della nave, devono sopportare il carico idrostatico e gli sforzi dovuti al carico imbarcato.

Per navi di piccole dimensioni generalmente si adottano rinforzi del fianco di tipo trasversale, mentre per le grosse navi cisterna o per le navi portacontenitori, caratterizzate da un doppio fianco, quelli longitudinali.

Il fasciame del fianco è costituito da più corsi di lamiera saldata.

2.7.7 Strutture di rinforzo e di sostegno dei ponti

Il ponte è l'elemento strutturale che sopporta le massime tensioni di trazione e di compressione in quanto situato generalmente alla massima distanza dal centro della sezione considerata.

Qualora sul ponte siano praticate aperture di piccole o grandi dimensioni come boccaporte, particolare cura deve essere posta nello studio della tipologia dei rinforzi, dei collegamenti e dei raccordi.

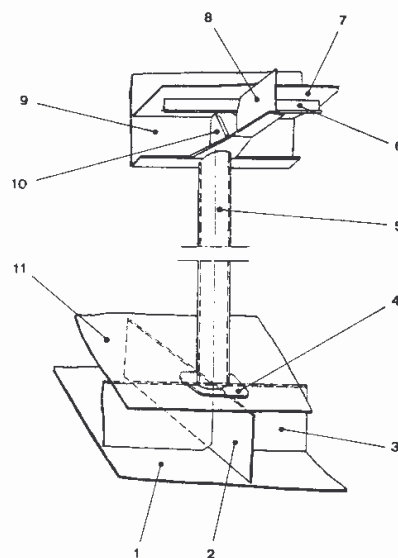
Uno dei particolari da realizzare con miglior cura è il collegamento **cinta-trincarino**; in tale zona di unione fra lamiere del ponte e del fianco si hanno infatti le massime tensioni di trazione/compressione e i massimi sforzi.

Tale collegamento può essere realizzato:

- saldando ad angolo le due lamiere;
- chiodando alla cinta un piatto saldato ad angolo al trincarino;
- saldando di testa al fianco ed al ponte una lamiera sagomata ad arco di cerchio, detta **coppo**.

Puntelli

Per aumentare la robustezza del ponte, scaricare i pesi verso il basso e diminuire la campata e quindi le dimensioni del baglio e dell'anguilla, al loro incrocio vengono sistemati dei puntelli.



- | | |
|--------------------------|-----------------------------|
| 1: lamiera del fondo; | 7: lamiera del ponte; |
| 2: paramezzale; | 8: anguilla; |
| 3: madiere; | 9: mastra della boccaporta; |
| 4: raddoppio di lamiera; | 10: squadra; |
| 5: puntello; | 11: cielo del d.f. |
| 6: baglio; | |

Figura 2.10

Essi devono essere sempre allineati con travi primarie e sono realizzati con tubi in acciaio o profilati a doppio T; pertanto sono sistemati in corrispondenza dell'incrocio fra baglio e anguilla e fra madiere e paramezzale. Il puntello non è direttamente saldato al diamante o al ponte, ma vi si interpone un raddoppio di lamiera in genere di forma circolare e di spessore maggiorato. Inoltre, per limitare i fenomeni di instabilità elastica

spesso vengono saldate al corpo del puntello delle squadrette verticali che lo collegano alle piattabande delle travi che esso sostiene.

2.7.8 Paratie stagne

Come è noto, per motivi di galleggiabilità, stabilità e sicurezza la nave è dotata di un certo numero di paratie stagne trasversali. Per le navi adibite al trasporto di carichi liquidi, inoltre, si hanno sempre paratie longitudinali, previste dalla convenzione Marpol '78.

Si tenga presente che lo spessore del fasciame e la dimensione dei rinforzi è decrescente verso il ponte superiore, in quanto il carico che deve sopportare la paratia è di tipo idrostatico.

Si possono indicare tre tipologie costruttive delle paratie stagne. A seconda della tipologia costruttiva, le pp. ss. possono essere:

- paratie a **montanti**;
- paratie a **correnti**;
- paratie **corrugate**.

2.7.9 Le strutture della prora

La prora costituisce una struttura particolarmente rinforzata della nave essendo soggetta a carichi dinamici ed impulsivi molto elevati.

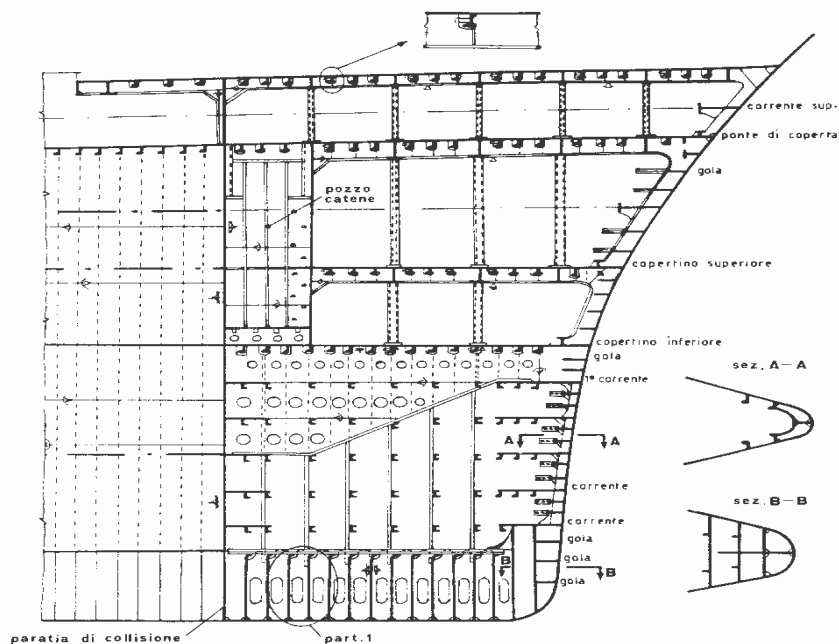


Figura 2.11

Tale struttura è delimitata da una paratia stagna detta **di collisione** a formare il cosiddetto **gavone di prora**, generalmente adibito a cella secca.

La paratia di collisione costituisce una struttura stagna che offre, in caso di urto prodiero, un ostacolo alla formazione di vie d'acqua nelle zone adiacenti della nave; per tale motivo essa è sempre presente e, nel caso di navi mercantili, deve essere posizionata

ad una distanza di circa il 5% della Lunghezza fra le Perpendicolari dalla Perpendicolare Avanti.

2.7.10 Le strutture della poppa

Così come la prua, la poppa è costituita da una struttura particolarmente rinforzata di tipo trasversale; essa infatti supporta le strutture di sostegno del timone e dell'elica, è soggetta alle vibrazioni create da quest'ultima e, nelle navi militari, talvolta alloggia apparecchiature A.S. ecc..

Questa zona della nave è delimitata verso prua da una paratia stagna chiamata **paratia del pressatrecce** e superiormente dal copertino del **locale agghiaccio** su cui viene sistemata la macchina/e del timone; tali paratie insieme al fasciame esterno delimitano il **gavone di poppa**.

La paratia del pressatrecce può coincidere con la paratia poppiera del locale A.M..

Il gavone è stagno e adibito a cella secca o a zavorra per l'assetto della nave o per garantire una idonea immersione dell'elica.

La struttura è trasversale con diaframmi rinforzati ad ogni ossatura.

2.7.11 Strutture nel locale A.M.

Il locale A.M. presenta una struttura rinforzata di tipo prevalentemente trasversale. Tali rinforzi, oltre a sopportare gli elevati carichi locali dovuti ai macchinari, devono garantire la massima rigidità alle sollecitazioni della trave nave, limitando il più possibile le deformazioni del fondo. Queste, infatti, potrebbero causare pericolosi disallineamenti, usura eccessiva delle parti in movimento e conseguenti malfunzionamenti. Per tale motivo il fondo del locale A.M. deve costituire una rigida fondazione per le macchine.

La struttura è trasversale a d.f., con madieri pieni ad ogni ossatura. I paramezzali sono in numero maggiore rispetto alle altre zone della nave ed in corrispondenza dei basamenti dei macchinari.

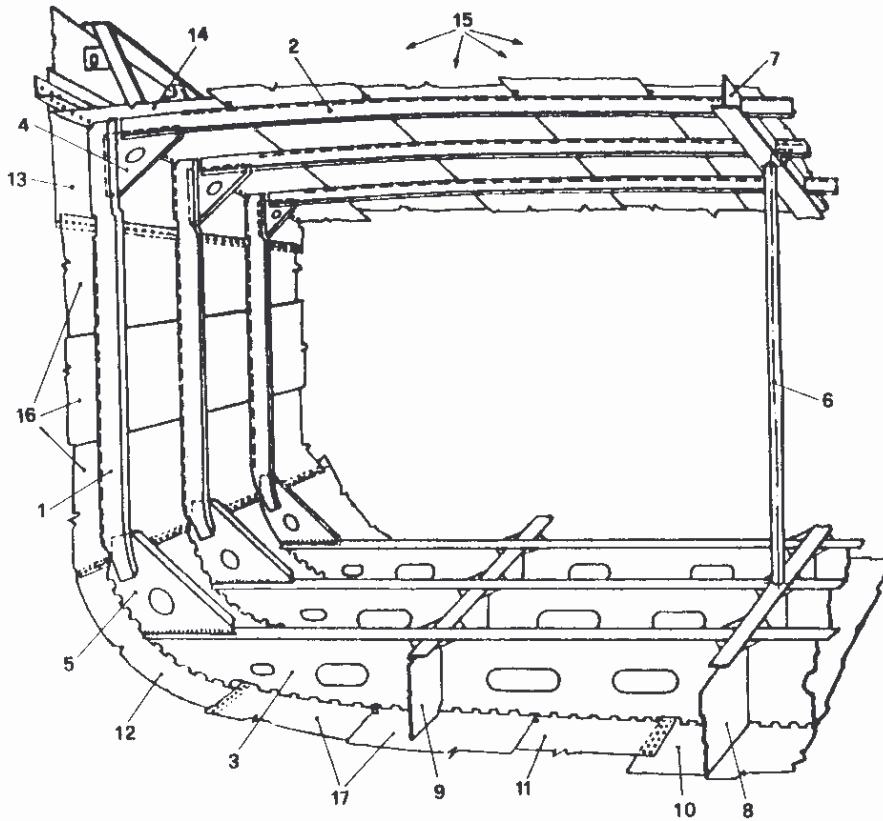
Il d.f. è adibito a **casse di servizio** e di riserva per tutti i combustibili, i lubrificanti ed i liquidi necessari ai macchinari sistemati nel locale. Spesso il d.f. è a scalini per consentire una idonea sistemazione e allineamento dei macchinari principali.

2.7.12 Il fasciame

Il fasciame costituisce l'involucro esterno stagno della nave. È realizzato saldando lamiere preventivamente tagliate e sagomate, l'una accanto all'altra, a costituire **corsi** disposti longitudinalmente. Partendo dalla mezzeria del fondo della nave fino al ponte, avremo:

- lamiera di **chiglia**;
- 1° corso di lamiera adiacente alla chiglia, detto **torello**;
- 2° corso, detto **controtorello**;
- corsi di fasciame del fondo (3°, 4°, 5° ecc. corso del fondo);
- lamiera/e del **ginocchio**;
- 1°, 2°, 3° ecc. corso del fianco;
- penultimo corso del fianco, detto **sottocinta**;
- ultimo corso di lamiera del fianco, detto **cinta**;
- 1°, 2°, 3° ecc. corso del ponte, dalla mezzeria nave;

- ultimo corso di lamiera del ponte saldato o chiodato alla cinta, detto **trincarino**.



SEZIONE MAESTRA DI UNA NAVE A FONDO SEMPLICE A STRUTTURA TRASVERSALE.

- | | |
|-------------------------------|--------------------------|
| 1 - costola | 10 - chiglia |
| 2 - baglio | 11 - toreello |
| 3 - madiere | 12 - ginocchio |
| 4 - squadra o bracciolo | 13 - cinta |
| 5 - squadra esterno-marginale | 14 - trincarino |
| 6 - puntello | 15 - fasciame del ponte |
| 7 - anguilla | 16 - fasciame del fianco |
| 8 - paramezzale centrale | 17 - fasciame del fondo |
| 9 - paramezzale laterale | |

Figura 2.12

Appendice 1

Calcolo vettoriale

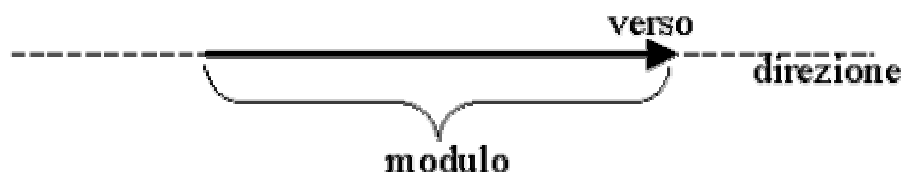
DEFINIZIONI

Si definisce **SCALARE** una quantità completamente determinata dalla sua grandezza: ad esempio il tempo, il volume, la massa, la densità di un corpo, una certa quantità di lavoro, una certa quantità di denaro. Gli scalari si sommano con il normale metodo algebrico, ad esempio $2 + 5 = 7$.

Si definisce **VETTORIALE** una quantità che deve essere definita da: modulo, direzione e verso come per esempio lo spostamento, la velocità, ecc. Spostamento -100 Km (modulo), Livorno- Roma (direzione), verso Roma (verso). Il simbolo che differenzia un vettore da uno scalare è un freccia o un segmento sopra la lettera che lo definisce:

$$A = \text{scalare} \qquad \vec{A} \text{ oppure } \overline{A} = \text{vettore}$$

Le quantità vettoriali vengono rappresentate da una freccia disegnata in scala opportuna. La lunghezza della freccia rappresenta il modulo considerato. La retta su cui giace la freccia rappresenta la direzione e la punta della freccia il verso.



I vettori si sommano seguendo principi geometrici.

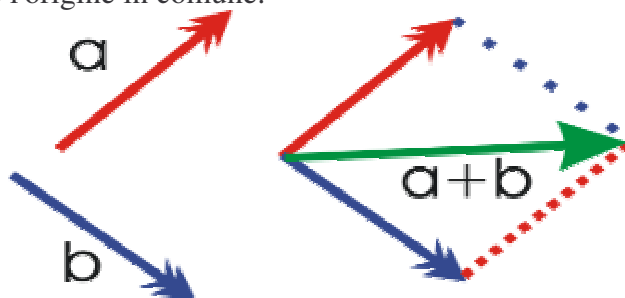
RISULTANTE di un certo numero di vettori è quel singolo vettore che ha lo stesso effetto su di un corpo dell'insieme dei vettori iniziali.

OPERAZIONI VETTORIALI

SOMMA DI VETTORI

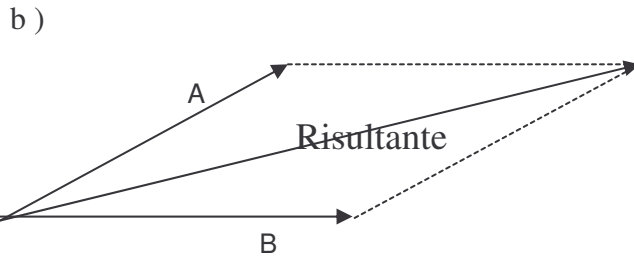
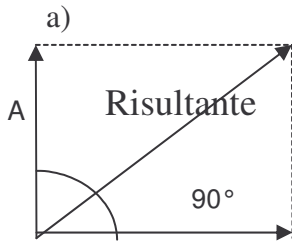
Metodo del parallelogramma

Il vettore risultante è rappresentato dalla diagonale del parallelogramma costruito per mezzo dei segmenti orientati rappresentativi dei due vettori e disposti in modo da avere l'origine in comune.

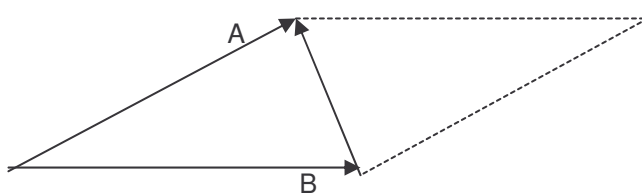


ESEMPIO:

Trovare la risultante di due vettori \vec{A} e \vec{B} agenti su di un punto O e formanti tra di loro un angolo di a) 90° e b) angolo qualunque.



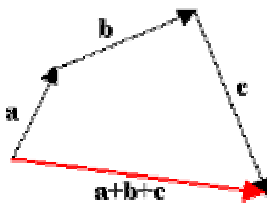
Corretto : la diagonale deve partire dall'origine dei due vettori .



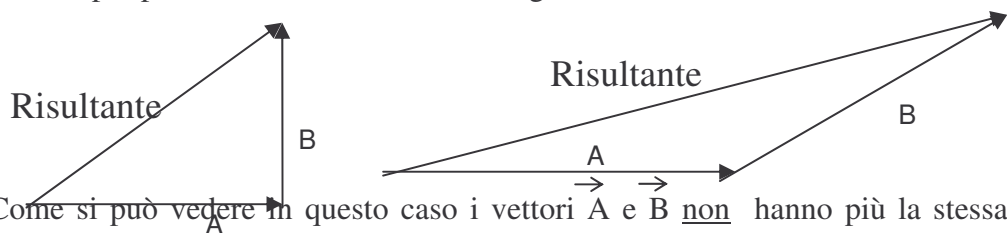
Errato!!
La diagonale non è uscente dall'origine dei due vettori.

Metodo del poligono

Questo metodo per *trovare il risultante* consiste nel disegnare in scala un vettore e poi tutti gli altri che gli devono essere sommati, in una qualunque successione. La prima estremità della freccia con cui viene rappresentato un vettore viene disegnata nel punto in cui termina la freccia del vettore precedente. La linea tracciata per completare il poligono che in tal modo si forma è uguale in modulo al risultante.

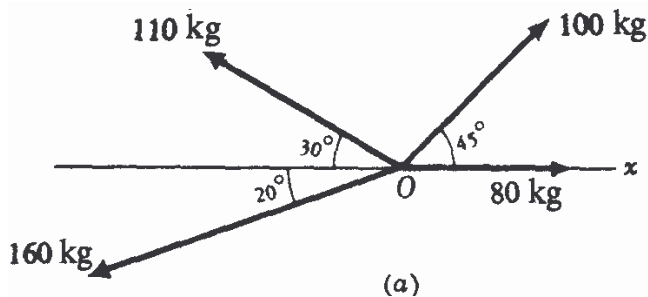


L' esempio precedente viene risolto nel seguente modo :

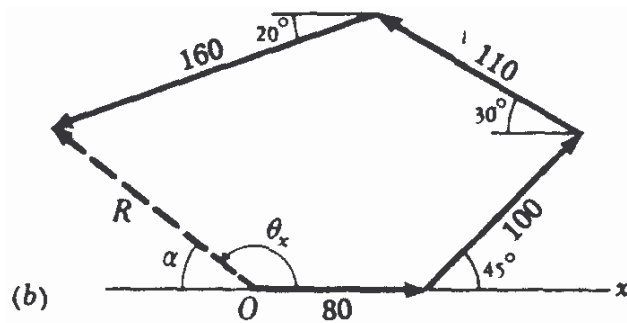


Come si può vedere in questo caso i vettori A e B non hanno più la stessa origine ma sono composti .

Questo metodo è molto utile per determinare il risultante di più vettori.
 Altro esempio:

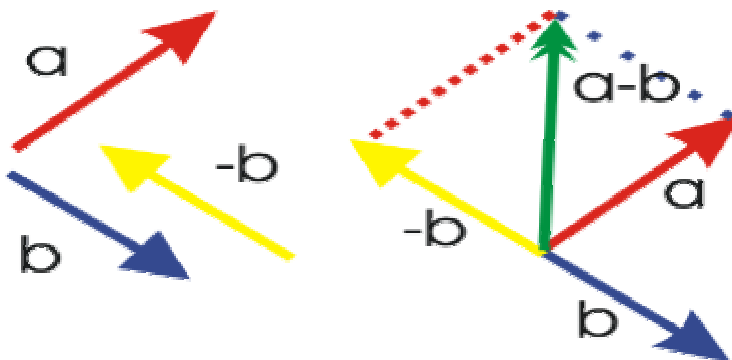


Partendo da O vengono tracciati i quattro vettori uno dopo l'altro, in modo che la freccia (la punta) di un vettore coincida con la coda del vettore successivo. Il vettore \vec{R} che unisce la coda del primo vettore con la freccia dell'ultimo vettore è la risultante..



SOTTRAZIONE DI VETTORI.

Per sottrarre il vettore \vec{b} dal vettore \vec{a} bisogna **invertire** il verso del vettore \vec{b} e sommarlo poi vettorialmente al vettore \vec{a} , cioè $\vec{a} - \vec{b} = \vec{a} + (-\vec{b})$.



Esempio: vettori paralleli





PRODOTTI VETTORIALI

Moltiplicazione di un vettore per uno scalare.

Dato uno scalare s (numero reale) e un vettore \vec{a} è possibile definire una nuova operazione tale da associare a questi due un altro vettore.

Se moltiplichiamo un numero reale s per un vettore \vec{a} otteniamo un vettore che ha come modulo il prodotto $s|\vec{a}|$, per direzione la stessa direzione di \vec{a} e come verso lo stesso di \vec{a} se $s > 0$, opposto a quello di \vec{a} se $s < 0$.

Prodotto scalare di due vettori.

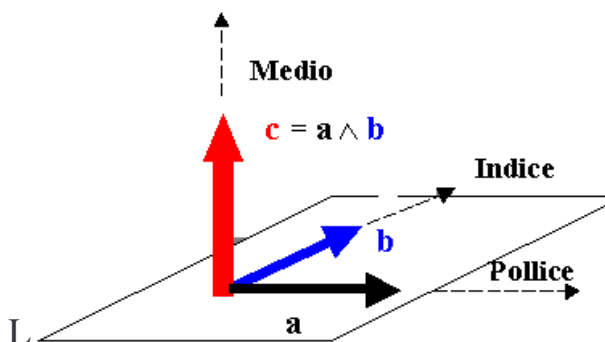
Il prodotto scalare (o interno) di due vettori \vec{a} e \vec{b} , indicato con $\vec{a} \cdot \vec{b}$, è il prodotto dei moduli dei due vettori moltiplicato per il *coseno* dell'angolo da essi formato: $\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cos \alpha$.

Osservazione: *il prodotto scalare di due vettori è un numero.*

Prodotto vettoriale di due vettori

Si definisce prodotto vettoriale (o esterno) di due vettori non nulli \vec{a} e \vec{b} , né paralleli, indicato con $\vec{a} \wedge \vec{b}$, il vettore che ha per direzione la perpendicolare al piano individuato da \vec{a} e \vec{b} , per modulo il prodotto dei moduli dei due vettori moltiplicato per il *seno* dell'angolo da essi formato e verso definito dalla regola della mano destra: $\vec{a} \wedge \vec{b} = |\vec{a}| |\vec{b}| \sin \alpha$.

- **"Regola della mano destra":** *se il pollice della mano destra indica il verso del primo vettore (\vec{a}) che costituisce il prodotto esterno e l'indice il verso del secondo vettore (\vec{b}), allora il dito medio, disposto ortogonalmente al palmo della mano, indica il verso del vettore prodotto esterno (\vec{c})" (vedi figura);*



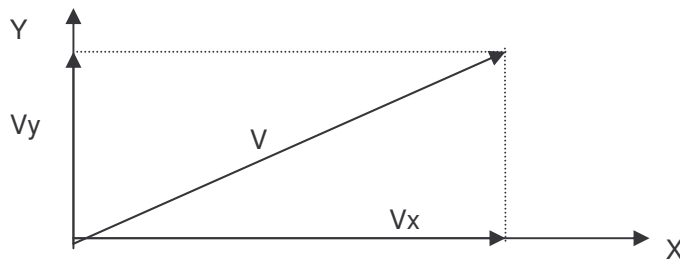
Osservazioni:
 il prodotto vettoriale di due vettori è un vettore;
 il prodotto vettoriale di due vettori non nulli è nullo se e solo se i vettori sono tra loro paralleli.

Considerando un qualsiasi sistema di riferimento : ad esempio il piano cartesiano (x;y) o lo spazio (x;y;z) , è possibile scomporre qualunque vettore nelle componenti parallele alle direzioni considerate.

Per esempio, la componente orizzontale di un vettore è il suo effettivo valore in tale direzione.

Esempio:.

Nel piano cartesiano (X;Y) il vettore V ha due componenti : una nella direzione X e l'altra nella direzione Y



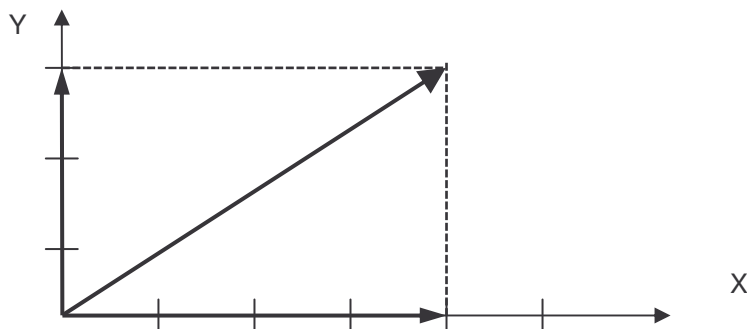
N.B.

Il vettore viene quindi usualmente definito tramite le sue componenti che sono **grandezze scalari**.

Per definire tutte le grandezze di un vettore è sufficiente la seguente notazione:

$$\vec{V}=(V_x;V_y)=(4;3)$$

Il vettore ha componenti che **valgono** 4 e 3 unità,hanno **direzione** lungo gli assi X e Y e il loro **verso** è concorde con quello degli assi



Il modulo di tale vettore è facilmente calcolabile tramite teoremi elementari (teorema di Pitagora)

$$\text{Modulo} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = \sqrt{4^2 + 3^2} = \sqrt{16 + 9} = \sqrt{25} = 5$$

N.B.

Un vettore si può considerare come il risultante di due o più vettori componenti
Questo modo di rappresentare un vettore è usato spesso e molto utilmente per scomporlo in componenti fra loro perpendicolari.

Il vettore dell'esempio precedente può essere considerato :

a) $\vec{V} = (V_x; V_y) = (4; 3)$

In questo caso V_x e V_y rappresentano due grandezze scalari

b) Come somma di due vettori con componenti parallele all'asse X e Y

Ovvero :

$$\vec{V} = \vec{V}_x + \vec{V}_y = (4; 0) + (0; 3) = (4; 3)$$

In questo secondo caso risulta evidente dalla notazione che V_x e V_y sono grandezze vettoriali.

Per scomporre il vettore lungo le sue componenti è sufficiente conoscere nozioni elementari di trigonometria , (vds Appendice 3) infatti un vettore viene considerato come ipotenusa di un triangolo rettangolo i cui cateti sono esattamente le sue componenti nelle direzioni principali.

Note le definizioni di seno e coseno si può trovare il valore delle componenti se si conoscono modulo, direzione e verso del vettore in considerazione.

Appendice 2

Equilibrio dei corpi rigidi

DEFINIZIONI

Forza

La forza è quella causa esterna che produce sul corpo su cui agisce una variazione del suo stato di quiete o di moto, oppure varia la sua conformazione geometrica.

La forza è una grandezza vettoriale e viene rappresentata con un vettore. Per definire una forza bisogna indicare:

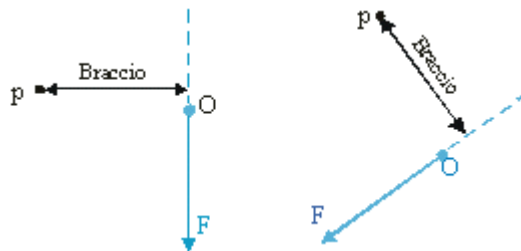
- l'*intensità* che ne definisce la grandezza;
- la *retta d'azione* che ne definisce la retta lungo la quale essa agisce;
- il *verso* che ne definisce l'orientamento;
- il *punto d'applicazione* che definisce il punto in cui viene applicata.

L'unità di misura della forza nel sistema di misure SI è il newton (N); Nel sistema di misura tecnico, invece, viene adottato come unità di misura il Kilogrammo-forza.

Momento di una forza rispetto ad un punto

Il momento di una forza è quella causa esterna che provoca la rotazione di un corpo rispetto ad un punto P chiamato "polo".

Per calcolare il momento M di una forza rispetto ad un punto P , è necessario definire il braccio (b) della forza che si ottiene tracciando la perpendicolare dal punto P alla linea d'azione della forza:



Il momento è il prodotto dell'intensità della forza per il braccio:

$$M = F \times b \Rightarrow F = \frac{M}{b} \Rightarrow b = \frac{M}{F}$$

Forza e braccio sono inversamente proporzionali, perciò più lungo è il braccio meno intensa sarà la forza da applicare per avere lo stesso momento. L'unità di misura del momento è il Newton per metro (Nm), essendo il prodotto di una forza per una distanza.

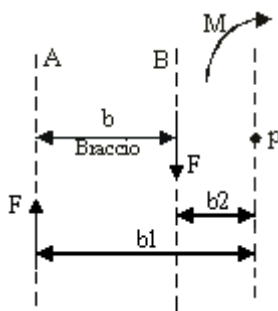
Per convenzione, il momento si definisce positivo quando la rotazione si compie in senso orario; negativo quando la rotazione si compie in senso antiorario.

N.B.

Il momento è un prodotto vettoriale !!(per il prodotto vettoriale vds. Appendice 1)

Momento di una coppia di forze

Un sistema di forze formato da due forze di uguale intensità ma di verso contrario, costituisce una coppia. Il braccio di una coppia di forze corrisponde alla distanza fra le linee di azione delle forze.



Infatti $b=b_1-b_2$

Il momento della forza rispetto al polo P che agisce lungo la retta A è $M_{(A)} = F \times b_1$ (positivo);

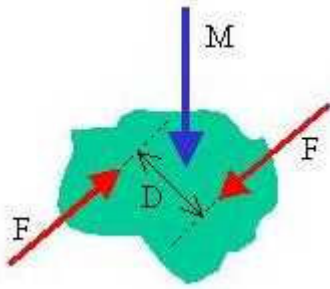
Il momento della forza che agisce lungo la retta B è

$$M_{(B)} = F \times b_2 \text{ (negativo);}$$

Momento della coppia rispetto al punto P

$$M = M_{(A)} - M_{(B)} = F \times b_1 - F \times b_2 = F \times (b_1 - b_2) = F \times b \text{ (positivo).}$$

N.B. Una coppia produce solo rotazione.



CONDIZIONI DI EQUILIBRIO

Per un corpo rigido a cui sono applicate diverse forze F_1, F_2, F_i le condizioni di equilibrio impongono che la sommatoria delle forze e dei momenti risultino uguali a zero:

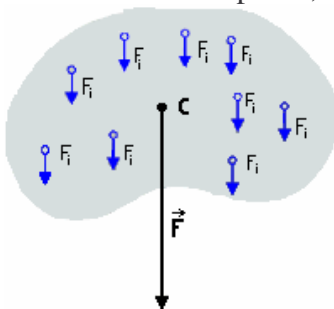
$$\mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \dots + \mathbf{F}_i = \mathbf{0}$$

$$M_1 + M_2 + \dots + M_i = 0$$

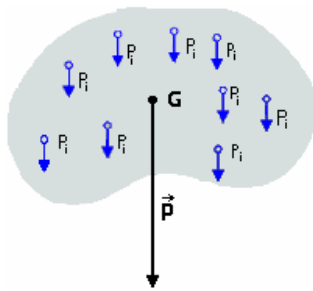
Definizione di baricentro

Nel campo dell'Architettura Navale è necessario introdurre il concetto di **baricentro** ovvero il punto in cui si può immaginare concentrata l'intera massa del corpo.

La sua determinazione serve a semplificare gli effetti delle forze applicate, infatti mentre ogni punto del corpo è soggetto a forze (inerziali) è possibile semplificare il quadro facendo l'ipotesi, del tutto equivalente, che la risultante di tutte queste forze sia concentrata in un unico punto, che è appunto il baricentro



Si definisce allo stesso modo il **centro di gravità** come quel punto in cui si concentra il peso del corpo.



G = Baricentro

Basterà una singola forza diretta lungo la direzione di P, uguale in modulo al peso del corpo ma di verso contrario, a mantenere il corpo in equilibrio.



G = Baricentro
P = Forza peso
S = P

MOMENTO D' INERZIA

L'inerzia è quella proprietà di una grandezza fisica (volume , massa , area..) che tende ad opporsi alle variazioni dello stato di quiete o di moto in cui si trova la grandezza stessa.

L'esempio tipico è quello dell'automobile che si muove di moto rettilineo uniforme .Se applichiamo una forza frenante il veicolo non si ferma istantaneamente e questo è causato dall'inerzia propria dell'autovettura.

Definita l'inerzia , il **momento d'inerzia** è la misura della resistenza ad ogni variazione della velocità angolare, ed è dato dalla somma dei singoli elementi del sistema ,moltiplicato per il quadrato della loro distanza da un asse di rotazione baricentrico.

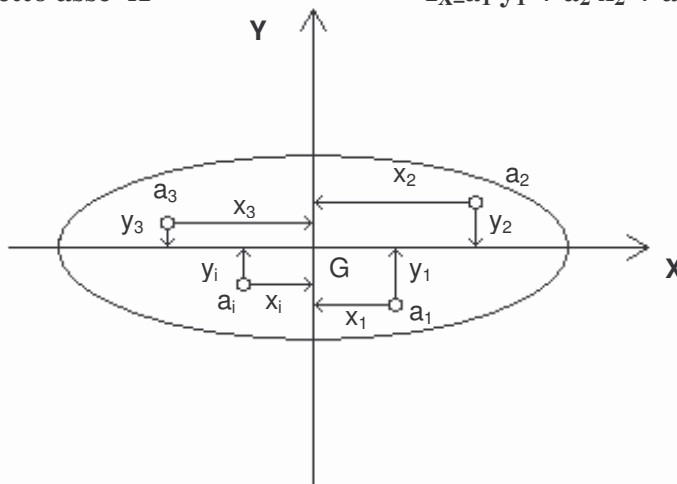
Esempio:

Consideriamo una figura di area qualunque; essa può essere vista come somma di i elementi che chiameremo $a_1 a_2 a_3 a_i$ distanti rispettivamente $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i$ dall' asse Y e $y_1, y_2, y_3, \dots, y_i$ dall'asse X. Il momento d'inerzia I della figura rispetto agli assi X e Y sarà uguale alla sommatoria di singoli momenti d'inerzia relativi alle aree a_i .

Rispetto asse Y
Rispetto asse X

$$I_Y = a_1 x_1^2 + a_2 x_2^2 + a_3 x_3^2 + \dots + \sum a_i x_i^2$$

$$I_X = a_1 y_1^2 + a_2 y_2^2 + a_3 y_3^2 + \dots + \sum a_i y_i^2$$



Appendice 3

Elementi di trigonometria

DEFINIZIONI

Le funzioni trigonometriche più usate sono seno, coseno e tangente. E' utile esprimere le definizioni di queste funzioni per un angolo in termini dei lati di un triangolo rettangolo.

In qualunque triangolo rettangolo:

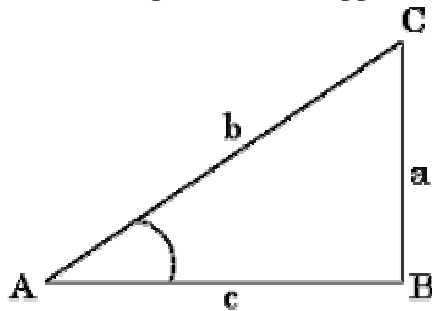
il **seno** di ciascuno dei due angoli acuti è uguale alla lunghezza del cateto opposto all'angolo divisa per la lunghezza dell'ipotenusa.

il **coseno** di ciascuno dei due angoli acuti è uguale alla lunghezza del cateto adiacente all'angolo divisa per la lunghezza dell'ipotenusa.

la **tangente** di ciascuno dei due angoli acuti è uguale alla lunghezza del lato opposto all'angolo divisa per la lunghezza del lato adiacente all'angolo.

Dalle definizioni viste sopra:

Se A, B e C sono i vertici di un qualunque triangolo rettangolo (\sphericalangle è l'angolo retto) e a, b e c ne sono i lati rispettivamente opposti, come indicato in figura, allora



AC = ipotenusa

BC = cateto

AB = cateto

$$\text{sen } \alpha = \frac{BC}{AC} = \frac{a}{b}$$

$$\text{cos } \alpha = \frac{AB}{AC} = \frac{c}{b}$$

$$\text{tg } \alpha = \frac{BC}{AB} = \frac{a}{c}$$

$$\text{sen } \beta = \frac{AB}{AC} = \frac{c}{b}$$

$$\text{cos } \beta = \frac{BC}{AC} = \frac{a}{b}$$

$$\text{tg } \beta = \frac{AB}{BC} = \frac{c}{a}$$

N.B.

Si osservi che il seno e il coseno possono assumere solo valori compresi tra -1 e +1

La tangente assume valori compresi tra $-\infty$ e $+\infty$

Si osservi che $\text{sen } \sphericalangle = \text{cos } \sphericalangle$; quindi il seno di qualunque angolo è uguale al coseno del suo angolo complementare.

Ad esempio,

$$\text{sen } 30^\circ = \text{cos } (90^\circ - 30^\circ) = \text{cos } 60^\circ \text{ e}$$

$$\text{cos } 50^\circ = \text{sen } (90^\circ - 50^\circ) = \text{sen } 40^\circ.$$

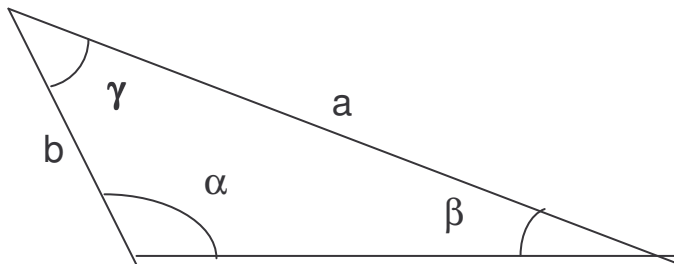
Mentre un angolo aumenta da 0° a 90° , il valore del seno passa da 0 a 1, la sua tangente aumenta da 0 a infinito e il suo coseno decresce da 1 a 0.

Vediamo alcune relazioni fondamentali:

$\cos 30^\circ = \frac{AB}{AC} = \frac{\frac{L}{2}}{L} = \frac{1}{2}$ $\cos 60^\circ = \frac{AB}{AC} = \frac{L}{2L} = \frac{1}{2}$ $\sin 30^\circ = \frac{BC}{AC} = \frac{\frac{L\sqrt{3}}{2}}{L} = \frac{\sqrt{3}}{2}$ $\sin 60^\circ = \frac{BC}{AC} = \frac{L}{\frac{2L}{\sqrt{3}}} = \frac{\sqrt{3}}{2}$ $\tan 30^\circ = \frac{\sin 30^\circ}{\cos 30^\circ} = \frac{\frac{1}{2}}{\frac{\sqrt{3}}{2}} = \frac{1}{\sqrt{3}}$ $\tan 60^\circ = \frac{\sin 60^\circ}{\cos 60^\circ} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2}}{\frac{1}{2}} = \sqrt{3}$	
$\cos 45^\circ = \frac{AB}{AC} = \frac{\frac{L}{\sqrt{2}}}{L} = \frac{\sqrt{2}}{2}$ $\sin 45^\circ = \frac{BC}{AC} = \frac{\frac{L}{\sqrt{2}}}{L} = \frac{\sqrt{2}}{2}$ $\tan 45^\circ = \frac{\sin 45^\circ}{\cos 45^\circ} = 1$	

LEGGE DEI SENI E DEI COSENI

Queste due leggi assegnano le relazioni che legano i lati e gli angoli di *qualsunque* triangolo piano. In qualunque triangolo piano di angoli α, β, γ e lati rispettivamente opposti a, b, c , sono valide le seguenti relazioni:



$$\text{Legge dei seni} = \frac{a}{\sin \alpha} = \frac{b}{\sin \beta} = \frac{c}{\sin \gamma}$$

$$\text{Ovvero} = \frac{a}{b} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}, \quad \frac{b}{c} = \frac{\sin \beta}{\sin \gamma}, \quad \frac{a}{c} = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma}$$

Legge dei coseni.

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos \alpha$$

$$b^2 = a^2 + c^2 - 2ac \cos \beta$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \gamma$$

Se l'angolo α è compreso fra 90° e 180° , come nel caso dell'angolo C della figura sopra, allora

$$\sin \alpha = \sin (180^\circ - \theta)$$

$$\cos 0^\circ = -\cos (180^\circ - \theta).$$

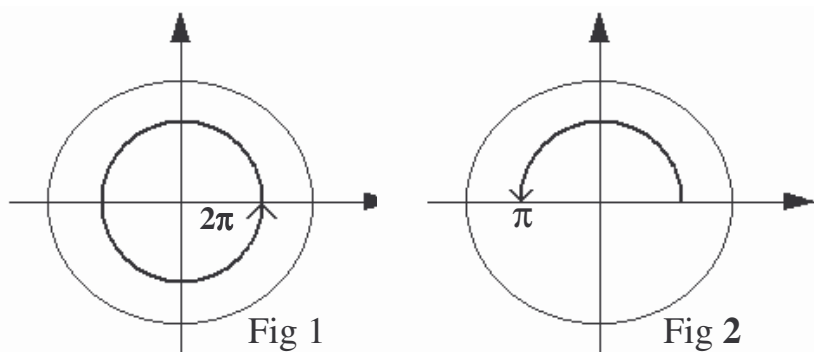
Quindi $\sin 120^\circ = \sin (180^\circ - 120^\circ) = \sin 60^\circ = 0,866$

e $\cos 120^\circ = -\cos (180^\circ - 120^\circ) = -\cos 60^\circ = -0,500$.

AMPIEZZA DEGLI ANGOLI ESPRESSA IN RADIANTI





In fisica risulta più agevole misurare l'ampiezza degli angoli in radianti, ossia associare ad ogni angolo la lunghezza dell'arco di circonferenza di raggio unitario e con centro nell'origine dell'angolo sotteso dallo stesso angolo. In tale definizione l'angolo piatto non misura 180° ma π radianti.

Per quanto sopra all'angolo di 360° (o angolo giro) è associata l'intera circonferenza per cui $C=2\pi R$ e ponendo $R=1$ $C=2\pi$ radianti. (fig 1)



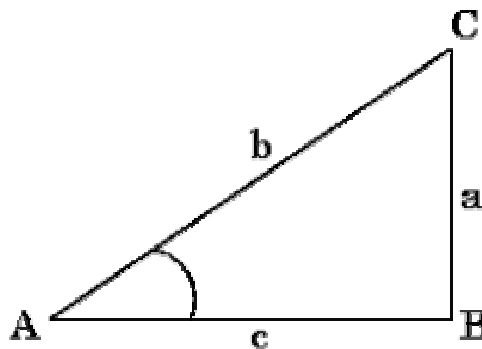
All'angolo 180° è associata metà circonferenza per cui $(1/2) 2\pi = \pi$ radianti (fig 2)

Essendo direttamente proporzionali gli angoli al centro con i corrispettivi archi di circonferenza avremo:

Angoli	Gradi	Radianti
	90°	$\pi/2$
	60°	$\pi/3$
	45°	$\pi/4$
	30°	$\pi/6$

RELAZIONI FONDAMENTALI

Dal teorema di Pitagora si ricava:



$$AB^2 + BC^2 = AC^2$$

quindi:

$$\frac{CB^2}{AC^2} + \frac{AB^2}{AC^2} = 1$$

Dalla definizione:

$$(\text{sen } \alpha)^2 + (\text{cos } \alpha)^2 = 1$$

Per consuetudine:

$$\text{sen}^2 \alpha + \text{cos}^2 \alpha = 1$$