

# CARICHI STRUTTURALI DELLA NAVE: VALUTAZIONE DETERMINISTICA (prima parte)

Alberto ALBERT \*

*\* Ingegnere Navale, Libero Professionista, Consulente e Collaudatore; esperto strutturale del Comitato Tecnico Amministrativo del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti; esperto "off-shore" e ferroviario del Registro Italiano Navale; Esercitatore di "Tecnica delle Costruzioni" presso la Facoltà di Architettura dell'Università di Genova; Esercitatore di "Costruzioni Navali" presso il Dipartimento di Ingegneria Navale dell'Università di Genova*

## CLASSIFICAZIONE DEI CARICHI

È conveniente dividere i carichi che agiscono sulla struttura della nave in quattro categorie, come esposto di seguito, dove le categorie sono definite in parte sulla natura del carico ed in parte sulla natura della risposta della nave:

- carichi statici;
- carichi dinamici a bassa frequenza;
- carichi dinamici ad alta frequenza;
- carichi d'urto.

### Carichi statici

I carichi statici sono carichi che cambiano soltanto quando cambia il peso totale della nave, come conseguenza della caricazione o della scaricazione, del consumo di combustibile, o per la modifica della nave stessa:

- 1) peso della nave e del relativo contenuto;
- 2) spinta statica della nave a riposo od in movimento;
- 3) carichi termici derivanti da gradienti di temperatura non lineari all'interno dello scafo;
- 4) carichi concentrati causati dallo stoccaggio in bacino o da arenamento.

### Carichi dinamici a bassa frequenza

I carichi dinamici a bassa frequenza sono carichi che variano nel tempo con periodi che vanno da alcuni secondi a parecchi minuti e quindi si presentano a frequenze che sono sufficientemente basse se confrontate con le frequenze delle risposte di vibrazione dello scafo e dei suoi componenti. Non c'è amplificazione in risonanza apprezzabile delle tensioni indotte nella struttura. I carichi sono denominati dinamici perché hanno origine principalmente dall'azione delle onde per mezzo delle quali la nave si muove e, quindi, cambiano sempre con il tempo. Possono essere analizzati nei seguenti componenti:

- 1) variazioni di pressione sullo scafo indotte dalle onde;
- 2) variazioni di pressione sullo scafo causate dai movimenti oscillatori della nave;
- 3) reazioni inerziali risultanti dall'accelerazione della massa della nave e del relativo contenuto.

### Carichi dinamici ad alta frequenza

I carichi dinamici ad alta frequenza sono carichi variabili nel tempo con frequenze sufficientemente alte che possono indurre risposta di risonanza nella struttura della nave. Alcuni dei carichi eccitanti possono essere abbastanza piccoli nella grandezza ma, come conseguenza dell'amplificazione in risonanza, possono provocare grandi sforzi e deformazioni. Gli esempi di tali carichi dinamici sono i seguenti:

- 1) carichi idrodinamici indotti dagli apparati di propulsione sullo scafo o sulle appendici;
- 2) carichi comunicati allo scafo da macchinari rotanti sbilanciati o contrapposti;
- 3) carichi idroelastici causati dall'interazione delle appendici con il flusso fluido di poppa;
- 4) carichi indotti dalle onde dovuti essenzialmente alle onde corte la cui frequenza d'incontro coincide con la frequenza naturale più bassa dello scafo e che, quindi, possono eccitare un'apprezzabile risposta di risonanza, chiamata "springing".

### Carichi d'urto

I carichi d'urto sono carichi che derivano dallo sbattimento della prua o dall'urto d'onda sul fondo, sulle sovrastrutture di prua o su altre parti della struttura dello scafo, compresi gli effetti per l'acqua imbarcata sulla coperta "green water". In una nave militare, gli effetti delle armi costituiscono una categoria molto importante di carichi d'urto. I carichi d'urto possono indurre vibrazioni transitorie dello scafo chiamate "whipping".

Le più importanti categorie dei carichi sono i carichi statici derivanti dal peso e dalla spinta della nave (categorie 1) e 2)), ed i carichi dinamici a bassa frequenza (categorie 1), 2) e 3)). Nelle sezioni seguenti, l'attenzione sarà dedicata principalmente sui metodi correntemente in uso per la determinazione di questi carichi, con la breve discussione sui carichi d'urto, d), e sui carichi dinamici ad alta frequenza "springing", 4), che sono solitamente considerati importanti in navi flessibili e molto lunghe.

Oltre alle suddette categorie, ci possono essere carichi operativi speciali, che parte o tutta la struttura può essere invitata a sostenere, e che possono essere i carichi dominanti per alcune navi. Questi carichi, che possono essere statici o dinamici, non sono stati considerati in questa discussione. Alcuni esempi sono:

- carico dovuto al ghiaccio nel caso di una imbarcazione destinata a rompere il ghiaccio o alla navigazione artica;
- carichi causati dall'urto con altre imbarcazioni, pontili o altri ostacoli, come nel caso di rimorchiatori o pontoni;
- impatto dell'apparecchiatura di maneggio del carico, quali le gru a benna o le coperture delle boccaporte utilizzate nello scarico dei prodotti all'ingrosso;
- carichi termici strutturali imposti da carichi speciali trasportati alla temperatura o alla pressione differenti da quella ambientale;
- carichi di sbattimento o d'urto sulle strutture interne causate dal movimento dei liquidi nelle casse;
- atterraggio di velivoli od elicotteri;
- carichi accidentali causati da collisione o arenamento.

Come può essere dedotto dalle descrizioni sommarie presentate innanzi, alcuni di questi carichi possono essere importanti per tutte le navi ed altri carichi possono essere incontrati soltanto in navi specializzate od in particolari circostanze.

### CARICO STATICO SU UNA NAVE GALLEGGIANTE IN ACQUA TRANQUILLA

I carichi statici che agiscono su una nave galleggiante in acqua tranquilla consistono di due componenti: forze di spinta e forze di gravità, o pesi.

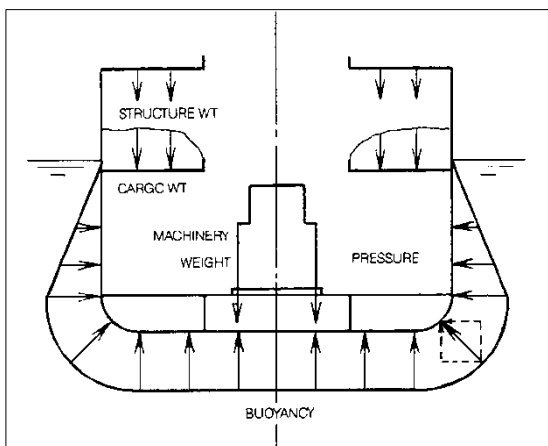


Figura 1

La spinta è la risultante della distribuzione delle pressioni idrostatiche sulla superficie esterna ed immersa della nave. Questa pressione è una forza di superficie la cui direzione è sempre normale allo scafo. La forza di spinta è, quindi, la risultante perpendicolare alla superficie dell'acqua ed diretta verso l'alto. I pesi sono le forze delle masse distribuite della nave e dei suoi contenuti ed il senso di tali forze peso è sempre verticale verso il basso. Questo sistema di componenti delle forze agenti è illustrato schematicamente nella Figura 1.

Se integriamo le pressioni locali di spinta lungo un'unità di lunghezza intorno ad una sezione trasversale in una data posizione longitudinale, la risultante è una forza verticale di spinta per unità di lunghezza la cui intensità è data da  $\rho \cdot g \cdot A$  dove  $\rho \cdot g$  è la densità di peso dell'acqua ( $\rho$  è la densità di massa, o massa per unità di volume) ed  $A$  è l'area della sezione immersa. Similmente, possiamo sommare insieme tutti i pesi contenuti in un'unità di lunghezza della nave, nella stessa sezione già considerata, ottenendo un peso totale per unità di lunghezza.

Il peso strutturale netto per unità di lunghezza è la somma algebrica della spinta e del peso per unità di lunghezza. Per convenienza, quando sono usate le unità S.I. tutti i carichi – sia di spinta che di peso - possono essere espressi in termini di massa. I carichi individuali possono avere effetti strutturali sia locali che globali.

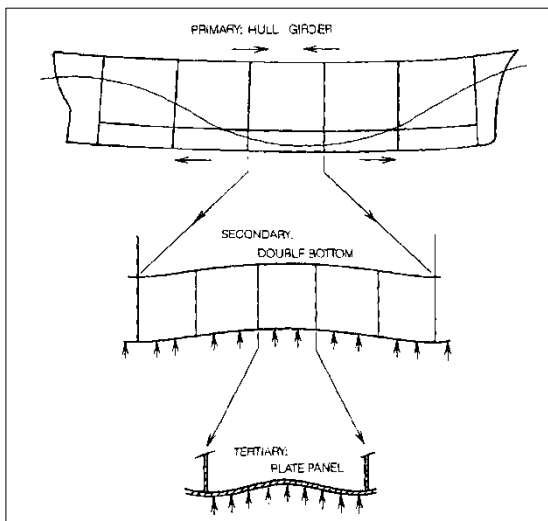


Figura 2

Un macchinario molto pesante induce carichi localizzati molto intensi nei relativi punti di connessione alla nave e le sue fondazioni possono essere progettate per distribuire anche questi carichi nella struttura dello scafo. Allo stesso tempo, il peso di questo macchinario contribuisce alla distribuzione delle forze di taglio e dei momenti flettenti agendo in tutte le posizioni lungo lo scafo. Se una parte del contenuto della nave è composto dai liquidi, per esempio combustibile o carico liquido, là ci saranno forze idrostatiche di pressione esercitate da tali liquidi e che saranno normali alle superfici perimetrali delle casse entro le quali questi saranno contenuti. Questi carichi di pressione interni possono avere importanti effetti strutturali locali e devono essere considerati quando si progettano le paratie e gli elementi di confinamento delle casse.

La disposizione geometrica e l'andamento risultante sia dello stato tensionale che flessionale di una tipica struttura navale sono tali che è solitamente conveniente dividere la struttura e la relativa risposta in tre componenti, che sono identificati come primari, secondari e terziari (Figura. 2).

Tali componenti sono descritte come segue:

- risposta primaria è la risposta dell'intero scafo quando si flette e si torce come una trave, sotto la distribuzione longitudinale esterna dei carichi verticali, laterali e di torsione;
- risposta secondaria comprende gli sforzi e le deformazioni di un singolo pannello irrigidito da profilati, per esempio il pannello della struttura del fondo contenuto fra due paratie trasversali adiacenti. Il carico del pannello è normale al suo piano ed i contorni del pannello secondario sono costituiti solitamente da altri pannelli secondari ( fasciame del fianco e paratie);
- risposta terziaria descrive le deformazioni fuori dal piano e lo stato tensionale associato di un singolo pannello del fasciame. Il carico è normale al pannello ed i relativi appoggi sono costituiti dai rinforzi del pannello secondario di cui è parte integrante.

Dalla suddetta descrizione si vede che è necessario a volte conoscere la distribuzione localizzata dei carichi ed in altri casi, a seconda dalla risposta strutturale che si è cercata, conoscere la distribuzione della risultante dei carichi locali ( per esempio il carico per unità di lunghezza dell'intero scafo ).

L'analisi della risposta primaria è effettuata ipotizzando che l'intero scafo della nave si comporti come una trave il cui carico è dato dalla distribuzione longitudinale dei pesi e della spinta sullo scafo. Come in qualsiasi calcolo di resistenza di una trave, è dapprima necessario integrare i carichi per ottenere la distribuzione longitudinale della forza di taglio complessiva ed integrarla ancora per ottenere il momento flettente. I carichi in acqua tranquilla contribuiscono per una buona parte del taglio totale e del momento flettente di molte navi, ai quali devono essere aggiunti successivamente gli effetti indotti dalle onde.

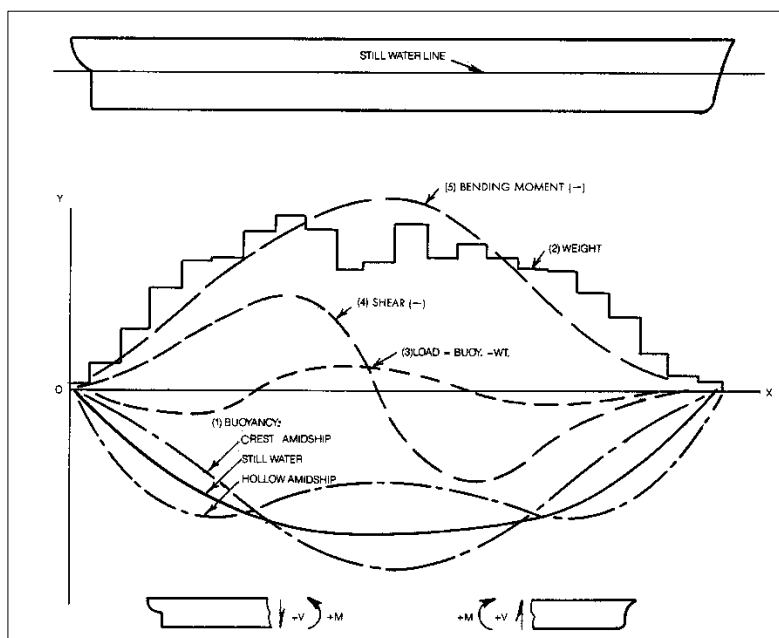


Figura 3

La Figura 3 illustra una tipica distribuzione longitudinale di peso e di spinta per una nave galleggiante in acqua tranquilla.

Nella parte più inferiore di questa figura è tracciata una curva (1) della forza di spinta per unità di lunghezza, che come notato precedentemente è uguale alla densità di peso,  $\rho \cdot g$ , dell'acqua per l'area della sezione. La curva superiore (2) in questa figura mostra la distribuzione longitudinale della forza peso tracciata secondo la convenzione comunemente impiegata. In questa procedura, la lunghezza della nave è divisa in un certo numero di spazi uguali, per esempio nelle venti o più suddivisioni che sono state usate nella preparazione del piano di costruzione delle linee d'acqua. Tutti i pesi dello scafo, delle attrezzature e dei contenuti che si trovano nell'intervallo fra la stazione  $i$  e la stazione  $i+1$  sono sommati e trattati come un singolo carico uniformemente distribuito sopra questo intervallo di suddivisione longitudinale.

Ciò è essenzialmente un processo di conteggio in cui ogni elemento nella nave [ per esempio, la struttura dello scafo (fasciame, ossature, materiale di saldatura), l'allestimento (condotte, copertura del ponte, movimentazione del carico), l'apparato di propulsione, il carico ed altro ] è registrato ed assegnato ad un intervallo della suddivisione. La procedura deve essere sviluppata con cura meticolosa ed in grande dettaglio così da assicurare un'adeguata accuratezza. Come nel caso della maggior parte dei calcoli ripetitivi anche questa procedura si presta facilmente per essere effettuata con elaboratori elettronici.

L'ipotesi di una distribuzione dei pesi, che è assunta in questo stadio uniforme negli intervalli della distribuzione, è soltanto un'approssimazione della distribuzione reale del peso. Alcuni elementi del peso si presenteranno come pesi quasi concentrati in questa distribuzione longitudinale. Per esempio, il peso di una paratia trasversale sarà, in realtà, distribuita longitudinalmente su una porzione molto breve della lunghezza della nave uguale allo spessore del fasciame della paratia. I pesi di determinati elementi quali i grandi componenti dell'apparato di macchina (turbine, motori diesel) possono essere trasmessi alla struttura della nave come carichi puntuali nelle posizioni dei tirafondi di fondazione. Similmente, i "containers" sono sostenuti solitamente sui supporti posizionati sotto i loro angoli ed il loro peso totale è trasmesso alla struttura dello scafo con carichi puntuali in queste posizioni. La vera distribuzione dei pesi sarà quindi un grafico molto più irregolare di quello che è indicato nella Figura 3 e consisterà di alcuni pesi distribuiti e di alcuni pesi concentrati. Può essere evidenziato, tuttavia, che le integrazioni che sono realizzate per ottenere dai carichi le distribuzioni del taglio e poi del momento flettente tendono ad attenuare gli effetti di queste irregolarità locali. Di conseguenza tutta la distribuzione ragionevolmente esatta dei carichi, che mantiene il valore corretto della forza entro un intervallo locale e piccolo confrontato alla lunghezza totale della nave, condurrà generalmente alle distribuzioni corrette

del taglio e del momento flettente entro limiti accettabili d'errore. Tuttavia, effetti strutturali localizzati, causati da notevoli carichi puntuali e particolarmente da elementi pesanti possono essere analizzati separatamente ed i loro effetti sovrapposti agli effetti dei carichi restanti. Avendo determinato le distribuzioni dei pesi e delle spinte, la curva netta del carico (3) è la differenza fra i due. Questa è tracciata come la terza curva nella Figura 3, con spinta positiva verso l'alto. Gli stati d'equilibrio statico richiedono che il peso totale e la spinta siano uguali e che il centro di spinta sia sulla stessa linea verticale del centro di gravità. In termini di curva del carico, questo richiede che l'integrale di tutto il carico sulla lunghezza della nave e l'integrale del momento longitudinale del carico siano entrambi nulli.

Come in qualsiasi calcolo a trave, la forza di taglio in una posizione  $x$ , uguale a  $V(x)$ , è ottenuta come l'integrale della curva del carico ed è tracciata come la quarta curva di Figura 3

$$(1) \quad V(x_1) = \int_0^{x_1} [b(x) - w(x)] dx$$

dove:

$b(x)$  = spinta per unità di lunghezza

$w(x)$  = peso per unità di lunghezza

Il momento flettente nella posizione  $x_1$ ,  $M(x_1)$ , è l'integrale della curva del taglio ed è tracciato come la quinta curva nella Figura 3:

$$(2) \quad M(x_1) = \int_0^{x_1} V(x) dx$$

Nella parte inferiore della Figura 3 è indicato l'andamento del momento flettente e del taglio, insieme alle loro convenzioni del segno.

Se consideriamo una data posizione longitudinale,  $x_1$ , la forza di taglio è la forza ascendente che la parte sinistra dello scafo esercita sulla parte destra di questa posizione. Similmente, il momento flettente è il momento risultante esercitato dalla parte sinistra sulla parte della nave alla destra della posizione  $x_1$ . Per essere soddisfatta la condizione d'equilibrio statico la forza di taglio ed il momento flettente dovranno essere uguali a zero ad entrambe le estremità della nave.

Nell'esecuzione pratica del calcolo dei carichi in acqua tranquilla oggi sono utilizzati codici di calcolo per elaboratore elettronico. I programmi disponibili, contengono i moduli per l'effettuazione dei calcoli quali le proprietà idrostatiche, la stabilità statica, l'allagamento e la compartimentazione. L'operazione principale che deve affrontare l'architetto navale consiste nella redazione e nel controllo dei dati di ipotesi e nella valutazione dei risultati del calcolo. L'importanza d'ipotesi complete ed esatte deve avere la giusta enfasi e può essere immediatamente compreso che la compilazione dei dati completi del peso richiesti per il calcolo del momento flettente e del taglio nella fase di progetto finale non è un'operazione insignificante.

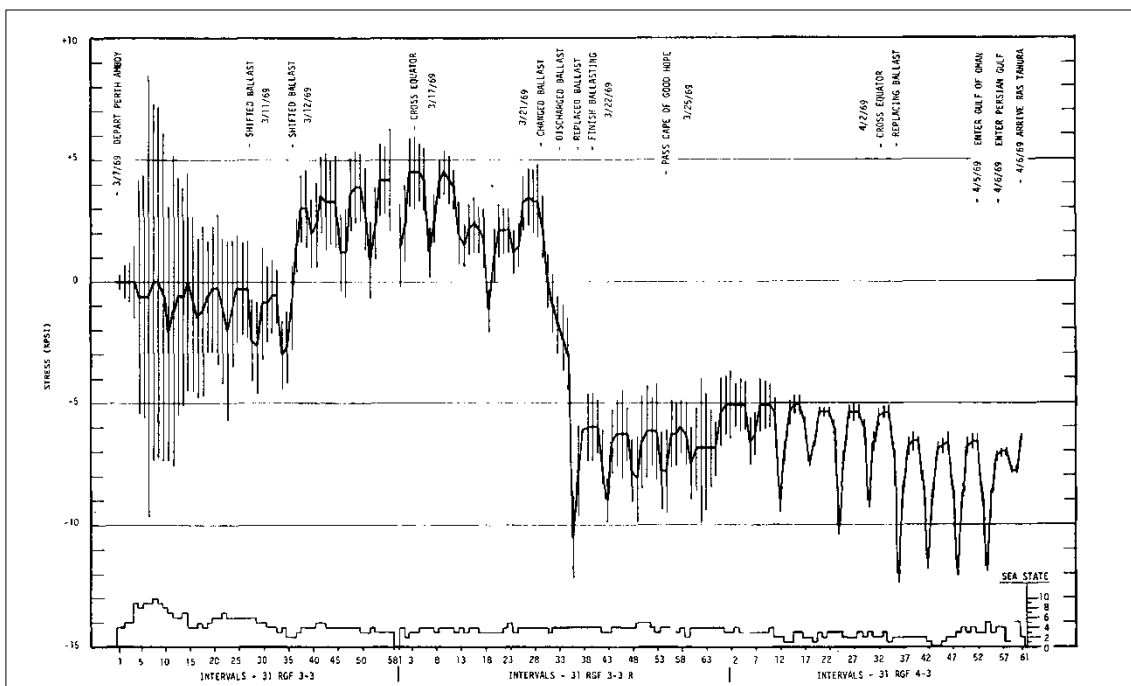


Figura 4

Concludendo questo paragrafo, dovrebbe essere osservato che il carico statico deve essere calcolato solitamente per varie distribuzioni di carico considerando anche altri eventuali pesi variabili presenti per ottenere i valori estremi del momento flettente e del taglio. Il carico statico deve inoltre essere combinato con altri eventuali carichi presenti su cui basare il progetto degli elementi della struttura. Ancora, deve essere considerato che il carico statico cambierà durante il corso di singolo viaggio per il consumo del combustibile, per la zavorra che verrà spostata e per il carico che è caricato e scaricato nei porti di scalo. Una storia temporale dei cambiamenti nelle tensioni statiche in mezzeria durante il corso di un lungo viaggio di grande cisterna è stata presentata nella Figura 4.

Anche se questa figura mostra le variazioni di sforzo dovuto alle onde e agli effetti termici, le grandi variazioni nelle linee a tratto spesso sono i risultati dei cambiamenti nelle quantità e nella posizione dell'acqua salata nelle casse di zavorra. Le variazioni registrate nelle tensioni in acqua tranquilla, a parte la temperatura e gli effetti dell'onda, variano da circa 27.6 MPa di trazione a circa 48.3 MPa di compressione.

## CARICHI INDOTTI DALLE ONDE

I principali carichi indotti dalle onde sono quelli precedentemente citati come carichi dinamici di frequenza bassa o carichi che coinvolgono i movimenti dell'onda e della nave e che provocano trascurabile amplificazione dinamica delle tensioni. Una volta che questi carichi quasi statici sono determinati, la risposta strutturale in termini di sforzo o deformazione può essere computata con i metodi d'analisi strutturale statica.

Almeno quattro procedure con vari gradi di sofisticazione possono essere utilizzate nella valutazione dei carichi indotti dalle onde e dei momenti flettenti risultanti oltre che delle forze di taglio:

- *metodi approssimati;*
- *misure di deformazione e o di pressione sulle navi esistenti;*
- *misure in laboratorio dei carichi sui modelli;*
- *calcolo diretto dei carichi idrodinamici indotti dalle onde.*

### Metodi approssimati

Nel processo preliminare di progetto è spesso desiderabile effettuare una valutazione preliminare del carico strutturale dello scafo con metodi approssimati, a volte prima che siano state elaborate informazioni dettagliate riguardo alla distribuzione del peso o delle linee dello scafo. Sono disponibili metodi approssimati che includono formulazioni semi-empiriche e calcoli quasi-statici.

I primi testi di architettura navale contengono le descrizioni di una procedura per cui la nave è immaginata in uno stato di equilibrio statico o sulla cresta o sul cavo di un'onda la cui lunghezza è uguale a quella della nave,  $L$ , e l'altezza pari ad  $L/20$ . Usando la distribuzione longitudinale della spinta per un tale profilo dell'onda e una distribuzione ipotetica del peso, possono essere calcolate le curve della distribuzione longitudinale della forza di taglio e del momento flettente, solo come se si fosse in acqua tranquilla. Gli esperimenti ed i metodi di calcolo più esatti hanno indicato che questa procedura altamente semplificata sopravvaluta con un notevole margine il momento flettente indotto dall'onda per qualsiasi altezza d'onda data; questo è conseguenza del fatto che vengono trascurati gli effetti dinamici ed idrodinamici connessi con le pressioni dell'onda ed i movimenti della nave. Tale procedura è utile principalmente quando usata paragonandola ai dati dei progetti precedenti.

La maggior parte delle società di classificazione ora impiegano una formulazione semplificata da usare nella valutazione del momento flettente e della forza di taglio indotti dalle onde da aggiungere al momento ed al taglio in acqua tranquilla. Tuttavia, le altezze d'onda efficaci usate in queste formulazioni sono state derivate da analisi dettagliate che includono gli effetti dinamici ed idrodinamici e, pertanto, non sono soggetti alle limitazioni del calcolo dell'onda statica appena descritto. Le regole dell'ABS definiscono un momento flettente dell'onda estrema che, insieme con il momento flettente in acqua tranquilla e le tensioni ammissibili regolamentari, si intende che debba essere usato nella determinazione del modulo di resistenza richiesto:

$$(3) \quad M_w = C_2 L^2 BHK_b$$

dove:

$C_2$  e  $K_b$  sono coefficienti tabulati dipendenti dal coefficiente di blocco

$L$  e  $B$  sono, rispettivamente, lunghezza e larghezza della nave

$H$  è un'altezza d'onda o un coefficiente di momento flettente dipendente da  $L$

I valori dati nei regolamenti per  $H$  mostrano una tendenza ascendente graduale con la lunghezza della nave, stabilizzandosi su un valore costante di 305 m.

Tutte le costanti dell'equazione (3) sono basate su una notevole messe di dati ottenuti da numerose navi tramite una combinazione di calcoli, di prove su modello e di misure in grande scala. L'uso di un'altezza d'onda nominale prende in considerazione la risposta della nave, dipendente dal formato della nave, congiuntamente alla severità delle onde previste durante la vita della nave. È stato rilevato che i valori previsti da tale formula sono perfettamente d'accordo con le previsioni analitiche usando le onde dell'Atlantico del Nord ed in accordo con altre valutazioni a lungo termine del momento flettente massimo dell'onda, per navi di proporzioni medie che formano uno "standard", non avendo caratteristiche insolite nella geometria o nella distribuzione longitudinale dei pesi. Poiché tale momento flettente può

essere valutato senza la conoscenza dettagliata della distribuzione del peso o della geometria dello scafo, risulta utile per le valutazioni preliminari di progetto. Una volta usato con le tensioni ammissibili adatte fornisce un calcolo tipico soddisfacente per la robustezza longitudinale anche se basato su dati empirici per navi convenzionali.

I dettagli dei calcoli tipici per la robustezza longitudinale per la marina sono classificati, ma è fornita questa dichiarazione generica, "le travi primarie dello scafo per scafi in acciaio comune sono progettate per un livello tensionale di 130 MPa sulla singola ampiezza disponendo la nave su un'onda trocoidale di altezza  $1.1 \cdot \sqrt{LBP}$  e lunghezza = LBP" ed effettuando di seguito un calcolo quasi-statico convenzionale.

### Misure di deformazione e o di pressione sulle navi esistenti

Le misure al vero non possono ovviamente essere usate per ottenere dati specifici per il progetto di una nuova nave. Anche se i risultati di tali misure si applicano soltanto alle specifiche navi studiate, sono di grande utilità per verificare i metodi di previsione basati sulle leggi della probabilità che saranno descritti più avanti. Le misure al vero soffrono di un grosso svantaggio, oltre a quello della spesa, che è la difficoltà nel misurare con accuratezza l'ambiente marino per la correlazione con i carichi misurati. Mentre tentativi numerosi sono stati fatti per sviluppare boe economiche o strumenti navali per misurare le onde, uno strumento completamente soddisfacente ancora non è stato realizzato. Il valore principale delle misure di risposta al vero ai carichi (sollecitazione o deformazione), si trova quindi nello sviluppo delle previsioni statistiche a lungo termine dei carichi sullo scafo indotti dalla navigazione e nelle misure effettuate durante un periodo pluriennale. Poiché queste previsioni possono essere collegate con più dati climatologici di lunga durata dell'onda, il problema della misura dell'onda nelle vicinanze immediate della nave è di minore importanza.

Continue sono le misure al vero ed a lungo termine su navi di vari tipi e formati effettuate da parecchi enti di classificazione marittima ed organismi di ricerca intorno al mondo e le descrizioni di tali lavori possono essere trovate agevolmente in letteratura. Queste misure a lungo termine ed al vero sono utilizzate quindi per verificare le previsioni teoriche.

### Misure in laboratorio dei carichi sui modelli

In questa procedura, un modello geometricamente e dinamicamente simile alla nave è equipaggiato con strumenti che misurano il taglio verticale e orizzontale oltre al momento flettente, o al momento di torsione, al centro nave ed in altre sezioni. Ciò può essere compiuto registrando le forze o le deformazioni fra parecchi segmenti prodotti da tagli trasversali nel modello. Anche i carichi impulsivi possono essere determinati registrando le pressioni in parecchi punti distribuiti sopra la superficie del modello. Gli esperimenti sono eseguiti in vasche di rimorchio equipaggiate per produrre sia onde normali che casuali. La vasche più versatili sono larghe rispetto alla loro lunghezza ed il modello può, quindi, essere esaminato in obliquo così come di prua e di poppa.

I risultati delle prove su un modello di una cisterna indicano che il momento flettente longitudinale laterale in mezzeria può avvicinarsi od eccedere il valore del momento flettente longitudinale verticale quando la nave ha angoli d'incontro obliqui in onde regolari. Le prove su modello sono state fatte a 10 nodi di velocità con angoli d'incontro obliqui rispetto alle onde che hanno una lunghezza effettiva uguale alla lunghezza del modello.

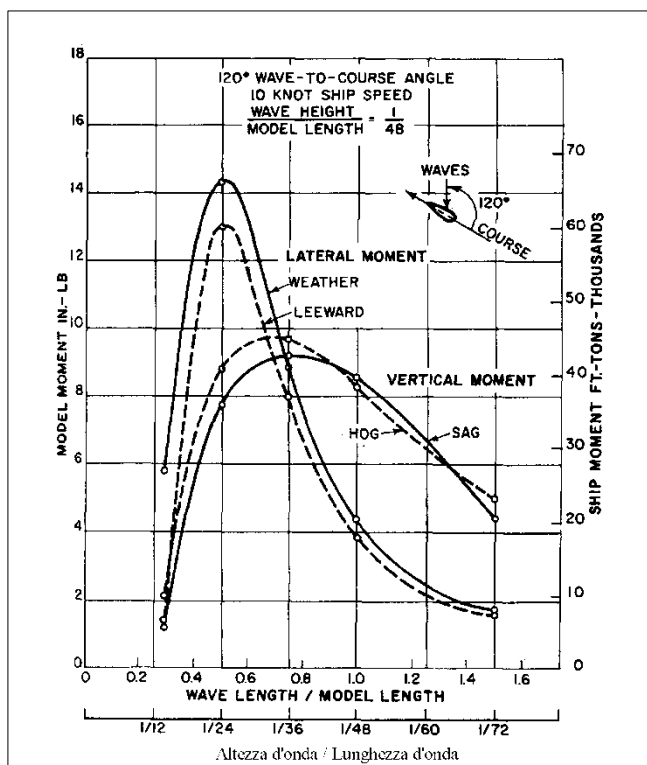


Figura 5

La lunghezza dell'onda era quindi uguale alla lunghezza del modello per il coseno dell'angolo d'incontro. Un'altezza d'onda di 1/48 della lunghezza del modello è stata usata per tutte le lunghezze d'onda per evitare un'eccessiva immersione del modello.

È stato trovato che il momento flettente laterale era abbastanza sensibile al cambiamento della direzione dell'onda ed all'effettiva lunghezza d'onda. Il momento flettente aumentava quasi linearmente quando l'angolo d'incontro variava da 180° a 120°. I momenti massimi alle velocità nulle d'avanzamento accadono ad un angolo d'incontro di circa 135°. Il ritardo di fase fra il momento flettente laterale e verticale e dell'ordine del quarto di giro.

Dovrebbe essere considerato ancora che la ripidità effettiva dell'onda aumenta spostando l'angolo d'incontro dal mare di prua al mare al mascone. Con mare di prua e lunghezza delle onde di modello si ha un rapporto di 1/48; la ripidità cambia a 1/24 per lunghezza d'onda efficace ed angolo d'incontro di 120°.

La Figura 5 da Numata mostra il rapporto fra i momenti flettenti longitudinali verticali e laterali per un angolo d'incontro di 120°, velocità di 10 nodi ed un rapporto altezza dell'onda lunghezza modello di 1/48, corrispondente ad un'altezza d'onda al vero di 3.12m.

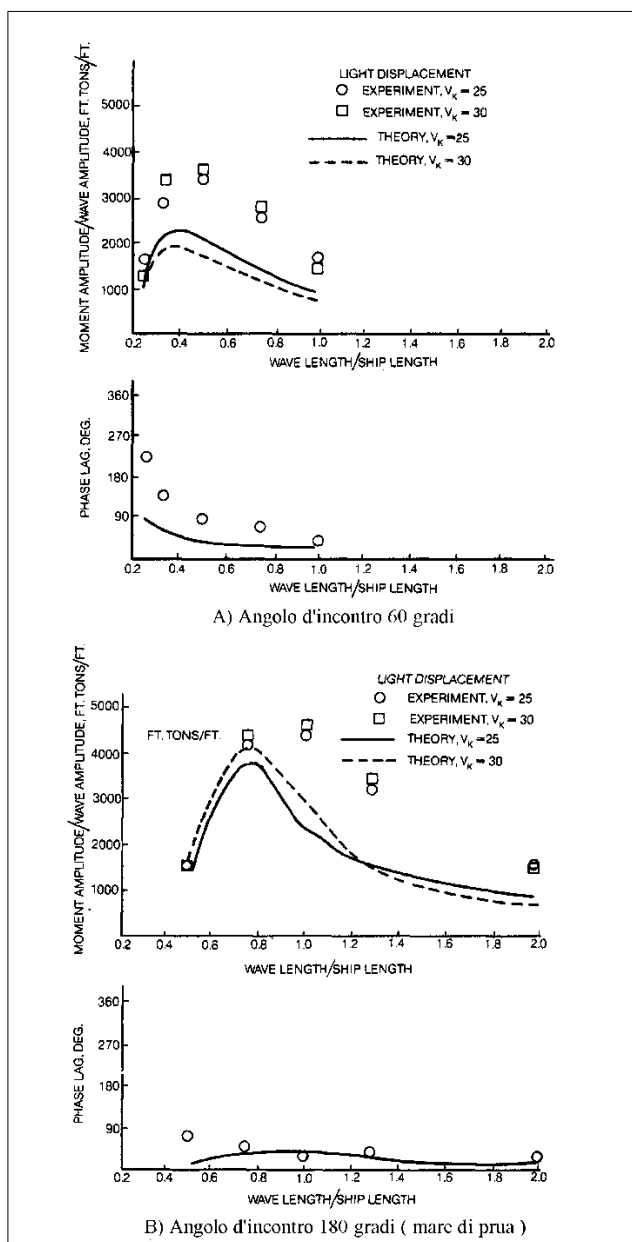


Figura 6

### Calcolo diretto dei carichi idrodinamici indotti dalle onde

In questo paragrafo, sono state analizzate delle appropriate teorie idrodinamiche adatte per il calcolo dei moti della nave in moto ondoso oltre che per il calcolo delle forze di pressione causate dalle onde e dal movimento della nave indotto da quello delle onde. Nella determinazione dei carichi strutturali le forze che derivano dalla viscosità del fluido solitamente possono essere trascurate se paragonate alle forze di pressione, tranne nel caso del rollio. Il carico strutturale totale in ogni istante è quindi la somma delle forze di pressione dell'onda, delle pressioni indotte dal movimento della nave e dei carichi di reazione dovuti all'accelerazione delle masse della nave. Si noti che un passo preliminare nel calcolo della quota parte dei carichi dipendenti dal movimento è il calcolo della risposta dei movimenti di corpo rigido della nave causati dalle forze eccitanti del moto ondoso. Sia l'analisi delle forze idrodinamiche che il calcolo della risposta dei movimenti saranno discusse in un successivi paragrafo. L'applicazione di queste tecniche al calcolo delle forze di taglio e del momento flettente indotti dalle onde regolari è stata descritta nel paragrafo seguente. È stato inoltre mostrato che i risultati in onde regolari possono essere applicati alla previsione delle forze e dei momenti in mari irregolari. Per ottenere una previsione esatta e puramente analitica del comportamento strutturale a lungo termine di una nave, la ricerca sta continuando nelle discipline della idrodinamica pura, dell'analisi delle tensioni, della fatica dei materiali e nella raccolta delle statistiche di lunga durata delle onde negli oceani del mondo.

Le prove su modello sono state eseguite inoltre in onde irregolari con l'altezza media delle onde più alte del 10% rispetto ai 7.01 m al vero. Per il confronto con i momenti flettenti verticali in onde normali, i valori nella Figura 5 sono stati aumentati del rapporto delle altezze d'onda, vale a dire 23/10.5.

Il momento flettente longitudinale laterale e verticale di queste prove su modello sono approssimativamente della stessa grandezza e non rappresentano le circostanze peggiori che potrebbero essere incontrate in mare. La nave Ocean Vulkan, per esempio, ha osservato il momento flettente longitudinale laterale di grandezza paragonabile al momento verticale in quasi tutti gli stati di mare. I momenti massimi si sono presentati per angoli d'incontro da 110° a 140°. Il massimo momento è stato di 24.800 t\*m, corrispondente ad uno stato tensionale di 39 MPa e questi momenti erano frequentemente in fase con i momenti flettenti verticali.

Gli esperimenti iniziali di questo tipo sono stati concepiti per fare luce sulla natura fondamentale dei carichi d'onda dinamici. Gli esperimenti più recenti hanno avuto l'obiettivo principale di fornire i dati con i quali calibrare le procedure teoriche di calcolo citate nella procedura successiva. Alcuni confronti tra risultati sperimentali e teorici sono stati rappresentati nella Figura 6.

Mentre, in linea di principio, esperimenti di questo tipo potrebbero essere effettuati per valutare i carichi strutturali nel progetto di una nuova nave, questo è eseguito raramente a causa del tempo necessario e della relativa spesa. Inoltre ora sono disponibili un certo numero di codici di calcolo per elaboratore che offrono la possibilità di studiare una gamma molto più vasta di stati di carico e di stati di mare di quanti sia possibile verificarne in un programma di prove su modello e a costi considerevolmente inferiori. Quindi, l'impiego principale per le prove su modello è quello di fornire i dati iniziali o verificare le tecniche utilizzate con l'elaboratore.





Come conseguenza della simmetria sul piano verticale longitudinale della nave e delle onde, i movimenti ed i carichi avranno componenti soltanto in questo piano. In qualsiasi istante, il movimento della nave consisterà di movimenti, funzioni del tempo, di beccheggio, sussulto ed avanzamento sovrapposti ad una velocità media di avanzamento,  $U_0$ .

Uno dei presupposti fondamentali della "strip theory" lineare è che sia le ampiezze dei movimenti della nave che delle onde sono, in un certo senso, piccole. Di conseguenza, è possibile considerare la forza verticale istantanea totale su una striscia o su un elemento trasversale sottile di lunghezza,  $dx$ , come composta dalla somma di parecchi termini che sono calcolati indipendentemente l'uno dall'altro. Due di queste forze elementari sono la spinta dell'acqua ed il peso dell'elemento sui tratti che costituiscono la lunghezza della nave. Queste sono le stesse forze che compaiono nelle equazioni (1) e (2) per i carichi in acqua tranquilla cioè il taglio ed il momento flettente e non occorre considerarli ora. Le forze restanti, funzioni del tempo, risultano dalle reazioni inerziali e dalle pressioni dell'acqua che sono associate alle onde ed ai movimenti della nave indotti dalle onde stesse. Le forze viscosive, che sono considerate relativamente importanti (eccetto per lo smorzamento del rollio), sono ignorate nel calcolo dei carichi verticali. In questo quadro le forze verticali dei fluidi sui vari elementi possono essere suddivise, come segue, in cinque categorie, tutte espresse in unità di forza:

- a) la componente della forza di pressione dell'onda calcolata come se la presenza della nave non disturbasse né le onde incidenti né la distribuzione delle forze dinamiche di quelle onde. Questa è denominata la forza di Froude-Krylov;
- b) la componente della forza di pressione dell'onda calcolata con il sistema delle onde diffratte. Queste onde risultano dalla riflessione e distorsione delle onde incidenti quando interferiscono con la nave. Questa forza rappresenta una correzione delle forze di Froude-Krylov per il disturbo introdotto nel sistema delle onde per la presenza della nave;
- c) un termine proporzionale allo spostamento verticale istantaneo del tratto di scafo dalla relativa posizione media, come se fosse in acqua tranquilla. Questa è denominata la forza di richiamo idrostatico ed è uguale al cambiamento nella spinta statica media dell'elemento;
- d) un termine proporzionale alla velocità verticale istantanea del tratto di scafo e denominata forza di smorzamento;
- e) un termine proporzionale all'accelerazione verticale istantanea del tratto di scafo e denominata forza di massa aggiunta.

Le prime due di queste forze, una volta sommate, contengono la forza totale eccitante indotta dalle onde e calcolata come se la nave si muovesse costantemente in avanti attraverso le onde ma non avvertisse alcuna risposta di movimento oscillatorio in risposta alle forze d'onda. Le ultime tre forze sono calcolate come se la nave stesse subendo il movimento oscillatorio indotto dalle onde mentre si muove alla velocità d'avanzamento costante attraverso l'acqua tranquilla.

In aggiunta alle forze da (a) ad (e) qui sopra descritte, deve essere aggiunta la forza inerziale di reazione di quella parte della massa (peso / g) della nave che è contenuta nel tratto  $dx$ . Se la massa della nave per unità di lunghezza è denotata  $m(x)$ , questa forza di reazione è data, secondo il principio di d'Alembert, da  $-m(x) \cdot a_y \cdot dx$ , dove  $a_y$  è la componente dell'accelerazione assoluta della sezione  $x$  nel senso parallelo all'asse  $y$  della nave. Se ora denotiamo la somma delle cinque componenti fluide delle forze che agiscono sulla striscia,  $dx$ , con  $f(x)dx$ , allora la forza totale in qualsiasi istante è la somma delle forze fluide e della reazione inerziale,  $q(x)dx$ , data da

$$(4) \quad q(x) dx = [f(x) - m(x)a_y] dx$$

In qualsiasi istante, la forza di taglio,  $V(x_1)$ , in una sezione ove la coordinata  $x$  è  $x_1$  è ottenuto integrando il  $q(x)$  dall'estremità addietro della nave,  $x = 0$ , fino alla stazione  $x = x_1$ . Il momento flettente alla sezione  $x_1$  è ottenuto, a sua volta, integrando la forza di taglio,  $V(x)$ , da  $x = 0$  ad  $x = x_1$ :

$$(5) \quad V(x_1) = \int_0^{x_1} q(x) dx$$

$$(6) \quad M(x_1) = \int_0^{x_1} V(x) dx$$

La Figura 8 illustra i differenti componenti della distribuzione di carico in un certo istante per una nave che ad esempio si muove in un'onda sinusoidale semplice di ampiezza unitaria.

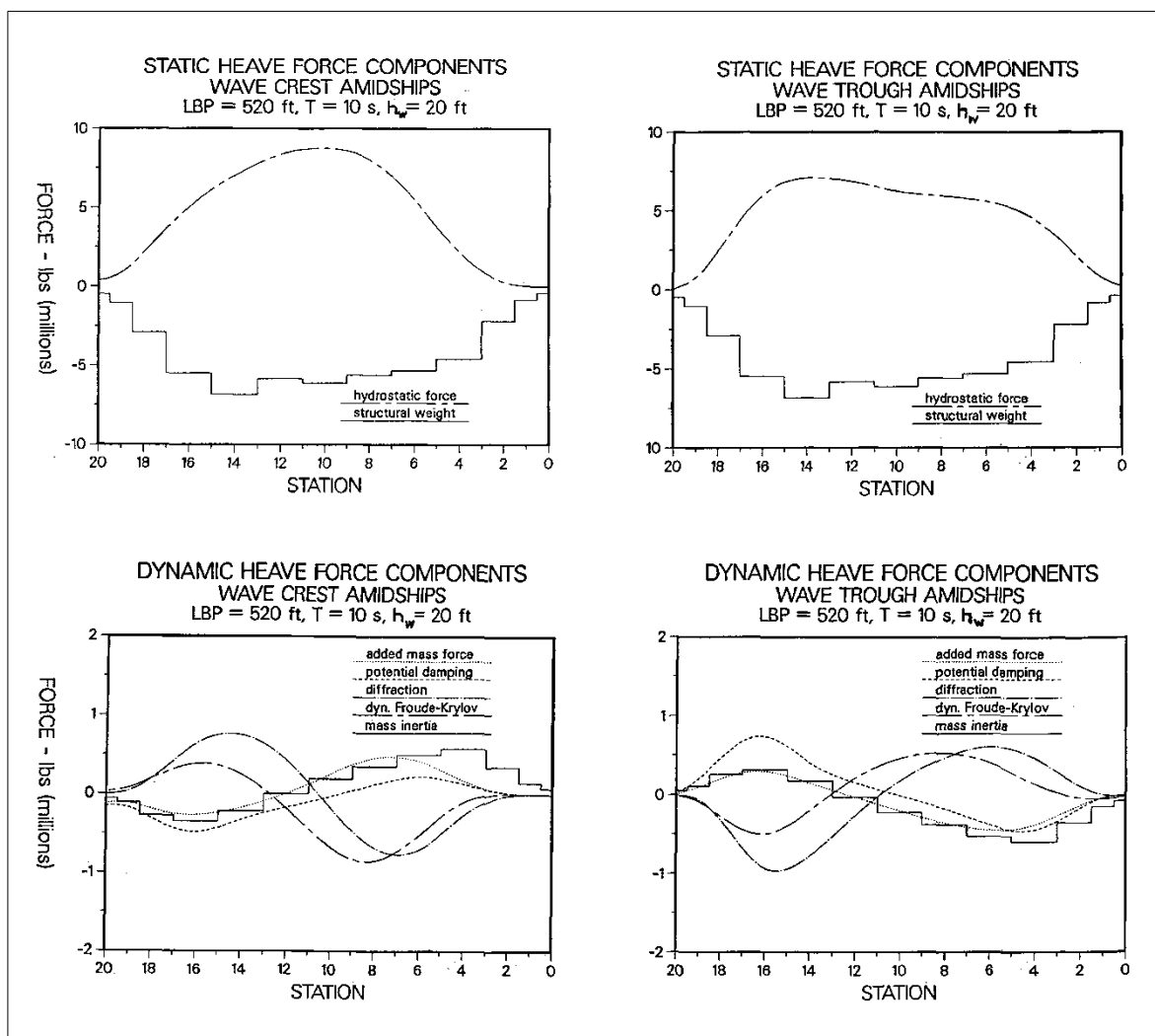


Figura 8

In questa figura si nota che il carico totale consiste di un certo numero di componenti di grandezza in qualche modo simile che possono differire sia nel segno che nella fase. Ci può essere annullamento o rinforzo fra i differenti componenti, con il risultato che il carico totale può essere più grande o più piccolo di ogni componente isolato. Questo annullamento o rinforzo varia sulla lunghezza della nave ed inoltre varia con la frequenza d'incontro dell'onda.

Nella discussione precedente sulla forza su una sezione della nave, è stata descritta una procedura in cui la forza totale si suddivide in parecchi componenti, ciascuno dei quali può essere calcolato indipendentemente dagli altri. Su questa assunzione di linearità è basata la "strip theory", ed è possibile quindi calcolare il taglio ed il momento flettente in onde regolari di qualsiasi ampiezza e frequenza desiderata. La maggior parte dei codici di calcolo dei movimenti della nave contengono un modulo per effettuare questo calcolo a differenti angoli di incontro delle onde come per il caso del mare di prua appena discusso.

È indicato nel capitolo apposito sulla "strip theory" che la componente della forza d'onda regolare dipende dalla frequenza dell'onda, dalla forma dello scafo, dalla velocità della nave e dall'angolo d'incontro. I coefficienti idrodinamici di smorzamento e di massa aggiunta dipendono dalla forma dello scafo, dalla velocità della nave e dalle frequenze d'incontro delle onde. Le forze d'onda agiscono sulla nave ad una frequenza uguale alla frequenza d'incontro e, come conseguenza della rappresentazione lineare dei movimenti di risposta della nave, i movimenti ed i carichi correlati ai movimenti si presenteranno a questa stessa frequenza. In generale, ogni movimento o risposta variabile dei carichi può essere divisa in una componente in fase con le onde incontrate ed in una componente in contrapposizione di fase (quadratura) con le onde. Si vede, quindi, che i componenti dei carichi strutturali  $q(x)$ ,  $V(x)$  ed  $M(x)$  in una posizione specifica,  $x$ , lungo la nave, sono quantità variabili sinusoidalmente la cui frequenza è uguale alla frequenza d'incontro dell'onda e, l'ampiezza e la fase variano con la frequenza.

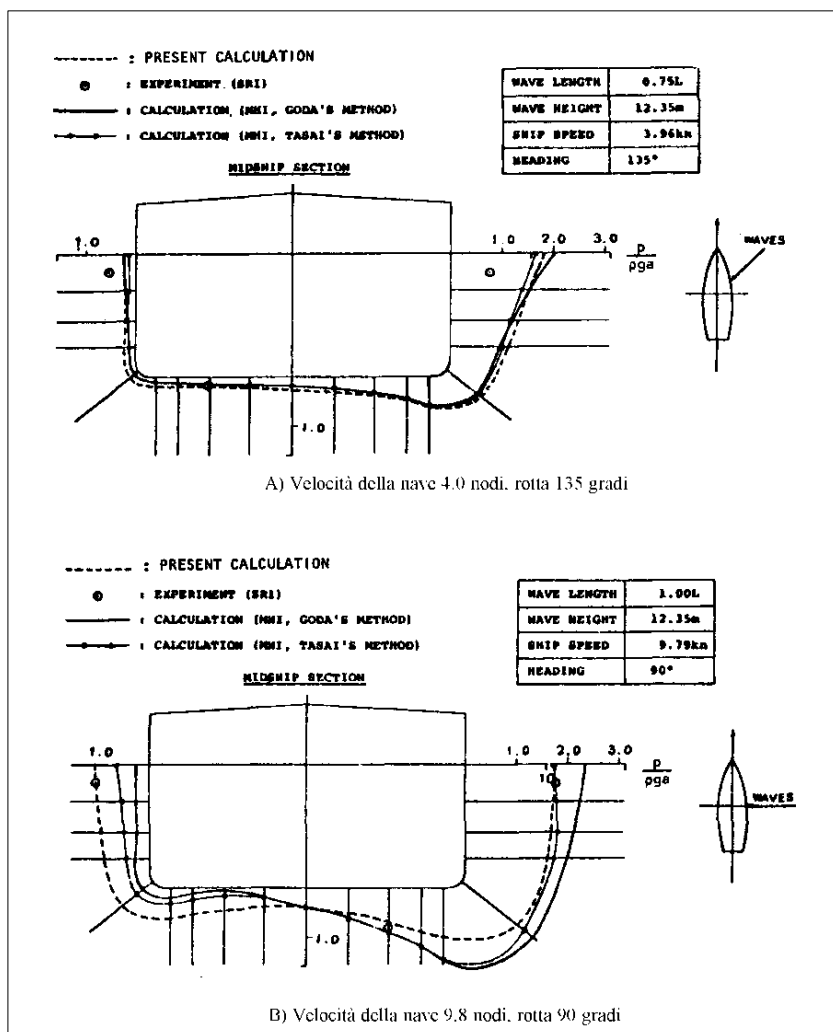
Quando consideriamo una nave che naviga attraverso un realistico mare irregolare è una fortuna che la linearità si applichi anche se approssimativamente nella descrizione dello stato di mare. Lo stato di mare può essere suddiviso in un numero teoricamente infinito di componenti d'onda di varie ampiezze, frequenze (lunghezze) e direzioni. Data l'assunzione di linearità della risposta del carico della nave dove qualsiasi componente d'onda regolare può essere assunto come direttamente proporzionale all'ampiezza di quell'onda, allora la risposta della nave in mare confuso può

essere calcolata come la sovrapposizione lineare delle risposte ai vari componenti presenti nel moto ondoso. Di conseguenza, i calcoli dei componenti della forza, del movimento e del carico sono inizialmente effettuati per una serie di componenti elementari di onde regolari ciascuno di ampiezza unitaria e frequenza uguale ad uno dei componenti dello stato di mare confuso. Le risposte unitarie risultanti sono successivamente moltiplicate per le ampiezze reali delle onde componenti lo stato di mare e sono sommate insieme per ottenere lo spettro di risposta corrispondente allo stato di mare reale. Questo processo di sovrapposizione lineare costituisce virtualmente la base per tutti i calcoli delle risposte della nave a tutti gli stati di mare casuali e realistici ed i particolari possono essere trovati nel capitolo dedicato a questo argomento, compreso un esempio di calcolo del momento flettente dell'onda. I risultati sono sotto forma di valori rms del taglio e del momento flettente, dai quali possono essere derivate le proprietà statistiche a breve termine della risposta e l'estensione al calcolo dei carichi estremi da prevedere durante la vita della nave è discussa nei paragrafi successivi.

Se, durante la propria vita, la nave opera in varie condizioni di distribuzione di carico ed immersione, ci saranno diversi gruppi di funzioni  $q(x)$ ,  $V(x)$  ed  $M(x)$  associati ad ogni caricazione. Affinché l'architetto navale possa progettare il caricamento strutturale più severo che la nave possa avvertire durante il corso della vita della nave, i calcoli di "strip theory" devono essere effettuati per la gamma completa di frequenze, di altezze d'onda e di angoli d'incontro attesi. Questi calcoli devono essere ripetuti per tutte le combinazioni di velocità e condizioni di carico alle quali la nave opererà. Molti dei codici di calcolo disponibili e destinati agli elaboratori contengono i mezzi per l'effettuazione dei calcoli multipli in modo facile ed efficiente. I più specializzati di questi contengono inoltre le disposizioni per l'effettuazione della sovrapposizione che conduce alla risposta in mare confuso, insieme all'analisi probabilistica che conduce alle valutazioni dei movimenti e dei carichi estremi.

### DISTRIBUZIONE TRASVERSALE DEI CARICHI D'ONDA

Per potere calcolare la risposta secondaria o terziaria dei componenti strutturali quali i pannelli di fasciame irrigiditi o meno è necessario conoscere la distribuzione dei carichi di pressione del fluido e d'accelerazione sulla superficie del pannello.



Allo scopo di analizzare la robustezza trasversale, è quindi richiesta la distribuzione dei carichi trasversali intorno alla sezione della nave. Si noti che la forza sezionale per unità di lunghezza usata nel calcolo del taglio longitudinale e del momento flettente nel paragrafo precedente è la risultante o l'integrale di questo carico distribuito intorno alla sezione. Un calcolo dell'onda e della distribuzione di pressione indotta dai movimenti della nave è dato da Kim ed alcuni dei suoi risultati sono indicati in Figura 9.

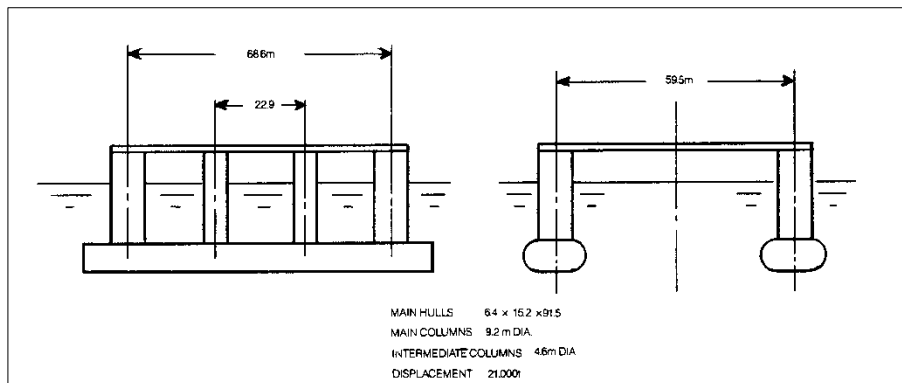
I due diagrammi mostrati in questa figura danno l'ampiezza (ma non la fase) della variazione di pressione dinamica intorno alla sezione di mezzeria e questo include gli effetti sia dei movimenti dell'onda che della nave. Può essere notato che le pressioni nell'onda sopra la linea di galleggiamento in acqua tranquilla non sono state ottenute, poiché la teoria idrodinamica lineare calcola la forza dei fluidi soltanto sulla parte immersa media della nave. La pressione su questa zona deve quindi essere valutata separatamente.

Figura 9

La variazione di pressione dinamica più grande è stata trovata in tutti i casi vicino al galleggiamento e nei mari di prua o al traverso; l'ampiezza è più grande sul fianco che si affaccia verso le onde in arrivo. L'ampiezza più bassa di tale variazione di pressione si trova nelle vicinanze della chiglia, che, tuttavia, deve sopportare la più alta pressione statica. I codici di calcolo più completi per i movimenti della nave usati per il calcolo del taglio e del momento flettente indotti dal moto ondoso forniscono inoltre la distribuzione di pressione sopra la superficie dello scafo.

### CARICHI DELL'ONDA SULLE PIATTAFORME "OFF-SHORE"

Molte piattaforme "off-shore" di perforazione o per la produzione di idrocarburi sono decisamente diverse nella forma geometrica dalle usuali forme di scafo navali, ma si approssimano molto bene come telai strutturali di elementi tubolari snelli.



L'analisi strutturale di tali piattaforme è effettuata approssimativamente con i metodi d'analisi strutturale tridimensionale ed i carichi applicabili richiedono metodi di calcolo adatti alla geometria della struttura. Una tipica piattaforma è illustrata nella Figura 10.

Figura 10

Una valutazione ragionevolmente buona delle forze d'onda può essere ottenuta calcolando la forza su ogni membro come se non ci fosse interferenza idrodinamica fra i membri adiacenti ed il membro in questione quando siano stati esposti al campo di flusso dovuto alla combinazione delle onde e del movimento della piattaforma. Usando una formula proposta per primo da Morison la forza su un membro, è illustrata nella Figura 11, mentre la forza per unità di lunghezza,  $l$ , può essere approssimata a:

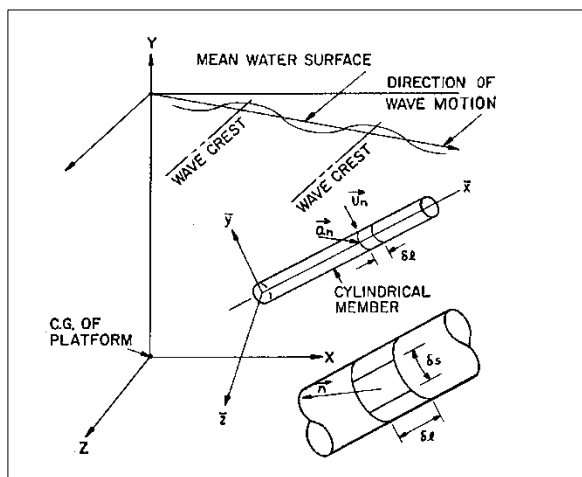


Figura 11

$$(7) \quad \frac{dF}{dl} = - \int p n ds + \frac{1}{2} \rho D C_D U_n |U_n| + \frac{1}{4} \rho \pi D^2 C_M a_n$$

dove:

- $p$  = pressione del fluido calcolata sulla superficie dell'elemento come se questo non disturbasse il flusso
- $n$  = vettore normale esterno all'elemento
- $D$  = diametro dell'elemento
- $C_D$  = coefficiente di resistenza
- $C_M$  = coefficiente di massa aggiunta
- $U_n$  = risultante normale della velocità in mezzeria
- $a_n$  = risultante normale della accelerazione in mezzeria
- $ds$  = porzione di lunghezza dell'arco di circonferenza dell'elemento

Con l'applicazione del metodo di linearizzazione equivalente, il termine quadratico della forza di resistenza può essere sostituito da una forza di resistenza lineare.

L'analisi risultante per i movimenti ed il carico strutturale di una piattaforma ora diventa lineare ed i principi della decomposizione e della combinazione del carico che precedentemente sono stati applicati nel caso della nave possono essere applicati anche in questo. È stato trovato che il coefficiente di resistenza lineare equivalente dipende dall'ampiezza del movimento relativo fra l'elemento considerato ed il liquido e, poiché il movimento dell'elemento dipende dal movimento risultante della piattaforma, devono essere impiegati procedure iterative per il calcolo della soluzione.

La forza fluida per unità di lunghezza data dall'equazione (7) può essere integrata sulla lunghezza di ogni elemento ed essere sostituita dalle forze e dai momenti staticamente equivalenti alle estremità di ogni elemento in dimensioni consistenti con il metodo d'analisi delle strutture spaziali. La risposta strutturale è quindi ottenuta con l'uso di un codice di calcolo destinato ad un usuale calcolo ad elementi finiti oppure ad un calcolo strutturale spaziale. I regolamenti per il disegno strutturale delle piattaforme in mare aperto sono redatti dalle Società di classificazione nazionale.