

CARICHI STRUTTURALI DELLA NAVE: VALUTAZIONE PROBABILISTICA DEI CARICHI INDOTTI DALLE ONDE IN STATI DI MARE CONFUSO (seconda 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*

INTRODUZIONE

L'analisi statistica, suffragata dagli esperimenti su modello, da misure al vero e da strumenti di calcolo idonei, è ora riconosciuta come facente parte del processo, accettato ed importante, di valutazione del momento flettente e degli altri carichi che agiscono su una nave in moto ondoso.

Roop ha tentato per primo un metodo statistico limitato al problema dei carichi e degli sforzi di flessione longitudinale su una cisterna navale. Le analisi statistiche da allora sono state applicate ai dati in grande scala degli sforzi della nave, Birmingham. L'ultimo è stato uno studio probabilistico in cui sono state calcolate le ampiezze del momento flettente in onde regolari differenti per sette navi dalle cui prove erano state registrate le onde. Sono stati calcolati i momenti flettenti a breve termine per gli spettri dell'onda che rappresentavano differenti stati di mare e successivamente sono stati previsti i carichi operativi per un funzionamento di 14 anni nell'Atlantico del Nord in base ad un certo numero di ipotesi per quanto riguarda gli effetti degli angoli d'incontro della nave, della velocità, degli spettri dell'onda, ecc.

Nel frattempo, in molti paesi è stato orientato uno sforzo continuo verso i metodi probabilistici di valutazione dei carichi d'onda sulle navi mercantili, patrocinato ed effettuato principalmente dalle società di classificazione e dal S.S.C.. Questo lavoro è ricapitolato regolarmente negli atti del *Congresso Internazionale delle Strutture Navali* (ISSC). Come spiegato nel paragrafo 4, le risposte strutturali a stati di mare confuso – così come i movimenti - sono previste solitamente dalla combinazione lineare delle risposte ad una serie di onde regolari elementari. Nell'applicazione della combinazione, è necessario ipotizzare che i carichi siano correlati linearmente con le ampiezze delle onde anche quando estrapolati ai valori degli stati di mare più severi. Ci sono state parecchie indagini sperimentali finalizzate alla verifica di questo presupposto esaminando i momenti flettenti in mezz'ora rilevati sperimentalmente in onde con altezza progressivamente crescente. Il presupposto della linearità è stato trovato solitamente cautelativo, cioè, la percentuale di aumento misurato del momento flettente in mezz'ora è minore dell'aumento dell'ampiezza delle onde nella gamma delle onde più ripide. Tuttavia, è importante ricordare i presupposti e le limitazioni dell'analisi lineare quando si utilizzano i carichi che sono calcolati per mezzo di codici di calcolo lineare dei movimenti della nave. Si guardi a tale proposito la discussione sulla validità della teoria lineare.

Nel quadro della teoria lineare del movimento della nave, tutti i componenti di carico sullo scafo indotti dai movimenti dovuti al moto ondoso, compresa la pressione in un punto della superficie dello scafo, il carico idrodinamico per unità di lunghezza, il carico inerziale per unità di lunghezza, la forza di taglio ed il momento flettente, sono collegati linearmente con l'ampiezza dell'onda. Quando il principio della combinazione lineare è usato nella predizione della risposta in un mare confuso, i metodi discussi nell'apposito paragrafo possono essere applicati nella valutazione delle probabilità di risposta a breve termine. Se questa valutazione si riferisce ad un componente del carico - per esempio il momento flettente in mezz'ora – c'è solitamente un valore medio diverso da zero di momento in acqua tranquilla al quale il momento indotto dalle onde deve essere sovrapposto. Le probabilità del carico possono allora essere calcolate prendendo in considerazione la combinazione del momento indotto dalle onde e di quello in acqua tranquilla. Le quantità statistiche che sono solitamente degne di nota nelle indagini di resistenza delle piattaforme o delle navi sono divise in tre categorie:

- valori medi ed estremi a breve termine;
- valori medi ed estremi a lungo termine;
- valori ciclici cumulativi.

Valori medi ed estremi a breve termine

Nella prima categoria "breve termine" si riferisce ad un periodo approssimato da una a quattro ore durante il quale è stato trovato che lo stato di mare rimane pressoché uniforme (cioè, statisticamente stazionario) in circostanze climatiche normali. Una discussione sui principi generali delle probabilità a breve termine e sulla loro applicazione al problema dei carichi sullo scafo è trattata nel successivo paragrafo VALUTAZIONI DEI CARICHI A BREVE TERMINE IN STATI DI MARE CONFUSO.

Valori medi ed estremi a lungo termine

La seconda categoria si riferisce ad un periodo di tempo più lungo, che può essere misurato in giorni o anni, durante il quale gli stati di mare possono variare ampiamente da uno stato di calma ad uno di tempesta severa, ma la velocità alla quale tali stati si modificano è sufficientemente bassa che il presupposto di uniformità è di buona approssimazione durante il periodo di poche ore. Quindi, la risposta a lungo termine può essere pensata come una somma delle risposte a breve termine di differenti stati di mare, avente ciascuno caratteristiche uniformi o statisticamente stazionarie. Questa accumulazione di esperienze a breve termine si estenderebbe, nel caso di navi e di strutture oceaniche, per un periodo di tempo uguale alla durata di funzionamento utile da venti a trenta anni. Questo metodo è discusso nel paragrafo VALORI ESTREMI A LUNGO TERMINE.

Valori ciclici cumulativi

La terza categoria nella suddetta lista si riferisce al fenomeno di carico ciclico di lungo termine che può causare un danno cumulativo a fatica per la struttura. Qui i numerosi cicli da livello basso a moderato del momento flettente e delle tensioni possono contribuire ad un danno paragonabile a quello causato da pochi cicli di sforzo estremo. Per questo deve essere considerata la gamma completa dei carichi indotti dalle onde, compresi i valori moderati più numerosi ed i termini elevati meno frequenti. Sarà mostrato nel seguito che le informazioni più importanti sul carico ciclico possono essere ricavate dalla seconda categoria di dati a lungo termine, una volta espresse come probabilità di superamento. Un'ulteriore discussione sulla fatica è contenuta nel paragrafo CARICHI DINAMICI.

VALUTAZIONI DEI CARICHI A BREVE TERMINE IN STATI DI MARE CONFUSO

Per gli scopi del progetto strutturale è necessario avere informazioni riguardo ai valori dei carichi molto elevati o estremi piuttosto che una massa di valori medi. In generale ci sono due approcci al problema:

- *probabilità di supero;*
- *teoria del valore estremo.*

La valutazione della probabilità di supero è più semplice, dato che se conosciamo la funzione di densità dei carichi, questa curva può essere integrata per dare la probabilità di supero ai differenti livelli di carico, quindi del valore che penseremmo sia oltrepassato una volta in un certo numero di cicli. Ma se noi conosciamo la funzione di densità, possiamo anche applicare i principi del calcolo convenzionale del valore estremo per ottenere il più alto valore previsto in un certo numero di cicli. Di solito il valore da oltrepassare una volta ed il valore più alto sono quasi uguali ed il primo è adatto agli scopi progettuali.

La statistica a breve termine dei massimi o dei picchi di qualsiasi risposta, compreso il momento flettente o gli sforzi, possono essere determinati a partire dai momenti dello spettro di risposta. Per scopi pratici è solitamente possibile ipotizzare un processo a banda stretta, nel qual caso le statistiche sono definite da una funzione di densità di Rayleigh (cioè, $\epsilon=0$). La corrispondente funzione di distribuzione (cumulativa) di Rayleigh definisce la probabilità di non supero dei differenti livelli di carico o di sforzo. Ma qui Q è considerata come la probabilità di supero dei vari livelli. Quindi, la funzione di distribuzione è $(1 - Q)$. Poiché la funzione di densità di Rayleigh è:

$$(8) \quad q(x) = \frac{x}{m_0} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2m_0}\right)$$

la probabilità di supero è:

$$(9) \quad Q(x > x_1) = \int_{x_1}^{\infty} q(x) dx = \exp\left(-\frac{x_1^2}{2m_0}\right)$$

Quindi, la probabilità di supero può essere calcolata facilmente come funzione del parametro, m_0 . Il numero di cicli, n , al quale un valore si pensa sia uguale o ecceda x_1 (il periodo di ritorno) è, $n = 1/Q = \exp [x_1^2 / 2 \cdot m_0]$. La quantità m_0 è la varianza statistica del processo stocastico, uguale al momento zero o area dello spettro del processo ed il valore $\sqrt{m_0}$ è il valore di rms.

A volte i progettisti preferiscono lavorare con il più alto valore previsto del carico, che è calcolato sulla base della teoria degli estremi. Oltre al breve termine i valori estremi per il massimo di un processo stocastico a banda stretta sono forniti da un'espressione della forma:

$$(10) \quad \bar{Y}_n = C_n \sqrt{m_0}$$

Il valore estremo in questione, Y_n , è definito come il valore previsto della più alta singola escursione o massimo in un campione di n escursioni. C_n è una costante dipendente da n , approssimativamente $2\sqrt{\ln(n)}$, per grandi valori di n .

Come conseguenza della casualità del mare e delle risposte della nave, sia il valore previsto di supero che il valore massimo previsto sono soggetti a variazioni. Così se molte registrazioni fossero prese su molte navi nello stesso stato di mare, il valore più alto di alcune delle registrazioni sarebbe più grande del valore previsto calcolato dall'equazione (10) e di altre sarebbe più basso. I valori di picco per determinati n saranno quindi caratterizzati da una loro propria distribuzione di probabilità che avranno una dispersione rispetto ad un valore medio. Riguardo all'esperienza di una singola nave che subisce un totale di n oscillazioni di momento flettente, il valore dato dalla (10) deve essere interpretato come la valutazione del valore medio o del valore previsto del più alto picco. In alcune analisi è usato il valore modale o più probabile anziché la media e questo è dato da un'espressione simile alla (10) ma con i valori modificati del coefficiente, C_n . Per n superiore a 1.000, che è tipico di tre o quattro ore di moto ondoso, i valori modal e medi risultano quasi identici.

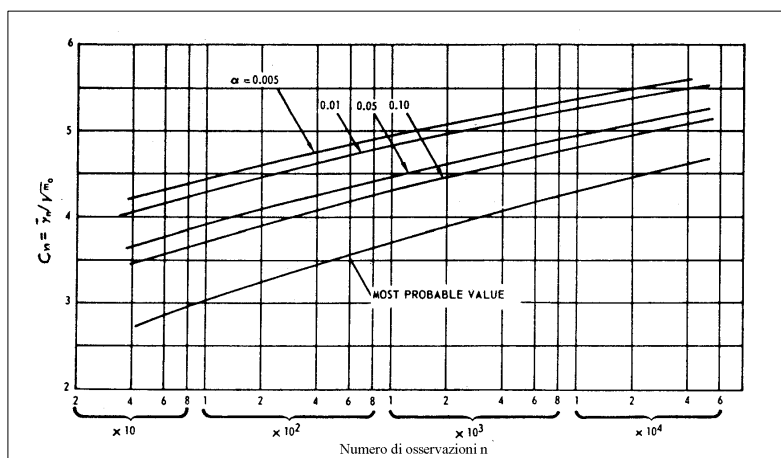


Figura 12

Per ottenere una stima più utile del valore estremo che rifletta la casualità dei picchi, Ochi ha applicato alla probabilità di supero il parametro di rischio α . La stima del valore del picco estremo in una sequenza di n escursioni è ancora dato da un'espressione della forma di (10), ma la costante C_n è ora una funzione della α così come di n . La Figura 12 presenta valori di C_n modificato per il processo stocastico a banda stretta come funzione del parametro di rischio α .

Così il valore stimato del più alto momento flettente per un parametro di rischio di 0.01, è dato dall'equazione (10) con C_n preso dalla Figura 12 e questo valore si applicherà a tutte le navi in una flotta ipotetica di tante navi simili.

Se noi ora esaminassimo le registrazioni del momento flettente per tutte le navi nello stesso stato di mare ed estraessimo da ogni registrazione il singolo picco più alto, troveremmo che con $\alpha=0.01$ il valore stimato dalla presente procedura è oltrepassato dai valori misurati al vero approssimativamente dall'un per cento delle navi. Si noti che se avessimo stimato il valore più probabile per il picco del momento flettente, avremmo potuto trovare il valore stimato superato dal valore reale approssimativamente nel 63 % delle navi.

Abbiamo visto nella Figura 12 che C_n aumenta pochissimo quando α assume valori minori di 0.01. Per questo motivo, un valore di $\alpha=0.01$ è a volte considerato adatto agli scopi progettuali, a condizione che si stia considerando una singola situazione a breve termine ove siano note la condizione del mare (spettro) e la relativa durata.

La suddetta teoria, applicabile alle situazioni a breve termine, è d'utilità diretta limitata per il progetto della nave, poiché per gli scopi principali del progetto dobbiamo tenere conto delle varie e differenti condizioni del mare che devono essere incontrate dalla nave durante il corso della vita operativa. Tuttavia, se fossimo capaci di definire lo spettro dello stato di mare più severo, che una struttura quale una piattaforma fissa potrebbe essere in grado di sopportare, oltre alla relativa durata (persistenza), noi potremmo predire il più alto carico previsto mediante le tecniche del breve termine.

L'idea di progettare con carichi che corrispondono ad un'estrapolazione delle onde estreme alle più alte previste in un periodo di 50 o 100 anni è stata usata molto nell'ingegneria civile e recentemente in alcuni rami dell'ingegneria navale. La pratica in vigore nel progetto delle piattaforme "off-shore" per il Mare del Nord è di progettare per "la tempesta dei 100 anni". Le altezze d'onda ed i periodi corrispondenti sono stati derivati dalle analisi dei dati delle onde utilizzando la teoria del valore estremo. Dovrebbe essere notato in questo contesto che il valore dell'onda estrema è l'"estremo più probabile" ed ancora che c'è una probabilità significativa di superare questo livello nel primo, o successivo, dei campioni di lunghezza uguale al periodo di ritorno. Di conseguenza, un certo margine di progetto deve essere definito, nei fattori di sicurezza usati successivamente, o nella definizione di un adeguato periodo di ritorno di progetto. Per esempio, se è gradito fissare un valore estremo per il progetto in modo che vi sia un 80 per cento di probabilità che il valore non sia oltrepassato in un'esposizione di 20 anni, il periodo di ritorno di progetto può essere definito come $[20/(1-0.8)] = 100$ anni.

Si noti inoltre che il suddetto metodo suppone che il più severo stato di mare produrrà il più alto carico. Questo potrà essere vero per una piattaforma fissa, ma non lo potrà essere necessariamente per navi ed altre strutture galleggianti. Il carico estremo dipende dalle caratteristiche di risposta della nave o di altre strutture, così come dal tempo previsto di esposizione (probabilità e durata degli stati di mare severi).

VALORI ESTREMI A LUNGO TERMINE

Quando dobbiamo occuparci della previsione del carico più severo che può essere affrontato da una nave o da una struttura durante l'intero corso della sua vita utile, non possiamo più ammettere che le condizioni del mare o gli stati di

funzionamento della nave possano rimanere costanti. Possono essere incontrati stati di mare di severità variabile dalla calma piatta alla tempesta più violenta e l'accadimento e la durata delle condizioni del mare nei vari gradi di severità dipenderanno dal profilo operativo geografico e stagionale della nave o della piattaforma. Gli stati di carico, di velocità e di rotta varieranno da un periodo di tempo ad un altro e l'influenza di tutte queste variabili deve essere inclusa nel calcolo del carico estremo a lungo termine. Come nel caso del breve termine, non è generalmente possibile ottenere un singolo preciso valore per il carico più alto. Invece, la risposta deve essere espressa sotto forma di probabilità a lungo termine. Ci sono i due approcci fondamentali - come nel caso del breve termine - di probabilità di supero e teoria del valore estremo. Nonostante l'ultimo approccio non sia adatto a fornire i dati ciclici di carico per i problemi di fatica, questi ha fornito un metodo utile di estrapolazione dei dati estremi osservati del carico agente e dell'onda incontrata in navigazione al caso dell'analisi a lungo termine. Il metodo più comune coinvolge la valutazione delle probabilità di supero, o quella che è stata denominata distribuzione a lungo termine, che sono distribuzioni iniziali sintetizzate dei massimi di risposta, o probabilità di supero per ciclo di carico. Ci sono attualmente una dozzina di metodi in uso per ottenere tali distribuzioni a lungo termine. Oltre che l'ipotesi di linearità della risposta, un presupposto fondamentale fatto in tutti i metodi è che a breve termine i massimi della risposta abbiano una struttura di probabilità definita tramite la distribuzione di Rayleigh ($\epsilon=0$); cioè che a breve termine la risposta è un processo a banda stretta gaussiano stazionario a media-zero con i massimi definiti dal singolo parametro, $m_0 = \sigma^2$. Le probabilità a breve termine sono condizionali, cioè, presuppongono valori differenti per ogni valore di m_0 . Nello specifico, la densità può essere scritta:

$$(11) \quad f(x|m_0) = \frac{x}{m_0} \exp\left(-\frac{x^2}{2m_0}\right)$$

dove m_0 è il momento spettrale zero che rappresenta la risposta media quadratica di ogni esposizione a breve termine. Questo singolo parametro, m_0 , definente una distribuzione di Rayleigh è considerato come una variabile casuale dipendendo dalla condizione del mare, dalla velocità, dal carico e dall'angolo di incontro della nave durante ogni intervallo a breve termine. A causa dei presupposti dichiarati innanzi il seguente sviluppo della teoria si pensa possa essere cautelativo. Per ottenere una distribuzione a lungo termine è necessario considerare molti intervalli differenti a breve termine, in ciascuno dei quali la risposta è definita da m_0 . Questa è la ragione per cui la geometria e le caratteristiche della nave sono inserite nell'analisi. I fattori che interessano il valore di m_0 includono la velocità V , l'angolo di incontro μ , lo stato di caricazione, una misura di altezza d'onda, H , qualche misura del periodo dell'onda, quale T_m , il periodo modale, ed a volte un'altra misura della forma o della figura spettrale dell'onda.

Per sviluppare una distribuzione a lungo termine in pratica, sono necessarie alcune semplificazioni. La velocità, V , può essere eliminata riconoscendo che non è una variabile indipendente e specificando che per ogni intervallo di tempo la velocità è quella che è adatta per la condizione del mare prevalente, per la caricazione e per l'angolo d'incontro nave-onda da cui dipende (si noti che il momento flettente in ogni caso non è influenzato notevolmente dalla velocità della nave). La variabile dell'angolo di incontro, μ , non può essere eliminata, ma è consueto supporre che vi è una probabilità uguale per tutti gli angoli di incontro, quindi è statisticamente indipendente dalle altre variabili. Ciò non può essere vero su qualsiasi viaggio, ma tende ad essere tale considerando molti viaggi ripetitivi. Per concludere, il carico può essere trattato supponendo che il numero di condizioni sia limitato (viaggi con carico alla marca e ritorno in zavorra), ciascuno con un momento flettente medio (in acqua tranquilla) differente e che possono allora essere effettuati per ciascuna di queste condizioni calcoli completamente indipendenti. Supponendo che due parametri, H e T , siano sufficienti per descrivere lo stato di mare, si assumeranno i parametri, μ , H e T .

Se i suddetti fattori saranno assunti per essere variabili casuali, quindi anche il momento spettrale, m_0 , lo è e la relativa densità di probabilità è condizionale. Riconoscendo i rapporti condizionali fra la risposta, x , ed m_0 ed il rapporto condizionale fra m_0 e tutti gli altri fattori enumerati innanzi, una densità di probabilità a lungo termine può essere assunta nella seguente forma:

$$(12) \quad q(x, m_0, \mu, H, T) = f(x|m_0) \cdot q(m_0|\mu, H, T) \cdot q(\mu, H, T)$$

dove il primo fattore è la densità condizionale a breve termine della x , equazione (11) ed il secondo è la densità condizionale di m_0 , dati i fattori operativi ed ambientali. Per concludere, l'ultimo fattore è la densità congiunta di probabilità dei parametri che influenzano m_0 .

Per ottenere la densità di probabilità a lungo termine della risposta, x , l'equazione (12) deve essere integrata riguardo ad m_0 , μ , H e T . Tuttavia, la probabilità a lungo termine di interesse è quella dei picchi di risposta o dei massimi della x che eccedono un certo livello, ad esempio x_1 . Questa è ottenuta integrando la densità di probabilità a lungo termine della x riguardo alla x nell'intervallo da x_1 all'infinito. Nell'ipotesi di Rayleigh, e dell'equazione (11), quest'ultima integrazione può essere fatta formalmente, di modo che alla fine la probabilità a lungo termine che una risposta ecceda x_1 può essere scritta:

$$(13) \quad Q(x > x_1) = \int_{m_0} \int_{\mu} \int_H \int_T \exp\left(-\frac{x_1^2}{2m_0}\right) \cdot q(m_0|\mu, H, T) \cdot q(\mu, H, T) dm_0 d\mu dH dT$$

Lo sviluppo di una procedura d'ingegneria utilizzabile richiede quindi la sintesi delle probabilità congiunte e condizionali e la loro integrazione, ed è qui che comincia la divergenza nei vari metodi esistenti. Non conosciamo le esatte densità di probabilità di nessuno dei fattori coinvolti, molto meno la forma della loro densità congiunta. I tecnici dei vari metodi hanno dovuto interpretare i dati storici degli stati di mare, adottare mezzi per utilizzarli nelle integrazioni richieste, adottare ancora mezzi per trattare la velocità, l'angolo di incontro ed i fattori di caricazione ed infine hanno avuto la scelta dell'ordine di integrazione. Il risultato è che i vari metodi sembrano differire più di quanto lo fossero fondamentalmente. Qualunque sia il metodo il risultato finale è una distribuzione iniziale definita numericamente dei massimi nella grande messe di distribuzioni a breve termine di Rayleigh, che in effetti sono sovrapposte nella sintesi. Alcuni scelgono tracciare i risultati su una carta probabilistica.

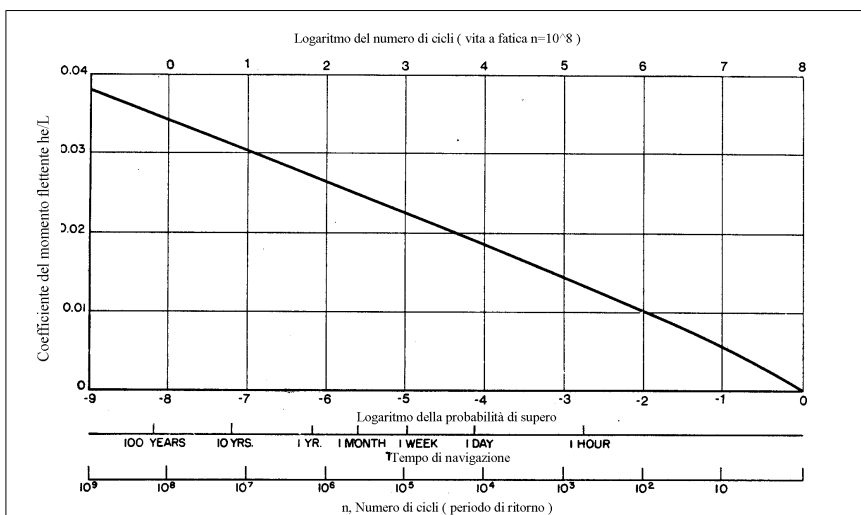


Figura 13

La Figura 13 da Band, è una forma piuttosto comune della presentazione.

L'ordinata è il livello x_1 , nell'equazione qui sopra. L'ascissa è una scala logaritmica di Q ($x > x_1$), o il relativo reciproco, n , conosciuto come il periodo di ritorno (entrambi sono indicati nella figura). È importante notare che i risultati della formulazione della probabilità solo che il picco di un'escursione della risposta, scelto a caso, sia più grande di un certo livello (nell'esempio la probabilità è circa 10^{-8} che il coefficiente di momento flettente ecceda circa 0.035). Approssimativamente, la formulazione coinvolge la probabilità per ciclo di risposta.

Questa è la ragione per cui i calcoli sono effettuati per tali basse probabilità. La scala ausiliaria nella Figura indica approssimativamente, sulla base dei periodi medi d'incontro per la nave, il tempo d'esposizione e come può essere notato è necessario considerare probabilità minori di 10^{-7} per rappresentare le vite della nave ed i suoi multipli.

Per illustrare le considerazioni assunte nei metodi di previsione a lungo termine faremo una semplificazione particolare dell'equazione (13). Si supponga che le gamme di tutte le variabili, μ , H e T siano sistematicamente divisi in intervalli discreti di larghezza tale che il valore della variabile al centro dell'intervallo è rappresentativo della variabile ovunque nell'intervallo. Con questo presupposto l'equazione (13) può essere approssimata come sommatoria:

$$(14) \quad Q(x > x_1) = \sum_{m_0} \sum_{\mu} \sum_H \sum_T \exp\left(-\frac{x_1^2}{2m_0}\right) q(m_0|\mu, H, T) \cdot p(\mu, H, T) dm_0$$

dove è implicito che sono stati considerati i valori centrali discreti delle variabili. La funzione, $p(\mu, H, T)$ denota la probabilità che le variabili, μ , H e T si trovino simultaneamente nei loro rispettivi intervalli. In questa forma la probabilità condizionale del momento spettrale, m_0 , rappresenta la variazione statistica di questo parametro riguardo al valore che sarebbe stato valutato considerando ciascuno dei valori centrali riparati e applicando i metodi noti.

Ora per gli scopi attuali possiamo fare un'ulteriore assunzione semplificativa. Si supponga che gli intervalli in cui il campo delle variabili, μ , H , T sono suddivisi siano sufficientemente piccoli che il momento spettrale che può essere valutato considerando i valori centrali delle variabili fissate, sia anche rappresentativo del momento che sarebbe stato ottenuto a condizione che le variabili μ , H , T fossero state ovunque all'interno dei limiti dei loro rispettivi intervalli. Tutto questo per dire che il momento spettrale, m_0 , è una funzione deterministica dell'angolo d'incontro della nave e dello stato di mare. Con questo presupposto la probabilità condizionale nell'equazione (14) tende verso una funzione delta e quando è effettuata integrazione rispetto a m_0 l'espressione si trasforma in:

$$(15) \quad Q(x > x_1) \approx \sum_{\mu} \sum_H \sum_T \exp\left(-\frac{x_1^2}{2m_0}\right) \cdot p(\mu, H, T) dm_0$$

dove la notazione è stata migliorata per facilitare ulteriori sviluppi. In particolare, le sommatorie sono eccedenti rispetto a tutti gli intervalli discreti precedentemente definiti e gli argomenti della probabilità unita simbolizzano i valori centrali definiti insieme con l'equazione (14). Ancora più importante, il valore di m_0 nell'esponentiale è preso come funzione deterministica dei valori centrali delle variabili operative ed ambientali. In questa forma il problema della sintesi diventa quello di costruire una rappresentazione discreta della probabilità congiunta.

Per illustrare come questa probabilità congiunta potrebbe essere costruita si può argomentare come segue. Immaginiamo la vita della nave suddivisa in tantissimi intervalli di breve termine, per esempio, 4 ore ciascuno, durante i quali gli stati di caricazione, di velocità della nave, dell'angolo d'incontro e dello stato di mare rimangano costanti. Ora, si supponga che i valori di tutti i parametri, μ , H , T siano conosciuti per ciascuno di questi intervalli di tempo. Ciò, in effetti richiede che siamo capaci di predire il profilo operativo della nave nei termini della sua caricazione, velocità ed angoli d'incontro oltre che delle condizioni atmosferiche che incontrerà. Le previsioni della caricazione della nave, della velocità e del tragitto sono effettuate normalmente dall'armatore o dal progettista della nave come una parte del processo preliminare di progettazione. Le previsioni del mare e delle condizioni atmosferiche che la nave incontrerà dipendono dalla disponibilità di una base di dati degli stati di mare di forma ed estensione opportuna.

Nell'equazione (15) lo stato di mare è rappresentato da due parametri, la misura dell'altezza, H e del periodo T . In alcune formule spettrali, soltanto un parametro, per esempio l'altezza significativa, $H_{1/3}$ è usata per caratterizzare lo stato di mare. In altri è impiegato il parametro ulteriore, T_z , periodo zero-crossing, o T_m , periodo modale, al fine di dare mezzi più flessibili per rappresentare una vasta gamma dei spettri di aspetto o forma simile (cioè delle famiglie). Idealmente, dovrebbe essere considerata anche la variazione nella figura degli spettri, poiché gli spettri degli stati di mare oceanico misurati al vero mostrano una considerevole varietà compresi i doppi picchi che derivano dalla sovrapposizione di onde provenienti da due o più tempeste. Ma per semplicità spesso si considera che due parametri bastino.

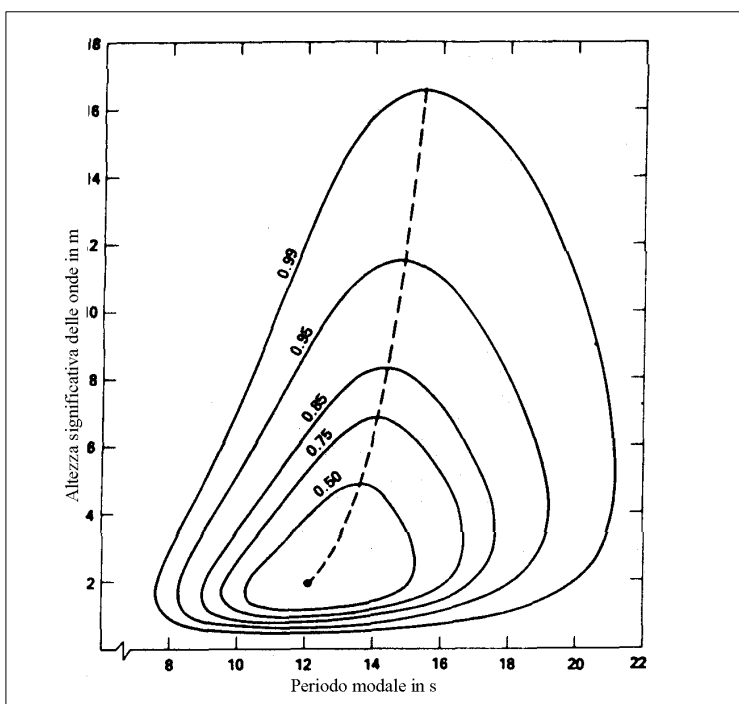


Figura 14

La frequenza di occorrenza a lungo termine di stati di mare di differente severità ma dalla forma spettrale simile può allora essere espresso in termini di funzione di densità di probabilità congiunta per $H_{1/3}$ e T_m . Questa densità di probabilità congiunta di $H_{1/3}$ e T_m può essere rappresentata, per una data zona dell'oceano, sotto forma di tabella, come in Hogben ed in Lumb, o di un diagramma come indicato nella Figura 14.

I valori nelle tabelle, o nel diagramma, sono uguali alla probabilità (frazione del tempo) che lo stato di mare sia caratterizzato dall'accadimento simultaneo dei valori di H che fanno parte dell'intervallo da H_1 ad H_2 e di T che fanno parte da T_1 a T_2 . Questo presupporrebbe una singola forma per lo spettro (per esempio Bretschneider o JONSWAP). Se la nave opera in zone geografiche differenti che hanno stati di mare differenti, tali diagrammi sarebbero richiesti per ogni zona operativa del mare.

Una distribuzione composta degli stati di mare può essere costruita se abbiamo tali tabelle o schemi per tutte le zone operative della nave insieme alle informazioni riguardo alla frazione di tempo che la nave trascorrerà in ogni zona. Per illustrare questa sintesi, si consideri una cisterna che transita tra l'Europa ed il Golfo Persico attraverso il Capo di Buona Speranza. I tratti tropicali dell'itinerario sarebbero caratterizzati da una preponderanza di mare calmo mentre i tratti del Capo sarebbero caratterizzati in larga parte da stati di mare agitato. Sarebbe quindi necessaria una serie di schemi simili alla Figura 14, o una tabulazione della frequenza di accadimento degli accoppiamenti dei valori di $H_{1/3}$ e T_m per rappresentare questi estremi così come le variazioni degli stati del mare tipici di altre parti dell'itinerario. Ora, poiché ogni diagramma "scatter" è, infatti, una funzione bivariata di densità di probabilità che rappresenta la frequenza relativa di accadimento degli stati di mare in tutti i gradi di severità nella zona applicabile dell'oceano, l'integrale del diagramma su tutti i valori di $H_{1/3}$ e T deve essere uguale all'unità. La struttura sarà, comunque, esposta in zone geografiche differenti per periodi di tempo differenti durante ogni frazione del suo viaggio. Le ordinate del diagramma "scatter" per ogni zona lungo l'itinerario devono, quindi, essere moltiplicate per la frazione che esprime la proporzione di tempo che la nave trascorrerà in quella zona. È costruito allora uno schema o una tabulazione composta per l'intero viaggio aggiungendo le ordinate pesate di tutti gli schemi che rappresentano i segmenti di viaggio.

Per ogni insieme di valori delle variabili, μ , $H_{1/3}$ e T_m ora possiamo determinare la risposta del carico della nave e calcolare un valore del momento spettrale, m_0 , della caricazione. Questo calcolo normalmente viene effettuato usando uno dei movimenti della nave e dei programmi di caricazione standard. La sommatoria nell'equazione (15) allora si approssima con:

$$(16) \quad Q(x > x_1) \approx \sum_{\mu} \sum_{H_{1/3}} \sum_{T_m} \exp\left(-\frac{x_1^2}{2m_0}\right) \cdot p(\mu) \cdot p(H_{1/3}) \cdot p(T_m)$$

La forma semplice del prodotto dell'equazione (16) è basata sul presupposto che tutte le variabili casuali restanti siano statisticamente indipendenti. In effetti stiamo facendo un sovrapposizione di molte distribuzioni di Rayleigh, pesate dalla frequenza prevista di accadimento di tutte le combinazioni delle tre variabili. Per usare i risultati forniti dall'equazione (16) nella selezione del valore del carico di progetto, dobbiamo scegliere un carico che ha una probabilità di accadimento accettabilmente bassa e, concettualmente, possiamo continuare nel ragionamento progettuale come segue. Il periodo medio dell'onda d'incontro in mare è di circa dieci secondi. Nel corso della vita di venti - venticinque anni, la nave incontrerà approssimativamente 108 onde, ed il valore esatto dipenderà dal profilo operativo e dalla parte del tempo trascorsa in mare. È ragionevole progettare la struttura in modo che la nave sia capace di sopravvivere al più alto singolo picco di escursione del momento flettente o di un altro carico prevedibile nel corso della vita; così il carico che ha una probabilità di supero di una volta in 10^8 cicli sembrerebbe essere un valore ragionevole da raggiungere. L'equazione (16) esprime la probabilità che alcun picco di oscillazione ecceda il valore x_1 .

Tuttavia, dovrebbe essere notato che il carico che corrisponde a questa probabilità è soggetto a variazione, come nel caso del breve termine. Quindi, durante il corso della vita della nave, ci può essere un valore di picco che supererà il valore che corrisponde alla probabilità 10^{-8} , potrà non essere alcuno o potranno essere vari. Se la nave navigherà per altri venti anni nello stesso servizio, o se consideriamo una seconda nave identica, questo valore 10^{-8} potrà essere oltrepassato una o più volte ancora. Se sarà oltrepassato ancora, il secondo supero potrà essere con un margine molto più grande di quello sperimentato la prima volta o potrà essere con un margine minore. Il problema è simile a quello dell'esperienza a breve termine in cui il parametro di rischio è stato introdotto per misurare le valutazioni probabilistiche degli eventi estremi. Questo comportamento casuale del più alto carico di picco previsto può essere preso in considerazione usando una procedura suggerita da Karst. Questa formula un problema che può essere risolto così: per determinare un momento flettente (o sforzo) x_L tale che la probabilità che una nave lo ecceda nel corso della vita abbia uno specifico valore $P(x > x_1)$, in cui x_1 è il momento flettente previsto che corrisponde ad una vita di n_L massimi (o cicli) $Q(x > x_1) = 1/n_L$. La probabilità specifica $P(x_1 > x_L)$ è un fattore di rischio o livello di confidenza analogo all'“ α ” di Ochi, precedentemente discusso. In base ad un modello di Poisson, il risultato approssimato è che il momento flettente di progetto x_L può essere letto da

$$(17) \quad Q(x > x_1) = P(x_1 > x_L) \cdot Q(x > x_L) = \frac{P(x_1 > x_L)}{n_L}$$

La procedura è illustrata nella Figura 15, ove è mostrato un grafico della funzione $Q(x > x_1) = 1/n$ tracciata nel modo usuale. Ad un livello di probabilità di 10^{-8} , l'ordinata della curva è il valore previsto del carico (momento flettente in mezzeria) che ha questa probabilità di supero in un qualsiasi ciclo.

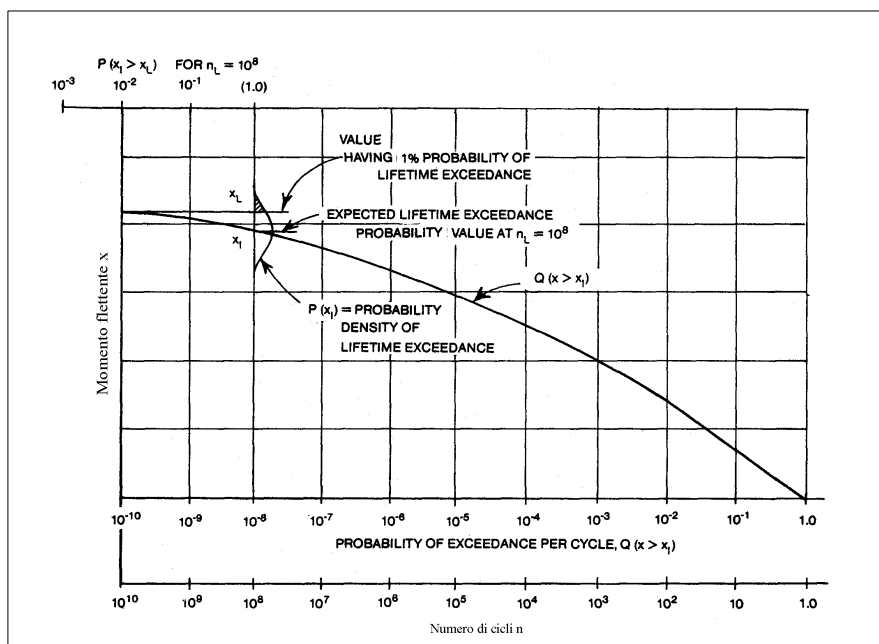


Figura 15

Il grafico piccolo tracciato lungo l'asse verticale a questo livello di probabilità è, schematicamente, la funzione di densità di probabilità dei valori di picco a $1/10^8$ sulla vita della nave. Questa funzione di densità esprime il comportamento casuale dei picchi più alti che accadono in molte registrazioni che contengono ognuna n_L picchi. Il contorno della porzione tratteggiata di questa funzione di densità di probabilità corrisponde al valore dell'un per cento, cioè, la zona tratteggiata è uguale all'un per cento dell'area totale sotto la curva.

Quindi, $P(x_1 > x_L) = 0.01 = 10^{-2}$. Se estrapoliamo questo un per cento su una linea orizzontale verso sinistra, questo interseca la curva $Q(x > x_1)$ molto vicino alla probabilità 10^{-10} , che è il valore dato dalla equazione (17). Questo costituisce

una via conveniente per ottenere $Q(x > x_1)$ per una $P(x_1 > x_L) = 0.01$ estrapolando la curva a lungo termine su valori più bassi di probabilità. Il significato di questo risultato è che si definisce un carico di progetto che potrebbe essere atteso di essere superato una volta su una qualsiasi nave in una flotta di 100 navi simili che prestano lo stesso servizio.

Per esempio, se noi imponiamo $P(x_1 > x_L)$ uguale a 0.01 ed n_L uguale a 10^8 , troviamo che, con buona approssimazione, il carico di progetto x_L , può essere letto a $Q(x > x_L) = 10^{-2} / 10^8 = 10^{-10}$. Con questo si vede che il livello di confidenza un per cento è ottenuto usando il carico di progetto x_L corrispondente alla probabilità di supero $Q(x > x_L)$ che abbia un valore uguale al prodotto del fattore di rischio (o livello di confidenza) ed una probabilità di supero attesa nella vita della nave di n_L cicli. In alternativa, la probabilità di sopravvivenza (fattore di rischio) è:

$$(18) \quad P(x_1 > x_L) = n_L \cdot Q(x > x_L)$$

Si noti che le equazioni (17) e (18) si suddividono, comunque, quando $x_L = x_1$ o $Q(x > x_L) = 1/n_L$. Nel nostro caso $P(x_1 > x_L)$ è 0.667 anziché $P(x_1 > x_L) = n_L \cdot 1/n_L = 1.0$, come dato dall'equazione (18). Si veda la Figura 15.

L'equazione (18) è utile nel calcolo della probabilità di collasso, dato che il fattore di rischio $P(x_1 > x_L)$ può anche essere considerato come la probabilità che qualsiasi nave in una flotta di molte navi simili supererà il valore di carico x_L di progetto durante la sua vita. Quindi, a volte ci si riferisce a questo come probabilità di sopravvivenza per distinguerlo dalla probabilità per ciclo, $Q(x > x_L)$, o $1/n$. Si noti inoltre che una curva di $P(x_1 > x_L)$ può essere ottenuta per ogni valore di n_L aggiungendo una nuova scala al diagramma di $Q(x > x_L)$. Per esempio, una scala di $P(x_1 > x_L)$ è stata aggiunta alla parte superiore della Figura 14 per $n_L = 10^8$.

L'analisi precedente restituisce una valutazione del valore della probabilità di supero prevista durante il lungo periodo di esposizione in cui si incontrano la gamma completa di variazione delle velocità, degli angoli di incontro di altre variabili. L'equazione (16) è basata sulla distribuzione di Rayleigh per i valori di picco del processo casuale e, come precisato da Ochi, non contiene esplicitamente il periodo d'esposizione. Invece, si dovrebbe pensare a come applicarlo ad un largo numero di escursioni di picco valutato approssimativamente durante la vita della nave. Per calcolare esattamente il numero di picchi di oscillazione nel periodo di tempo, operiamo come segue. Durante uno degli intervalli a breve termine in cui le variabili, μ , $H_{1/3}$ e T_m rimangono costanti, il numero medio di zero-crossing nell'unità di tempo è dato da:

$$(19) \quad N_z = \frac{1}{2} \pi \sqrt{\frac{m_2}{m_0}}$$

Qui, m_2 , è il secondo momento dello spettro della risposta. È coerente con il presupposto di Rayleigh che ad ogni passaggio sullo zero corrisponde un picco del processo casuale, di modo che l'equazione (19) darà inoltre il numero di picchi nell'unità di tempo, n_z . Ora, se T è uguale al periodo a lungo termine in ore, il tempo totale durante il quale un gruppo specifico di variabili, μ_i , H_j e T_k , possa prevalere è dato da:

$$(20) \quad T_i = p(\mu) \cdot p(H) \cdot p(T)$$

ed il numero totale di oscillazioni durante il tempo T da:

$$(21) \quad N = T \sum n_z p(\mu) \cdot p(H) \cdot p(T)$$

Per comprendere questo numero nel calcolo della probabilità, Q , ogni termine nell'equazione (16) deve essere ora moltiplicato per una funzione che ne determini il peso che è costituita dal rapporto del numero di picchi di oscillazione corrispondente a ciascuno degli intervalli della sommatoria., al numero totale di picchi dati dall'equazione (21), $n_z^* = n_z(\mu, H, T) / \sum n_z p(\mu) p(H) p(T)$ anziché 1.0, come presupposto nell'equazione (16). Quindi, il risultato finale, modificato per esprimere la probabilità in termini di tempo, è

$$(22) \quad Q(x > x_1) = \sum_{\mu} \sum_H \sum_T n_z \cdot \exp\left(-\frac{x_1^2}{2m_0}\right) \cdot p(\mu) \cdot p(H) \cdot p(T)$$

Lewis e Zubaly hanno valutato un esempio che indica che i risultati ottenuti dalla (16) e dalla (22) sono quasi gli stessi per la portacontaineri utilizzata come esempio. Questo è spiegato notando che i valori più alti di momento flettente generalmente si presentano in mari di prua che corrispondono al numero più grande di picchi, od alle più alte frequenze medie di oscillazione. I carichi in mari di poppa sono generalmente molto più bassi e danno pochissimo contributo alle probabilità complessive. La procedura precedente conduce ad una valutazione dei valori di supero a lungo termine che prende in considerazione tutti i differenti stati di mare che la nave può incontrare durante la sua vita. La sommatoria pesata include i contributi del mare poco mosso che accadono frequentemente ma individualmente hanno basse probabilità di causare eventi estremi e degli stati di mare in tempesta, ciascuno dei quali ha un'alta probabilità di causare un evento estremo ma che occorrono relativamente poco di frequente. Come conseguenza della vasta gamma delle

circostanze da includere in un calcolo di questa natura, si vede che le risorse di calcolo richieste possono essere considerevoli.

Per il problema del calcolo dei carichi ciclici per il calcolo a fatica, è importante notare che la distribuzione a lungo termine discussa qui può fornire le informazioni di base. La Figura 13 mostra una tal distribuzione, con una scala di probabilità ed il numero di cicli nella parte inferiore. Se la vita della nave per gli studi di fatica si ipotizza che corrisponda a 10^8 cicli, è stata riportata una nuova scala invertita, come indicato sulla parte superiore, ove è riportato il numero di cicli previsti per raggiungere qualsiasi specifico livello di momento flettente.

ESTRAPOLAZIONE DEI VALORI ESTREMI OSSERVATI

Un metodo alternativo al problema dei carichi di progetto considera soltanto i più grandi massimi (estremi) nei campioni a breve termine anziché tutti i massimi. Le applicazioni della teoria dei valori estremi sono presentate in situazioni in cui la distribuzione iniziale è conosciuta nella forma chiusa, come nel caso di un processo gaussiano stazionario a media nulla come una registrazione di moto ondoso o una registrazione della risposta a breve termine della nave in navigazione. La teoria può anche essere applicata ed estesa al caso dell'estrapolazione dei dati storici a lungo termine sotto forma di registrazione sia delle onde che delle risposte della nave.

Se sono disponibili i dati storici sugli estremi (cioè, i valori più alti) in molti campioni di una popolazione, può essere utilizzato il metodo classico di Gumbel per prevedere gli estremi che potrebbero probabilmente accadere in futuro. Poiché la funzione di densità degli estremi tende ad essere più concentrata della densità iniziale, possono essere derivate le forme asintotiche della densità degli estremi che dipendono essenzialmente dalle proprietà generali della densità iniziale.

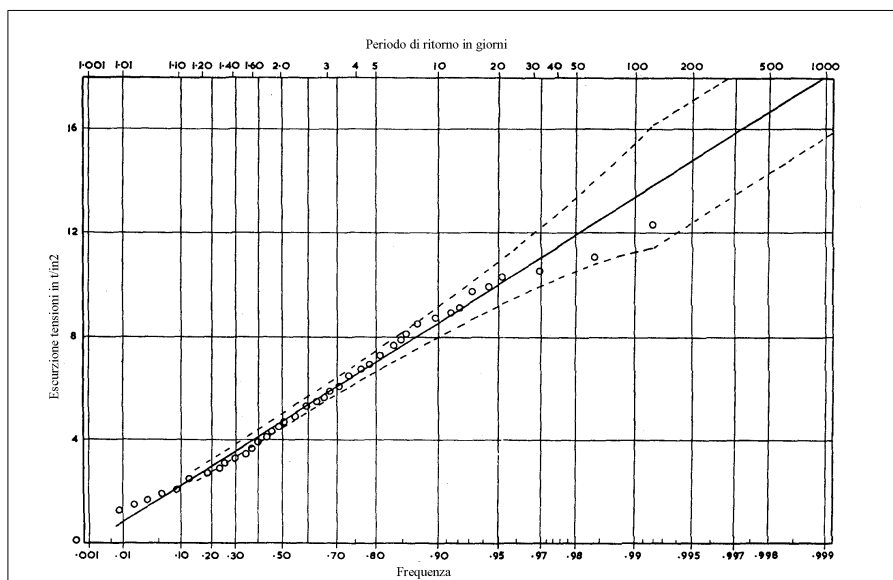


Figura 16

Sono state calcolate le frazioni $m/(N+1)$ per $m = 1, N$ e queste rappresentano una valutazione della distribuzione di probabilità che corrisponde ad ogni livello dell'osservazione. Il punto seguente è stato di presupporre una distribuzione analitica ed adattarne i dati. La distribuzione assunta nell'esempio, Figura 16, era la prima distribuzione asintotica degli estremi. Il metodo usuale per adattare i dati è di usare una carta probabilistica adatta alla distribuzione presupposta.

Le frazioni sono tracciate su una tal carta nella Figura 16, dove la gamma delle sollecitazioni è l'ordinata e la frequenza distorta o scala di probabilità è l'ascissa. La scala di probabilità in tutte le carte probabilistiche è distorta in modo tale che la distribuzione teorica risulti tracciata come una linea retta.

In questo modo adattare i dati alla distribuzione assunta significa adattare la migliore linea retta come indicato nell'esempio. Le linee tratteggiate nella figura sono limiti di confidenza. Nell'esempio sono state calcolate in modo tale che nella dispersione dei dati nei confronti della linea retta dovuto agli errori casuali, può essere atteso, nell'intervallo tracciato dalle linee tratteggiate, il 68% dei dati. Queste linee forniscono un criterio di verifica statistico per l'adeguatezza della misura dell'osservazione alla distribuzione teorica presupposta. L'estrapolazione dei dati in modo da prevedere gli estremi che hanno probabilità di accadere in eventi futuri è stata fatta semplicemente estendendo la linea retta fino a livelli elevati di probabilità. Dovrebbe essere notato riguardo ai dettagli dell'adattamento nella Figura 16 che i dati sembrano deviare sistematicamente dalla linea retta. Questo aumenta i punti che nessuna delle varie distribuzioni analitiche che possono essere presupposte possa garantire il migliore adattamento riguardo ad un dato insieme di dati. L'arte del metodo è di trovare l'approssimazione analitica migliore. La distribuzione di Weibull è stata utile a questo fine.

Un metodo ibrido interessante per il problema dei carichi di progetto è stato discusso dettagliatamente da Ochi. Invece di integrare sopra tutti gli stati di mare immaginabili sono derivate dai dati storici le circostanze più gravi che hanno

La Figura 16 da Yuille è inclusa per illustrare il metodo. In questo caso particolare i dati erano le letture quotidiane di un estensimetro meccanico installato su una nave da guerra.

Ogni lettura è la massima oscillazione delle sollecitazioni sperimentate in un giorno in mare e può essere interpretata così come l'estremo nel campione di un giorno. Per analizzare un insieme N di tali osservazioni sono stati organizzati per grandezza crescente e sono numerati con $m = 1, 2, \dots, N$, convertendo così le osservazioni in sequenze statistiche.

probabilità di accadere oltre alla loro persistenza (durata) e tramite la teoria estrema a breve termine, con il fattore di rischio adatto, è stata applicata soltanto alle risposte a questi mari in tempesta. Alcuni confronti fatti con i risultati ottenuti con il metodo della somma pesata a lungo termine mostrano un buono accordo. Il successo del metodo dipende dall'abilità dell'utente nel considerare un numero sufficiente di mari severi, tenendo conto delle loro probabilità e persistenza, per stabilire chiaramente la risposta "più estrema". Per la maggior parte dei problemi di progetto della nave è suggerito il metodo a lungo termine descritto precedentemente, poiché fornisce informazioni più complete, come i dati ciclici di carico per fatica.

CARICHI DINAMICI

Si distinguono i seguenti carichi dinamici:

- *springing (sobbalzare);*
- *carichi di slamming (impatto);*
- *carichi inerziali sui componenti.*

Springing

Un effetto importante delle onde del mare su alcune navi è l'eccitazione della vibrazione casuale dello scafo che può continuare per lunghi periodi di tempo. Questo fenomeno, conosciuto come springing, è stato notato specialmente nelle porta rinfuse dei Grandi Laghi, ma è stato segnalato anche sulle grandi navi d'alto mare con alti coefficienti di finezza. La spiegazione è che le navi lunghe con bassa immersione ed altezza di costruzione sono comparativamente flessibili nella flessione longitudinale e conseguentemente hanno periodi naturali insolitamente lunghi della vibrazione verticale dello scafo (periodi a due nodi di 2 sec o più). Gli studi sperimentali e teorici hanno confermato che quando una tale nave sta transitando nelle onde comparativamente corte che danno risonanza con il periodo naturale di vibrazione, è prodotta una vibrazione significativa. Una corrispondente fluttuazione nelle tensioni in mezzeria è quindi sovrapposta alla sollecitazione di flessione dell'onda quasi statica.

È stata applicata la già sviluppata "strip theory" allo springing nelle onde corte. Anche se i movimenti springing di una nave possono essere molto piccoli, la teoria fornisce le informazioni sulle forze eccitanti che agiscono sulla nave nelle onde corte che producono tale fenomeno. Quindi, quando queste forze si applicano alla nave come una semplice trave può essere prevista la risposta vibratoria. Malgrado il fatto che la "strip theory" non sia rigorosamente applicabile a tali onde corte, i risultati per una nave d'alto mare sono stati trovati in buon accordo con le misure al vero.

Se le onde che eccitano lo springing fossero regolari, lo springing potrebbe essere evitato da un piccolo cambiamento nella velocità. Ma in una rotta reale che contiene una vasta gamma di frequenze lo springing varia in modo casuale ed un cambio di velocità può avere scarso effetto. L'eccitazione e la risposta dello springing possono allora essere trattate come i processi stocastici che possono essere maneggiati mediante le tecniche già discusse. Tuttavia, è stato studiato che le onde più lunghe nello spettro possono anche eccitare la vibrazione dello scafo. Ciò introduce aspetti non lineari che sono importanti da considerare rispetto alle risposte strutturali.

Carichi di slamming

Quando una nave viaggia ad alte velocità, particolarmente in mari di prua, questa può occasionalmente emergere da un'onda e rientrare nell'onda seguente con un impatto gravoso o slam mentre il fondo entra in contatto con l'acqua. Altri fenomeni sono associati all'impatto di grandi onde con le strutture di prua costituite da pennoni o da masse d'acqua "green water" che invadono il ponte ed impattano violentemente con le sovrastrutture esistenti. In ogni caso il fenomeno consiste nell'impatto con un'alta velocità relativa fra la superficie libera dell'acqua quasi incompressibile e una parte della struttura della nave.

Due effetti notevoli possono essere causati dallo slamming del fondo. Ci possono essere danni strutturali localizzati nella zona del fondo che ha sopportato la più alta pressione di impatto. Ciò può includere lo sfondamento dei fasciami o l'instabilità dei rinforzi interni, dei ponti e delle paratie.

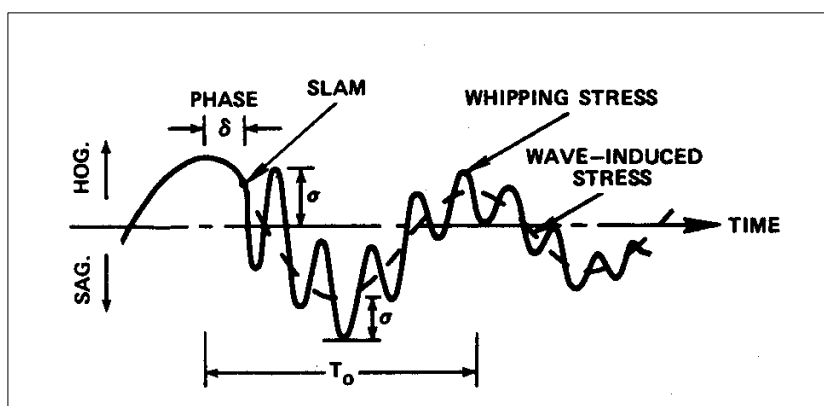


Figura 17

Un secondo effetto dello slamming è una vibrazione transitoria dell'intero scafo in cui il contributo principale viene dal modo di vibrare fondamentale verticale con due nodi.

Questa vibrazione indotta dallo slamming è chiamata whipping e può provocare intensi sforzi di vibrazione uguali nel valore alle sollecitazioni di flessione a bassa frequenza indotte dal moto ondoso. Si veda la Figura 17 che mostra uno schema esemplificativo delle tensioni di "whipping".

Lo slamming è possibile se queste due circostanze agiscono simultaneamente:

- il fondo di prua deve emergere dalla superficie delle onde;
- al momento del rientro la velocità relativa fra la parte inferiore della nave e l'acqua deve eccedere un certo valore di soglia. Da esperimenti su modello, la velocità della soglia è stata misurata prossima a 3.6 m/sec per navi da carico.

L'intensità del whipping dipende dalla grandezza della forza che deriva dalla pressione impulsiva dello slamming, sulla relativa posizione longitudinale e sulla durata dell'impulso di tale forza.

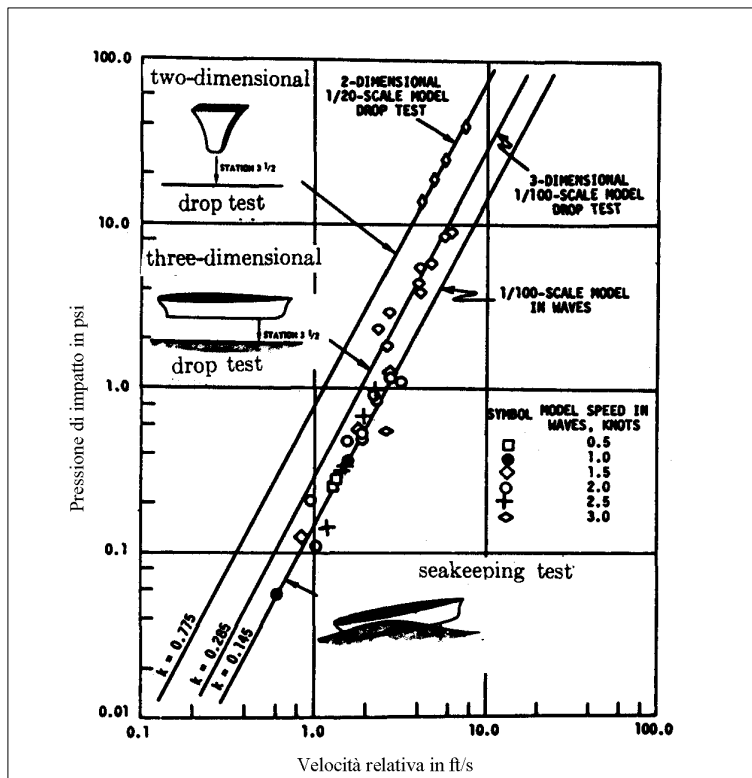


Figura 18

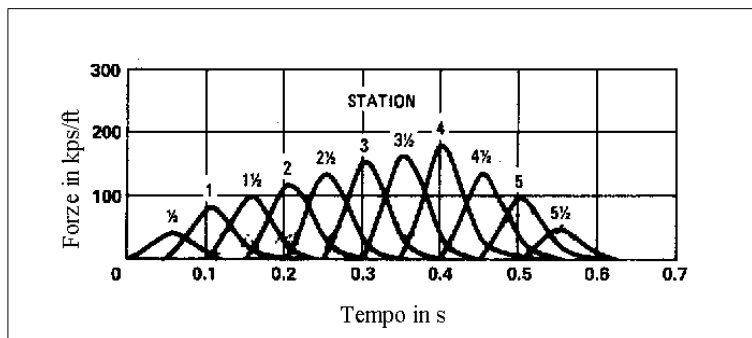


Figura 19

Gran parte delle informazioni disponibili sull'intensità di pressione, p , derivante dallo slamming è stata ottenuta dalle prove di modello. Questi sono stati effettuati con i modelli bidimensionali in acqua tranquilla, con i modelli tridimensionali completi in acqua tranquilla e con i modelli completi che si muovono nel moto ondoso. La Figura 18. contiene una compilazione di tali dati di prova su modello. Questi risultati sono solitamente adattati ad una curva con una forma data da

$$(23) \quad p = k v^2$$

dove v è la velocità verticale relativa. Il coefficiente k è indicato per tre tipi di prove nella Figura 18. La pressione di impatto è distribuita sopra una zona del fondo della nave nelle vicinanze immediate del punto di rientro ed è tipicamente il massimo sulla linea centrale in ogni istante di tempo. È stato trovato che le più alte pressioni accadono dove il fondo è quasi piatto. La forza totale allora è data dall'integrale di questa pressione sulla zona del fondo sulla quale agisce.

Poiché la prua della nave rientra in acqua, il punto di pressione massima tende a muoversi verso la prua. Ad una data stazione sulla lunghezza, la durata della pulsazione della pressione è tipicamente di pochi dieci millisecondi, ma come conseguenza del movimento della posizione di rientro, anche l'impulso di pressione si muove, mantenendo la sua intensità di picco. La durata totale della forza d'impulso che la nave avverte sarà, quindi, molte volte più grande della durata di impulso in un punto fisso. Questo comportamento di spazio-tempo della forza è illustrato nella Figura 19.

Carichi inerziali sui componenti

Le accelerazioni che derivano dai movimenti di una nave in una rotta producono forze (o reazioni inerziali) sui componenti locali della nave, così come sul personale, sul carico e sui liquidi nelle casse. Di conseguenza il calcolo dei valori di queste forze sono spesso necessari per il progetto delle strutture locali, delle fondazioni, delle legature, dei dispositivi di fissaggio, ecc. Per tali scopi i valori massimi valutati di tali forze possono usualmente essere considerati come carichi di progetto statici, a causa dei periodi relativamente lunghi delle ampiezze dei movimenti della nave.

Le vibrazioni dello scafo causate dalle macchine o dall'azione dell'elica possono in alcuni casi causare risposte in risonanza dei componenti strutturali.