

INTRODUZIONE ALLA ROBUSTEZZA DELLA NAVE

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*

NATURA DELLA STRUTTURA DELLA NAVE

La forma e le caratteristiche principali di una nuova nave sono determinati soprattutto dalla tipologia di servizio e dalle rotte di progetto. Oltre alle considerazioni funzionali di base ci sono requisiti quali quelli di stabilità, di bassa resistenza al moto ed alta efficienza propulsiva oltre che di limitazioni alla navigazione riguardo all'immersione o alla larghezza; tutti questi influenzano la scelta delle dimensioni e della forma. La struttura della nave deve essere progettata, entro questi ed altri vincoli progettuali, per sostenere tutti i carichi che si prevede possano essere incontrati durante la vita in navigazione. Di conseguenza, la struttura della nave possiede determinate caratteristiche peculiari che non hanno eguali in altre strutture costruite dall'uomo.

Fra le caratteristiche più importanti che contraddistinguono le strutture della nave vi sono le dimensioni, la complessità e la molteplicità delle funzioni dei componenti strutturali, della natura casuale o probabilistica dei carichi imposti e delle incertezze inerenti alla nostra capacità di predire la risposta della struttura a questi carichi.

Contrariamente alle strutture costruite a terra, la nave non riposa su fondazioni fisse ma ricava l'intero sostegno dalle pressioni di spinta generate da un ambiente fluido dinamico ed in continuo movimento.

I metodi d'analisi impiegati dall'Architetto Navale nella progettazione e nella valutazione delle strutture di una nave devono essere scelti tenendo presenti le suddette caratteristiche. Durante gli scorsi venti anni il progetto e l'analisi strutturale della nave hanno subito molti cambiamenti grazie a metodologie con basi più razionali oltre allo sviluppo di strumenti analitici basati sull'uso d'elaboratori elettronici. Questi hanno alleviato l'architetto navale di gran parte dello sforzo di calcolo sistematico precedentemente richiesto nell'analisi delle prestazioni strutturali della nave. Tuttavia, molte funzioni della struttura della nave non sono completamente riconducibili al puro approccio analitico e di conseguenza il progetto delle strutture continua a coinvolgere una miscela giudiziosa e fantasiosa di teoria e di esperienza. Un articolo specifico si occuperà dettagliatamente dei carichi che agiscono sullo scafo della nave, della tecnica per analizzare la risposta della relativa struttura a questi carichi oltre ai metodi usuali e di nuova concezione per definire i criteri di accettabilità del progetto strutturale. In altri articoli verranno affrontate sia una descrizione dettagliata delle strutture della nave che discussioni sulle funzioni pratiche della progettazione strutturale delle navi e su come siano influenzati dall'interazione tra esperienza ed analisi i regolamenti delle società di classificazione.

Per comprendere al meglio la natura del comportamento delle strutture della nave, di seguito saranno forniti ulteriori particolari su alcune delle loro caratteristiche distintive più importanti. In alcuni casi, sarà anche utile paragonare la nave e la relativa struttura ad altre strutture e sistemi costruiti dall'uomo.

DIMENSIONI E COMPLESSITÀ DELLE NAVI

Le navi sono le più grandi strutture mobili costruite dall'uomo e sia il loro formato che i requisiti di mobilità esercitano forti influenze sulle sistemazioni strutturali e sul progetto. Oggi ci sono grandi petroliere in funzione che hanno dislocamenti a pieno carico superiori alle 600.000 t e dimensioni di 400 m di lunghezza, 63 m di larghezza, 35.9 m di altezza, con una immersione a pieno carico di 28.5 m. Queste sono tra le strutture più complesse e la complessità risiede in parte nella loro mobilità. Buona resistenza e caratteristiche propulsive implicano che la superficie esterna dello scafo, o fasciame, debba essere una superficie curva tridimensionale complessa e, poiché la struttura del fasciame è uno degli elementi principali di resistenza, la configurazione strutturale non può essere scelta sempre solamente in base alle prestazioni strutturali ottimali. Inoltre è difficile da analizzare il comportamento strutturale dei vari elementi geometricamente complessi che costituiscono lo scafo della nave e la costruzione dello scafo può essere complicato perché ci sono pochi elementi con forma semplice o ripetitiva.

FUNZIONE MULTIUSO DEI COMPONENTI STRUTTURALI DELLA NAVE

Contrariamente a molte strutture terrestri, i componenti strutturali di una nave sono destinati frequentemente ad effettuare una molteplicità di funzioni oltre che a quella di partecipare all'integrità strutturale della nave. Le lamiere del fasciame, per esempio, servono non soltanto come elemento principale di resistenza, ma anche come involucro stagno della nave, dovendo avere una forma tale che fornisca la stabilità sufficiente contro il rovesciamento, bassa resistenza al movimento di avanzamento, manovrabilità accettabile e buone caratteristiche propulsive.

Internamente, molti elementi strutturali hanno doppia funzione. Per esempio, le paratie che contribuiscono sostanzialmente alla resistenza del guscio possono anche servire da confini stagni dei compartimenti interni. La loro posizione è dettata dai volumi richiesti per le casse di deposito o dai requisiti di compartimentazione. La configurazione delle strutture dei ponti è governata solitamente dalla disposizione degli spazi interni, ma può essere loro richiesto di resistere a carichi distribuiti e concentrati, così come di contribuire alla robustezza longitudinale e trasversale.

Considerando che in molti casi la sola efficienza strutturale potrebbe richiedere travi, colonne, o tralicci, funzioni alternative richiederanno normalmente elementi a lastra o membrana, strutturati con un sistema di rinforzi, così da fornire resistenza a componenti di carico multipli, alcuni nel piano della lastra ed altri normali ad essa. Una caratteristica importante della struttura della nave è la sua composizione con numerosi pannelli a lastra nervata, alcuni piani ed altri curvi, che compongono i fianchi ed il fondo dello scafo, i ponti e le paratie. Gran parte dello sforzo impiegato nell'analisi strutturale della nave è, quindi, focalizzato nella predizione delle prestazioni dei pannelli nervati isolati e delle loro interazioni con i pannelli contigui.

VARIABILITÀ DEI CARICHI STRUTTURALI DELLA NAVE

I carichi che la struttura della nave è destinata a sostenere hanno molte origini. Ci sono componenti statiche, costituite principalmente dal peso e dalla spinta della nave in acqua tranquilla. Ci sono componenti dinamiche originate dal moto ondoso nel quale la nave si trova durante la navigazione e dai movimenti risultanti della nave stessa. Altri carichi dinamici, solitamente di frequenza più alta del semplice carico d'onda, sono causati dagli sbattimenti e dagli urti dello scafo sulle onde, dalle eliche e dai macchinari di propulsione. Questi a volte causano la vibrazione di alcune zone o di tutta la nave. Infine, ci possono essere carichi che provengono sia da una funzione speciale assolta durante il servizio al quale è destinata la nave come rompere il ghiaccio, sia per la particolare tipologia di carico trasportato come ad esempio nel caso dei carichi termici indotti dai carichi riscaldati o refrigerati.

Una caratteristica importante di tutte queste componenti del carico è la loro variabilità temporale. Anche il peso statico e la spinta variano da viaggio a viaggio ed anche all'interno di un viaggio, dipendono dalla quantità, dalla distribuzione del carico e dei materiali di consumo trasportati. Per progettare la struttura della nave per una durata utile di venti anni o più, questa dipendenza temporale del carico deve essere attentamente considerata.

I carichi imposti dal mare, come il mare in se stesso, hanno natura casuale e possono quindi essere espressi soltanto in termini probabilistici. Di conseguenza è generalmente impossibile determinare con la certezza assoluta un singolo valore per il carico massimo che la struttura della nave sarà obbligata a sostenere. E' necessario invece utilizzare una rappresentazione probabilistica, dove è descritta una serie di carichi d'intensità crescente, ciascuno con una probabilità corrispondente alla frequenza prevista durante la vita della nave. Quando sono utilizzati metodi di progettazione convenzionali, un carico di progetto può allora essere scelto come quello che ha probabilità d'accadimento bassa ed accettabile. Nei metodi più rigorosi d'affidabilità possono essere utilizzati direttamente i dati del carico nella loro rappresentazione probabilistica.

NATURA PROBABILISTICA DEL COMPORTAMENTO STRUTTURALE

Come conseguenza della complessità della struttura e delle limitazioni delle nostre possibilità d'analisi, è raramente possibile raggiungere la certezza assoluta nella predizione della risposta della struttura anche se la complessità dei carichi fosse perfettamente conosciuta. Come nel caso delle incertezze presenti nelle previsioni di carico strutturale, è necessario per il progettista prendere in considerazione il limite e le conseguenze probabili delle incertezze nella previsione della risposta strutturale quando esprime un giudizio riguardo all'accettabilità generale della struttura. Uno degli scopi più importanti che affronta l'ingegnere è di scegliere l'equilibrio adeguato fra il livello accettabile d'incertezza nelle sue previsioni di risposta strutturali ed il tempo e lo sforzo che devono essere impiegati per raggiungere un elevato livello di accuratezza. L'esistenza di quest'incertezza, allora, è riconosciuta e deve essere tenuta in considerazione nel progetto.

Nella previsione delle prestazioni strutturali della nave ci sono almeno tre fonti d'incertezza.

• *In primo luogo, l'analisi strutturale del progettista è effettuata solitamente su un'idealizzazione della struttura reale. Per esempio, la teoria della trave può essere usata per predire la distribuzione delle tensioni in parte o in tutta la trave nave, anche se è noto che la geometria della nave non può seguire esattamente i presupposti della teoria della trave.*

• *In secondo luogo, le proprietà reali dei materiali di costruzione non possono essere esattamente le stesse di quelle assunte dal progettista. Le lamiere d'acciaio e le sezioni, come trasportate dal laminatoio, non combaciano con precisione con le dimensioni nominali assunte nel progetto. Allo stesso modo le proprietà chimiche e fisiche dei materiali possono variare entro determinati limiti di tolleranza. Le regole delle società di classificazione specificano sia i limiti fisici che chimici per varie categorie di materiali dedicati alla costruzione navale, sia sotto forma di requisiti minimi che in un intervallo di valori accettabili. I materiali attualmente utilizzati nella costruzione di una nave dovrebbero avere proprietà che si trovino entro questi specifici limiti, ma i valori esatti dipendono dal controllo di qualità nel processo di costruzione e non sono conosciuti in anticipo dal progettista. Inoltre, ci sarà inevitabilmente un certo degrado delle proprietà fisiche dei materiali causate dalla corrosione, per esempio, nel corso della vita della nave.*

• *In terzo luogo, l'integrità della costruzione della nave contiene elementi significativi d'abilità delle maestranze e quindi di buona costruzione. Il progettista, nell'effettuazione dell'analisi strutturale, può assumere come perfetto l'allineamento e l'assemblaggio degli elementi portanti oltre che le saldature perfettamente eseguite. Questo approccio ideale può essere adottato mediante l'uso di un sistema di costruzione che coinvolga personale altamente esperto oltre che alti livelli di ispezione e di controllo di qualità. Un giunto saldato assolutamente perfetto o una lastra piegata esattamente come la figura progettata e fabbricata senza disallineamenti e distorsioni indotte dalle saldature, è un obiettivo che si cerca d'ottenere, ma in pratica non viene mai raggiunto.*

Risulta evidente che le incertezze indotte nella determinazione sia dei carichi che della risposta strutturale a questi carichi rendono difficile stabilire i criteri di accettabilità per le strutture della nave. In passato i livelli delle tensioni ammissibili o i fattori di sicurezza usati dai progettisti hanno fornito i mezzi, basati su passate esperienze con strutture similari, di ammettere queste incertezze. Negli ultimi anni, sono stati applicati i principi d'affidabilità, usando la teoria delle probabilità e della statistica, per ottenere una base più razionale per i criteri di progettazione. Nell'approccio affidabilistico al progetto, i dati della risposta strutturale, come pure i dati del carico, possono essere espressi ed utilizzati in forma probabilistica.

TIPI DI CEDIMENTO STRUTTURALE DELLA NAVE

Evitare cedimenti strutturali è un obiettivo prioritario e fondamentale di tutti progettisti strutturali; per realizzare questo obiettivo è necessario per l'architetto navale conoscere sia i vari tipi di collasso possibili che i metodi di previsione del loro accadimento. I tipi di cedimento che possono accadere nelle strutture della nave sono generalmente quelli caratteristici delle strutture composte da pannelli irrigiditi da rinforzi ed assemblati tramite saldatura per formare strutture monolitiche molto ridondanti, cioè, con molti percorsi alternativi per le linee degli sforzi.

Deve essere evidenziato che il cedimento strutturale può accadere con differenti gradi di severità.

Al limite inferiore della scala dei cedimenti, ci possono essere piccole lesioni o deformazioni negli elementi strutturali secondari che non compromettono la capacità di base della struttura nell'assolvere le funzioni per le quali è preposta. Tali cedimenti secondari possono avere soltanto conseguenze estetiche.

All'altro limite della scala si trova il collasso totale della struttura con la conseguente perdita della nave.

Fra questi estremi vi sono vari modi di cedimento che possono ridurre la capacità portante del carico di elementi isolati o di parti complesse della struttura ma, come conseguenza della natura altamente ridondante della struttura della nave, non conducono al collasso totale. Tali cedimenti sono normalmente rilevati e riparati prima che il loro numero e la loro estensione crescano al punto di mettere la nave in pericolo.

Quattro sono i meccanismi principali riconosciuti come causa della maggior parte dei casi di cedimento strutturale della nave, a parte la collisione o l'arenamento. Questi tipi di cedimento sono i seguenti:

- *eccessiva tensione di trazione o compressione;*
- *deformazione dovuta ad instabilità a compressione o taglio;*
- *frattura per fatica;*
- *rottura per fragilità.*

I primi tre tipi di collasso saranno discussi più dettagliatamente negli appositi capitoli. L'ultimo di loro, la rottura per fragilità, è stato riconosciuto che svolge un ruolo importante nelle rotture di molte navi da carico costruite in condizioni di emergenza durante la seconda guerra mondiale. Le cause di queste rotture sono state ricondotte ad una combinazione di fattori connessi con le tecniche relativamente nuove di costruzione saldata impiegata nella costruzione delle navi. La soluzione al problema è stata ottenuta con lo sviluppo dei particolari progettuali che hanno evitato l'insorgere di intagli ed altre concentrazioni di tensioni, insieme alla selezione degli acciai con un alto grado di resistenza all'inesco ed alla propagazione delle cricche, specialmente alle basse temperature. Queste risorse chiamate "ferma-cricca" sono state assimilate col tempo per rendere il progetto sicuro al collasso limitando la propagazione di tutte le cricche che potrebbero realmente accadere.

FILOSOFIA E PROCEDURA DEL PROGETTO

In parecchie discipline si sta perseguendo lo sviluppo di procedure di progettazione strutturale completamente razionali, comprese l'ingegneria civile, aeronautica e meccanica, così come in architettura navale. Seguendo tali procedure dovrebbe essere possibile in primo luogo formulare un insieme di requisiti o criteri che devono essere soddisfatti dalla struttura, quindi, con l'applicazione di ragionamenti basilari e d'analisi matematiche, aumentate tramite l'introduzione di determinate informazioni empiriche, arrivare ad una configurazione strutturale e ad un insieme di elementi strutturali che soddisfino simultaneamente tutti questi criteri. Anche se questo approccio ideale non è stato ancora raggiunto, si sta compiendo un progresso costante in questa direzione.

L'insieme basilare dei requisiti imposti alla nave includerà i requisiti funzionali definiti dall'armatore ed, in più, i requisiti istituzionali come quelli stabiliti dagli enti governativi ed altri organi competenti interessati alla sicurezza della vita in

mare, alla navigazione, alla prevenzione dell'inquinamento, alla misura del tonnellaggio ed ai requisiti sindacali. Quindi, nella progettazione degli elementi principali della struttura della nave, può essere assunto che le dimensioni principali della nave e la suddivisione dei suoi volumi interni tramite le paratie, i ponti ed i perimetri delle casse siano stati già determinati per soddisfare questi vari requisiti. Il problema del progetto strutturale allora consiste nella selezione dei tipi di materiale, dell'intervallo di ossatura, della tipologia e della forma dei rinforzi e dello spessore dei fasciami che, una volta uniti in questa configurazione geometrica, permetteranno alla nave di effettuare efficientemente la sua funzione per il relativo corso della vita operativa prevista.

A questo punto, nella selezione dei criteri che devono essere soddisfatti dai componenti strutturali della nave, il progettista deve contare sia sui criteri empirici, compresi i fattori di sicurezza e/o gli sforzi ammissibili, che sull'uso dei principi di affidabilità. Il termine "sintesi", definito come unione di parti o di elementi in modo da formare un insieme, è applicata spesso al processo del progetto strutturale della nave.

Un elemento addizionale, tuttavia, è necessario per completare questa sintesi progettuale: l'individuazione della combinazione ottimale dei vari elementi. A causa della complessità delle strutture della nave, così come la natura probabilistica delle informazioni disponibili necessarie per determinate ipotesi vitali al processo di progetto, è solitamente impossibile raggiungere una soluzione ottimale in un'unica serie di calcoli. Deve essere impiegata, invece, una specie di procedura iterativa. Il metodo tradizionale del progetto strutturale della nave, coinvolgente l'estrapolazione d'esperienze precedenti, può persino essere pensato come un processo iterativo in cui la costruzione e l'esperienza operativa delle navi precedenti formano i punti essenziali. In ogni nuovo disegno l'architetto navale prende in considerazione queste esperienze precedenti e modifica il nuovo progetto intuitivamente in modo da realizzare una configurazione migliorata. Il progettista ottimale è colui che congloba, comprensione e memoria, con abilità nei metodi manuali e nelle analisi strutturali, riuscendo in un costante miglioramento nelle navi successive rispetto alle progettazioni precedenti.

Molti progetti strutturali, anche quando sono usati i metodi più avanzati, consistono in un processo graduale dove il progettista sviluppa una configurazione strutturale in base all'esperienza, all'intuizione ed all'immaginazione, poi effettua un'analisi di quella struttura per valutare le relative prestazioni. Se necessario, i rinforzi devono essere modificati fino a soddisfare i criteri di progetto. La configurazione risultante è allora modificata in modo tale da ritenere che possa condurre ad un miglioramento nelle prestazioni e nel costo; l'analisi allora è ripetuta per assicurare che la configurazione migliorata soddisfi effettivamente i criteri di progetto. Così elemento chiave nel progetto strutturale è il processo di analisi della risposta di un'ipotetica struttura. Il processo di ricerca tramite sintesi di una configurazione strutturale che abbia le prestazioni volute è l'inverso dell'analisi ma non è così immediato il suo svolgimento, particolarmente nel caso di strutture complesse. Di conseguenza, è soltanto dopo il completamento di parecchi e soddisfacenti sintesi progettuali che il processo di ottimizzazione può prendere forma.

Ricapitolando, possono essere identificati quattro punti chiave per caratterizzare il processo del progetto strutturale, sia che questo sia intuitivo o matematicamente rigoroso:

- *sviluppo della configurazione iniziale e dei rinforzi;*
- *analisi delle prestazioni del progetto ipotizzato;*
- *confronto con i criteri prestazionali;*
- *riprogettazione della struttura eventualmente cambiando sia la configurazione che i rinforzi in modo da effettuare un miglioramento;*
- *ripetere i passi precedenti tanto quanto sia necessario per avvicinarsi all'"optimum".*

Formalmente, il punto finale d'ottimizzazione consiste della ricerca del miglior valore raggiungibile (solitamente minimo) di certe quantità quali peso strutturale, costo della costruzione, tutte le spese richieste per l'esercizio della nave nel suo servizio di progetto meglio noto come "costo previsto totale" della struttura. L'ultima di queste quantità, consiste nella somma del costo iniziale della nave (o altra struttura navale), del costo totale anticipato di ricostruzione a seguito del completo collasso strutturale moltiplicato per la relativa probabilità d'accadimento e di una sommatoria dei costi durante la vita di servizio per la riparazione dei danni secondari strutturali.

La ricerca è effettuata in presenza di vincoli che, nella loro forma più elementare, consistono nel requisito che ogni elemento della struttura non collassi sotto i carichi previsti. Una tale procedura d'ottimizzazione costituisce la base per un buon progetto economico, sia che venga effettuato automaticamente, usando uno schema canonico di ottimizzazione matematica, che manualmente (con o senza assistenza di codici di calcolo per alcune parti del processo).