

2

La manovrabilità della nave

Per comprendere appieno il funzionamento dei sistemi di manovra, ed in particolare del timone passivo, risulta necessario approfondire la conoscenza delle modalità con cui essi interagiscono con la carena nel determinare l'effetto evolutivo, e per fare ciò è conveniente volgere l'attenzione alla disciplina che tratta le caratteristiche di manovrabilità della nave.

In quanto segue si partirà dalla definizione delle forze che maturano durante la manovra sul timone e sulla nave, per giungere poi allo studio di interazione dei due sistemi, ponendo le basi per la comprensione dei meccanismi che concorrono a determinare l'efficacia del timone sulle qualità evolutive della nave e l'attitudine della nave stessa ad essere governata dal timone. In ogni caso, che si tratti di timoni semplici o di timoni-propulsori, il sistema di interazione mantiene molte caratteristiche in comune e l'efficacia del sistema di governo viene misurata con gli stessi parametri e le stesse modalità di prova.

Il timone verticale

Quando la nave si trova in moto rettilineo, con il timone dritto, il complesso delle forze trasversali che agiscono sulla carena ha risultante nulla, sia di deriva che d'imbardata, a meno di azioni indotte da correnti marine, da colpi di mare o dal vento. In queste condizioni ideali la simmetria delle pressioni esercitate sullo scafo viene alterata solo per effetto della rotazione del timone di un certo angolo rispetto alla posizione dritta, detto *angolo di barra*. In tal caso infatti il flusso dell'acqua genera sulla pala una pressione che ha una risultante prevalentemente trasversale: questa forza è la causa dell'accostata della nave.

La forza orizzontale generata ha una componente utile F_T [N] nella direzione normale al piano diametrale della nave – orientata dalla parte opposta del timone rispetto alla mezzera nave – ed una componente longitudinale parassita detta componente ritardatrice R_T [N] poiché ha verso

contrario rispetto alla spinta dell'elica propulsatrice e costituisce una resistenza aggiunta di carena. Il momento verticale generato dalla forza del timone rispetto al centro di massa della nave costituisce il *momento evolutivo* M_E [Nm], il cui insorgere determina l'abbandono della rotta rettilinea, ovvero l'accostata della nave.

Nella pratica il momento evolutivo viene convenzionalmente calcolato sulla sola componente trasversale F_T come prodotto della forza stessa per il braccio rappresentato dalla distanza longitudinale tra l'asse di rotazione della pala ed il baricentro della nave. In tal modo si ammette la piccola approssimazione derivante dal trascurare sia l'effettiva posizione del centro di pressione (definito come centro della risultante delle pressioni idrodinamiche agenti sul timone), molto vicino all'asse di rotazione, sia la componente longitudinale della forza generata dal timone, che lavora in realtà con un piccolo braccio. Ciò giustifica l'asserzione che la componente trasversale è quella attiva per l'evoluzione della nave, essendo la principale artefice del momento evolutivo

Appare subito evidente l'effetto cinematico prodotto dall'azione del timone nella fase iniziale di un'accostata. Infatti, considerando il sistema equivalente di forze formato dalle F_T ed R_T baricentriche e dal momento M_E , sia ha che:

- il momento evolutivo M_E genera una rotazione attorno all'asse verticale baricentrico;
- la forza trasversale F_T produce uno spostamento trasversale della nave;
- la forza longitudinale R_T causa infine una riduzione della velocità della nave.

Lo sviluppo delle conoscenze relative all'azione delle forze indotte su superfici immerse in un flusso fluido ha permesso di migliorare la forma delle stesse, così da ottenere il migliore rendimento per le diverse condizioni di lavoro. Nel corso degli anni la superficie della pala del timone ha sperimentato, entro una serie di vincoli progettuali, un'evoluzione continua che l'ha portata dalla semplice lastra piana all'odierna superficie idrodinamica, ossia una superficie sagomata a semplice o doppia curvatura, ottimizzata per flussi non omogenei, formata eventualmente da più parti dotate di movimento reciproco.

La forza idrodinamica che si ottiene per ogni angolo di barra del timone può essere studiata con riferimento alla teoria dei corpi a profilo alare aventi allungamento finito ed investiti da un flusso non omogeneo in condizioni di interazione con altri corpi – ovvero la carena e l'elica – e con la superficie marina.

Trattandosi di una superficie ottimizzata per la generazione di una forza trasversale verso entrambi i lati della nave, tale superficie viene carenata a

forma di *profilo alare simmetrico*. È pur vero che si utilizzano anche profili asimmetrici, ma solo in soluzioni particolari, per esempio per effettuare un accoppiamento migliore con il flusso non omogeneo dell'elica, oppure nei timoni accoppiati (posizionati simmetricamente rispetto al piano diametrale) con lo scopo di utilizzare le pale come deviatrici di flusso, coordinandone opportunamente i movimenti.

Per quanto riguarda l'analisi dell'efficacia del timone nelle manovre della nave, si darà ora per scontata la presenza di un certo momento evolutivo, lasciando ad un secondo momento lo studio delle modalità con cui esso matura per effetto della forma della pala.

La manovrabilità della nave

Tutte le navi dovrebbero possedere delle qualità di manovrabilità tali da consentire loro di effettuare in maniera soddisfacente – ossia in sicurezza riguardo alle condizioni operative – una serie di procedure di controllo della rotta. Si tratta di manovre che consistono essenzialmente nel mantenimento di una rotta rettilinea e nell'impostazione e controllo di una accostata, sia ad alte che a basse velocità. A queste prerogative di manovrabilità si aggiunge inoltre la capacità di estinguere il moto di avanzo per bloccare il movimento della nave in situazioni di emergenza.

Storicamente la pratica di progetto nell'industria marina è stata quella di non prendere in considerazione il problema della manovrabilità della nave, demandando alle risorse dei piloti la risoluzione di problemi legati a scarse qualità manovriere della nave. Per anni infatti gli Enti di classifica si sono limitati a richiedere, riguardo alla manovrabilità, una sufficiente visibilità dal ponte di comando, e soprattutto una serie di caratteristiche minime relative al timone ed al suo macchinario, ossia rispettivamente un'area minima di pala ed una potenza tale da garantire una sufficiente velocità di rotazione dell'asta del timone alla massima velocità della nave.

Questo è successo a causa della difficoltà di definire le qualità manovriere di una nave e quindi di misurarle, quantificando l'attitudine della nave alla manovra, in altre parole di dare una valutazione quantitativa della manovrabilità.

A partire dagli anni '60 le Società di classificazione hanno incominciato a definire criteri per saggiare queste qualità, sotto l'impulso dei rischi connessi alla navigazione delle grandi navi cisterna. Negli anni a seguire sono stati messi in luce una serie di parametri di risposta della nave durante le manovre, tali da essere significativamente rappresentativi della qualità manovriera della nave.

Questi parametri di risposta sono costituiti da tempi di risposta e da spazi di manovra, quantità che si possono misurare direttamente durante specifiche prove al vero condotte in condizioni standard. La normativa prodotta dall'IMO definisce nei particolari le tipologie di prove da condurre al vero per saggiare la manovrabilità di una nave, e le modalità di raccolta dei dati.

L'esperienza maturata negli ultimi anni – sia con prove al vero, sia con procedimenti matematici di previsione delle attitudini manovriere della nave – permette ora di valutare le qualità marine della nave già in fase di progetto. La maturità raggiunta in quest'ambito ha legittimato gli Enti preposti alla vigilanza sulla sicurezza della navigazione ad emanare un regolamento che riporta gli standard minimi di manovrabilità, ossia i valori limite dei succitati parametri significativi.

In conclusione, in quanto segue, nel trattare della manovrabilità della nave sarà necessario definire innanzitutto i parametri che la caratterizzano e successivamente le prove al vero che servono per ottenerli, ed infine sarà utile dare uno sguardo alla normativa che regola sia l'esecuzione delle prove, sia i valori limite che la nave deve soddisfare.

La manovra di accostata e la stabilità dinamica

Quando una nave si trova su una rotta in moto uniforme, la manovra ha inizio con la modifica del moto di avanzo per mezzo dei sistemi di controllo del movimento (siano essi timoni o propulsori azimutali): lo studio di come risponde la nave all'azione idrodinamica da essi generata costituisce lo strumento per la comprensione delle caratteristiche manovriere della stessa.

La modalità di risposta della nave si saggia sia con la *prontezza di risposta*, che rappresenta il tempo necessario per portare a termine una manovra di variazione del moto della nave, e che è strettamente correlata (tramite la velocità di avanzo) al tragitto percorso ed allo spazio impegnato per eseguire la manovra, sia con la *precisione di risposta*, che garantisce l'univocità di corrispondenza fra l'intervento del pilota (ossia l'azione idrodinamica che nasce sul sistema di controllo) ed il moto della nave. Quest'ultima caratteristica assume una notevole importanza perché, se la nave non risponde con precisione all'azione del timone e la manovra diventa incerta, allora diventa di secondaria importanza sapere quanto tempo impiega e di quanto spazio ha bisogno la nave per manovrare.

La precisione di risposta è correlata al concetto di *stabilità dinamica*, e si dice in particolare che una nave è dinamicamente stabile su una rotta percorsa con moto uniforme quando la nave è mantenuta sulla sua traiettoria, rettilinea o circolare, con il timone fermo ad un certo angolo di barra, e

quando inoltre la corrispondenza fra il raggio di curvatura della rotta R [m] e l'angolo di barra del timone α [°] è biunivoca.

In altre parole, se per mantenere una rotta rettilinea (in assenza di cause perturbative esterne – ossia in condizioni ideali) è necessario variare continuamente l'angolo di barra del timone, la nave è dinamicamente instabile, se viceversa è sufficiente mantenere il timone in posizione neutra (nella quale non sviluppa alcuna forza utile alla manovra), allora la nave si dice dinamicamente stabile ed all'angolo di barra neutro si associa un raggio di curvatura infinito. Analogo discorso vale per una traiettoria circolare percorsa a velocità costante, in questo caso la corrispondenza biunivoca sarà fra il particolare raggio della traiettoria e l'angolo di barra impostato.

Riguardo alla posizione neutra del timone, va detto che essa non corrisponde sempre alla posizione “alla via”, infatti se il timone si trova nella scia di un'elica propulsatrice assume posizione neutra non al centro ma in prossimità di esso: nel caso di una nave monoelica con un'elica destrogira, l'angolo neutro è tipicamente dell'ordine di un grado a dritta.

Una piccola instabilità è generalmente accettata, perché le manovre del timone necessarie per arginarla si confondono con quelle effettuate per compensare i disturbi esterni causati dalle onde, mentre una elevata instabilità deve essere corretta, ed il metodo più semplice per farlo, come vedremo, è quello di cambiare la forma della poppa della nave aumentandone l'area di deriva.

I dati relativi alla stabilità della nave, raccolti con opportune prove al vero che verranno di seguito illustrate, consistono in coppie ordinate di valori che rappresentano il raggio di evoluzione della nave che procede a velocità costante e l'angolo di barra del timone che, se mantenuto costantemente durante la manovra, consente di ottenere quel determinato valore del raggio di evoluzione.

I dati vengono raccolti in un diagramma che prende il nome di “diagramma del moto circolare uniforme” (il diagramma si indica anche più propriamente come *steering diagram*): in ascissa sono riportati gli angoli di barra e in ordinata i corrispondenti raggi di evoluzione (in genere adimensionalizzati sulla lunghezza nave tra le perpendicolari L [m]). In esso la curva presenta due bracci, uno relativo ad angoli di barra positivi (dritta – starboard side) ed uno relativo ad angoli di barra negativi (sinistra – port side), mostrando due possibili andamenti:

- nel caso di stabilità dinamica le curve hanno asintoto comune in corrispondenza dell'angolo neutro del timone,
- nel caso di instabilità dinamica le curve si estendono oltre l'angolo neutro e mostrano due picchi di estremità, dopodiché manifestano repentinamente il cambio di verso della velocità di imbardata,

definendo una zona di sovrapposizione che rende conto dell'instabilità, dove ad ogni fissato angolo di barra non corrisponde più un solo valore del raggio di evoluzione.

Il diagramma, che permette innanzitutto di appurare la stabilità dinamica di rotta della nave, fornisce anche un indice delle attitudini di manovrabilità della nave ed implicitamente dell'efficacia del timone, infatti un basso valore dell'ordinata indica che è sufficiente impostare un basso angolo di barra per ottenere una manovra di evoluzione in uno spazio ristretto. La curva viene tracciata fino all'angolo di barra massimo che usualmente è di 35° : la diminuzione della pendenza della curva in corrispondenza di tale valore ne giustifica la scelta come valore massimo, infatti su navi di forme tradizionali manovrate da timoni convenzionali, angoli di barra maggiori non comportano significative riduzioni del raggio di evoluzione.

In questo grafico è usuale riportare anche la curva che rappresenta i valori della velocità di rotazione della nave ψ [rad/s], velocità angolare di corpo rigido indicata spesso con il termine di *velocità di imbardata*. Infatti, durante la manovra a velocità costante, il raggio di evoluzione R (misurato al centro di massa della nave) è legato alla velocità di imbardata ψ ed alla velocità di avanzo V [m/s] dalla nota relazione $V = \psi R$.

L'intercetta della curva sull'asse delle ascisse indica l'angolo di barra neutro e la stabilità dinamica di rotta si manifesta nei termini di una funzione monotona crescente del tipo $\psi = f(\alpha)$, mentre l'instabilità è evidenziata da una curva a forma di "S", non più quindi una funzione dell'angolo di barra. Quest'ultimo andamento mette in rilievo che per piccoli angoli di barra attorno a quello neutro – e quindi implicitamente anche per quello neutro – le posizioni di equilibrio dinamico instabile raggiungibili dalla nave sono tre, e precisamente:

- quella raggiunta partendo da una traiettoria avente raggio di curvatura maggiore nello stesso verso dell'angolo di barra del timone,
- quella raggiunta partendo da una traiettoria avente raggio di curvatura maggiore ma in verso opposto all'angolo di barra del timone,
- quella raggiunta partendo da una traiettoria avente raggio di curvatura minore, ad esempio entrando nella manovra da una rotta rettilinea (ottenendo una risposta dalla parte opposta di quella attesa).

Il comportamento instabile nella risposta della nave al timone si può spiegare analizzando le forze che si manifestano durante un'evoluzione su rotta circolare uniforme.

Innanzitutto va ricordato che le forze che agiscono sulla nave che percorre una traiettoria rettilinea con velocità costante sono, in condizioni ideali (assenza di cause perturbatrici e quindi anche di vento), la spinta S e la

resistenza idrodinamica W , uguali ed opposte. In condizioni di stazionarietà del moto le forze che agiscono sulla nave sono:

- la spinta dell'elica S (longitudinale);
- la forza generata a poppa dal timone, nelle sue componenti trasversale "attiva" F_T e longitudinale R_T (forza di resistenza aggiunta), applicata nel centro di pressione della pala;
- la forza centrifuga F_C agente sulla direzione tra il centro di rotazione e il baricentro della nave – come tutte le forze di massa è proporzionale alla massa nave comprensiva della massa aggiunta;
- la reazione idrodinamica W che rappresenta la risultante delle forze idrodinamiche che nascono sulla carena durante il moto su traiettoria circolare, avente una componente longitudinale ed una trasversale; essa è applicata in un punto che può trovarsi a proravia o a poppavia del centro di massa della nave (sostituisce la resistenza all'avanzo su rotta rettilinea).

Quest'ultima forza merita qualche considerazione e per fare ciò è necessario analizzare come si dispone la nave durante un'accostata. Si osservi ancora che in condizioni di non stazionarietà del moto nascono inoltre altre forze d'inerzia sul piano orizzontale: una forza d'inerzia longitudinale, una trasversale ed un momento d'inerzia.

A prescindere da eventuali movimenti di sbandamento, la nave su una rotta non rettilinea mantiene sempre la prora all'interno della traiettoria, ossia dalla parte del centro di rotazione, e ciò è dovuto al fatto che l'azione trasversale del timone si manifesta a poppa. L'angolo formato tra la linea di fede della nave e la tangente alla traiettoria descritta dal baricentro è definito *angolo di deriva* ed indicato con β [°]; un angolo di deriva elevato favorisce la rotazione del corpo nave riducendo il raggio di evoluzione.

Un angolo di deriva si manifesta anche in corrispondenza del timone – indicato con β_R [°] –, osservando infatti la traiettoria descritta dal centro del timone (ossia dalla traccia dell'asse di rotazione dello stesso) si vede che il flusso lambisce la pala lungo la direzione della tangente a detta traiettoria. La conseguenza diretta è la variazione dell'angolo di attacco sulla pala rispetto al moto su rotta rettilinea, perciò durante l'accostata l'angolo di attacco effettivo a α_E [°] è pari all'angolo di attacco geometrico α ridotto dell'angolo di deriva al timone β_R . Tale riduzione viene in piccola parte compensata dall'effetto di raddrizzamento del flusso dovuto all'azione dello scafo e dell'elica, effetto espresso in proporzione all'angolo di deriva come $(1-\kappa)\beta_R$ con $0 \leq \kappa \leq 1$, in modo che l'angolo effettivo risulti pari ad $\alpha - \kappa\beta_R$.

A questo punto possiamo tornare a considerare la forza idrodinamica. Nel caso di moto circolare uniforme, con una certa approssimazione, le forze

idrodinamiche possono essere valutate facendo riferimento al moto ottenuto dalla sovrapposizione di due movimenti:

- un avanzo con deriva, che nasce dall'azione delle forze S e F_T , e per effetto del quale si manifesta una velocità tale da dare una distribuzione di pressioni che porta alla formazione di una reazione idrodinamica orizzontale W_{A+D} [N], che in genere è applicata a proravia del centro di massa ed ha braccio b_W [m] rispetto allo stesso, con componente trasversale – orientata dalla parte opposta rispetto alla deriva (e quindi verso l'interno della traiettoria complessiva) – e componente longitudinale;
- una rotazione attorno all'asse verticale baricentrico, che trae origine dal momento evolutivo M_E , e che comporta la nascita di un momento verticale opposto di reazione idrodinamica $M_{W,Y}$ [Nm].

L'equilibrio alla rotazione, calcolato rispetto al baricentro, mostra – sempre nel moto uniforme, ossia in assenza di effetti inerziali – che il momento complessivo generato dalla forza idrodinamica compensa quello evolutivo. Usualmente, in virtù delle forme di carena, tale equilibrio dinamico viene raggiunto sotto l'azione di:

- un momento verticale evolutivo M_E equiverso rispetto all'angolo di rotazione della nave, esercitato dal timone sotto un angolo di attacco effettivo ridotto rispetto a quello geometrico (con $\alpha - \kappa \beta_R > 0$ e quindi una forza utile verso l'esterno della traiettoria);
- un momento verticale idrodinamico complessivo M_W avente verso opposto rispetto a quello evolutivo ed ottenuto come differenza fra $M_{W,Y}$ e $W_{A+D} b_W$ (ovviamente con $W_{A+D} b_W < M_{W,Y}$).

È evidente quindi che, se il timone viene mosso e portato dall'altra parte rispetto al piano diametrale della nave, o meglio rispetto alla posizione neutra, (ossia l'angolo di barra viene cambiato di segno), si avrà una variazione nel verso del momento evolutivo ed inizialmente il momento evolutivo M_E e quello idrodinamico M_W si troveranno ad essere equiversi. Ciò significa che il momento idrodinamico favorirà il raddrizzamento della rotta e l'evoluzione dalla parte opposta: se la nave reagisce in questo modo è dinamicamente stabile poiché una variazione di segno dell'angolo di barra del timone comporta una variazione di segno dell'angolo di rotta.

Ma la situazione appena illustrata non si verifica sempre, infatti può succedere che l'equilibrio dinamico dei momenti verticali si realizzi con i due momenti spiranti ciascuno in verso opposto a quanto sopra descritto, ma con le stesse condizioni cinematiche. Ciò può essere causato dalla concomitanza di due fatti: da una parte la presenza di un angolo di deriva tanto elevato da comportare un angolo di attacco effettivo di segno opposto rispetto a quello geometrico ($\alpha - \kappa \beta_R < 0$), e quindi una forza utile diretta verso l'interno della traiettoria, e dall'altra parte una carena di forme tali da

comportare una forte reazione all'avanzo con deriva, tale da dare un momento superiore a quello dovuto alla reazione idrodinamica alla rotazione ($W_{A+D} b_W > M_{W,Y}$), ciò può verificarsi preferibilmente su navi tozze in traiettorie larghe, ossia con elevato raggio di curvatura.

Questa situazione, pur di equilibrio dinamico durante il moto circolare uniforme, non è detto che favorisca l'evoluzione dalla parte opposta, in quanto se il timone viene portato dall'altra parte rispetto al piano diametrale della nave, il momento evolutivo non cambia di segno e inoltre si trova a lavorare inizialmente in opposizione a quello idrodinamico, il quale quindi ostacolerà la manovra. Successivamente, l'equilibrio tra momento evolutivo e idrodinamico potrà essere raggiunto con un aumento dell'intensità dei due momenti, senza che intervenga una variazione di segno. Ciò significa che la nave potrebbe portarsi su una nuova traiettoria curva dalla stessa parte, raddrizzando eventualmente la sua rotta: se la nave reagisce in questo modo è dinamicamente instabile poiché una variazione di segno dell'angolo di barra del timone non comporta una variazione di segno dell'angolo di rotta.

Quando si manifesta un comportamento di questo tipo, l'efficacia del timone per il controllo della rotta della nave diventa incerta, anche se il timone è stato correttamente dimensionato per conferire alla nave buone doti di manovrabilità, intesa questa come capacità di manovrare in spazi ristretti. La soluzione al problema quindi non va ricercata tanto nella modifica del timone, quanto nel miglioramento delle caratteristiche idrodinamiche di carena con l'aggiunta di *superfici di stabilizzazione*. In altre parole, si aumenta l'area del piano di deriva a poppa, generando delle appendici di carena, con pinne poste a poppavia o ai lati del timone. Per esempio, sulle navi veloci è usuale progettare poppe con ampi skeg proprio per prevenire l'insorgere dell'instabilità di rotta. Ciò comporta due effetti sulla stabilità di rotta:

- da una parte, il più significativo consiste nella riduzione dell'effetto di deriva sul timone: lo skeg favorisce il mantenimento del flusso sulla direzione prora-poppa e conseguentemente l'angolo di attacco effettivo diventa prossimo a quello geometrico; inoltre aumenta la forza utile generata dal timone;
- dall'altra parte si ottiene lo spostamento del centro di deriva verso poppa e quindi la riduzione del momento causato da W_{A+D} : la nave diventa più "stabile" ma contemporaneamente peggiora l'attitudine all'evoluzione.

Si osservi che, per quanto detto, una nave risulterà più propensa alla stabilità dinamica se naviga appoppata, infatti si ritiene che sia più vincolante una verifica della stabilità dinamica condotta con nave a pieno carico rispetto ad una condotta con nave in zavorra, ovvero con immersione media minore ma con accentuato appoppamento.

L'instabilità si manifesta in maniera deleteria nel controllo della rotta rettilinea della nave, anche quando la nave non si trova inizialmente in evoluzione, infatti quando una causa esterna fa deviare la nave dalla sua rotta rettilinea – per esempio per azione di un colpo di mare o di una forte raffica di vento –, senza che il timone venga mosso, si può innescare un moto su una traiettoria curvilinea, seppure a curvatura molto bassa, dovuto al raggiungimento di un nuovo stato di equilibrio dinamico secondo un procedimento come quello appena descritto. In pratica, all'angolo di barra neutro non corrisponde un'unica traiettoria di evoluzione, come si può vedere sul grafico dello steering diagram di una nave instabile leggendo i valori dei raggi di evoluzione possibili per timone in posizione neutra (height of the instability loop).

Le prove di stabilità dinamica

La stabilità dinamica viene testata al vero con una prova piuttosto onerosa in termini di tempo, che va sotto il nome di “spiral test” e che permette di tracciare per punti lo steering diagram raccogliendo una dopo l'altra le coppie (α, ψ) , dalle quali si possono valutare poi le coppie (α, R) . Innanzitutto, vista l'onerosità di questi test, è conveniente condurre una prova per vedere se l'instabilità si manifesta o meno, ed in pratica si segue un procedimento di questo tipo:

- per prima cosa si esegue la prova detta di “pull-out” (prova di disimpegno dall'evoluzione), che permette di evidenziare la presenza di instabilità, della quale dà solo una valutazione qualitativa;
- successivamente, in caso di instabilità, si fanno una serie di manovre secondo un procedimento indicato come “reverse spiral test” (costoso anche in termini di apparecchiature);
- altrimenti, per trovare conferma del risultato positivo della prova preliminare, si esegue una serie di manovre secondo un procedimento non eccessivamente costoso, denominato “direct spiral test”.

La differenza di approccio tra i due sistemi consiste nella scelta del parametro dipendente e di quello indipendente fra l'angolo di barra del timone e la velocità di imbardata: se ci si aspetta una nave stabile si può pensare di ricostruire lo steering diagram secondo la funzione $\psi = f(\alpha)$, mentre se si prevede una nave dinamicamente instabile si deve necessariamente fare riferimento alla funzione $\alpha = f(\psi)$.

Il *pull-out test* è una semplice prova che consiste in due fasi: prima il timone viene portato a circa 20° di barra e mantenuto finché la nave stabilizza la sua rotta su una traiettoria con velocità di rotazione ψ costante, poi il timone viene portato al centro. A questo punto, la nave si può portare su una traiettoria rettilinea, ma può anche rimanere una velocità residua di

imbardata, ossia la velocità ψ può non annullarsi. Il test viene effettuato con manovra sia a dritta che a sinistra, in modo da evidenziare l'angolo neutro del timone. Si registra la variazione di ψ in funzione del tempo: se le curve ottenute con le due manovre convergono allo stesso valore ψ_0 vuol dire che la nave è stabile, perché la velocità residua è da imputarsi alla differenza tra l'angolo neutro ed l'angolo di barra nullo; se invece le due curve non convergono allo stesso valore si è messa in evidenza l'instabilità della nave, poiché allo stesso angolo di barra (timone al centro) corrispondono due diverse velocità di rotazione.

Il *direct spiral test* (secondo il metodo di Dieudonné) consiste nel portare la nave – a partire da una rotta rettilinea – in moto circolare uniforme, impostando un alto angolo di barra del timone (di circa 25°) e successivamente nel ridurre l'angolo di barra del timone di 5° alla volta, stabilizzando la nave su rotte circolari via via più larghe, quasi a voler percorrere a gradini una traiettoria a spirale. Ogni volta che il moto si stabilizza vengono lette le coppie (α, ψ) e la manovra procede sino al raggiungimento dell'angolo neutro, eventualmente infittendo i punti rilevati in prossimità di tale valore. Il test viene effettuato con manovra sia a dritta che a sinistra, in modo da verificare la simmetria di comportamento ed evidenziare l'angolo neutro del timone. Si ottengono quindi, in successione, le due curve $\psi = f(\alpha)$ per manovra a dritta e a sinistra.

Il *reverse spiral test* (secondo il metodo di Bech) consiste infine in una serie di prove indipendenti una dall'altra, in ciascuna delle quali, una volta predefinita una traiettoria circolare assegnando il valore della velocità di rotazione che si vuole ottenere, il timone viene manovrato finché non si raggiunge la stabilizzazione del moto con la preassegnata velocità angolare. Nella zona di instabilità il timone dovrà essere continuamente manovrato (nella pratica con escursioni di $\pm 2^\circ$) per mantenere costante il valore di ψ , ed il valore medio dell'angolo di barra desunto dalla prova permetterà di registrare la coppia (α, ψ) con la quale ricostruire, punto dopo punto, la funzione $\alpha = f(\psi)$. Tale grafico metterà in evidenza il comportamento della nave nella zona di instabilità. Queste manovre devono essere molto lente, le grandezze impostate (angoli di barra) devono essere controllabili con estrema precisione, mentre tutte le grandezze, anche quelle lette (velocità di imbardata), si devono poter misurare con accuratezza. Il test viene effettuato con manovra sia a dritta che a sinistra, in modo da verificare la simmetria di comportamento ed evidenziare l'angolo neutro del timone. Si ottengono quindi, in successione, tutti i punti dei due bracci della curva $\alpha = f(\psi)$.

Infine, si anticipa che, per individuare e quantificare sommariamente l'instabilità, vengono utilizzati anche metodi approssimati desunti da prove più semplici realizzate per valutare gli altri parametri di manovrabilità.

Le caratteristiche di manovrabilità

Le normative internazionali hanno fatto ordine nella definizione dei parametri per la caratterizzazione e la quantificazione delle qualità delle navi nei confronti della manovra. In essenza si sono definite tre categorie di attitudini alla manovra, che consentono di saggiare come:

- mantenere la rotta (course-keeping ability),
- modificare la rotta (course-changing ability),
- effettuare manovre di emergenza (turning ability, stopping ability).

Nel primo caso si tratta di valutare la capacità di mantenere il moto rettilineo su una rotta identificata da una determinata direzione, senza dover ricorrere ad eccessive variazioni dell'angolo di barra del timone attorno alla posizione neutra e della nave attorno alla direzione della rotta. Non esiste un parametro che definisca questa caratteristica, perciò essa viene spesso correlata alla stabilità dinamica della nave. In effetti, tale caratteristica è strettamente legata alla stabilità dinamica della nave e si verifica infatti che solo in navi dinamicamente stabili la course keeping ability è soddisfacente (nella pratica si osserva che la capacità di course-keeping è soddisfacente anche in presenza di una piccola instabilità).

Va aggiunto che si definisce anche una "yaw checking ability", che consiste nell'attitudine della nave a rispondere al timone quando questo, durante un'accostata, è portato dalla parte opposta. Si tratta di un'attitudine fortemente correlabile alla stabilità di rotta.

La capacità di modificare la rotta, detta anche "initial turning ability", consiste nell'attitudine a variare di un piccolo angolo la rotta della nave; questa manovra viene ripetuta costantemente durante la navigazione, sia per correggere errori dovuti all'azione del mare, sia per modificare piccoli angoli la rotta.

Infine, l'attitudine ad effettuare manovre di emergenza consiste nella capacità della nave di evitare un ostacolo che si viene a trovare sulla sua rotta. Ciò può essere fatto essenzialmente in due modi: con una forte variazione di rotta, in modo da passare a lato dell'ostacolo, oppure arrestando il moto della nave, in modo da non arrivare fino all'ostacolo. Delle due manovre, la prima è la più sicura ma non è sempre effettuabile in acque ristrette, mentre la seconda è più che altro una manovra di estrema emergenza cui si ricorre quando la nave non è più governabile. La capacità di effettuare manovre d'emergenza viene saggiata valutando la "turning ability", ossia l'abilità della nave ad accostare ed evolvere sotto elevati angoli di barra del timone, e la "stopping ability", che corrisponde alla capacità di fermare il moto di avanzo, ricorrendo anche all'inversione della spinta al propulsore.

Queste caratteristiche sono influenzate, sebbene in diversa misura, sia dalla velocità di manovra del timone, sia dall'entità della forza utile che questo può sviluppare. Fa eccezione la stopping ability, che dipende invece dalla velocità di inversione del moto al propulsore e dalla sua efficacia.

I parametri che sono stati messi in luce per misurare queste attitudini sono tutti ricavabili da manovre standardizzate. È interessante notare che i parametri relativi alla singola attitudine si ricavano da prove diverse e che nella stessa prova si possono avere indicazioni sui parametri delle tre categorie. Per questo motivo risulta conveniente analizzare i diversi tipi di prove standard e, per ognuna, evidenziare quali sono i parametri più significativi della risposta della nave alla manovra, per poi correlarli alle diverse attitudini delle quali si ritengono rappresentativi.

Le prove di manovrabilità IMO

Una prima raccolta ragionata dei diversi test utili alla valutazione della manovrabilità delle navi è quella contenuta nel Manoeuvring Trial Code proposto dalla 14th International Towing Tank Conference (ITTC 1975). In questo documento sono elencate le prove al vero più significative, per le quali è stata anche proposta una standardizzazione delle procedure di esecuzione e di raccolta dei dati caratterizzanti la risposta della nave.

La storia dell'impegno dell'IMO (International Maritime Organization, agenzia delle Nazioni Unite per la sicurezza della navigazione) nella direzione di incrementare la sicurezza delle navi in relazione alle loro attitudini di manovrabilità si concreta per la prima volta nel 1968 con la circolare MSC-389 riguardante le modalità di esecuzione delle prove di stabilità, che non erano però obbligatorie. Dopo una serie di documenti emanati dal comitato MSC e dall'Assemblea, oggi si è giunti a disciplinare l'intera materia con le seguenti Risoluzioni:

- MSC.137(76) – “Standards for Ship Manoeuvrability”, che indica i criteri di valutazione delle qualità manovriere delle navi, standardizza le prove al vero e fissa i limiti cui devono sottostare i parametri da esse ottenuti; il contenuto della Risoluzione è spiegato nella circolare MSC/Circ.1053 – “Explanatory Notes to the Standards for Ship Manoeuvrability”;
- A.601(15) – “Provision and Display of Manoeuvring Information on board Ships”, che stabilisce quali informazioni devono essere messe a disposizione del comando della nave, e con quale formato devono essere esposte in plancia.

Nel loro complesso quindi le caratteristiche di manovrabilità costituiscono oggetto di regolamenti IMO, sia nel senso che devono essere

misurate, registrate e fornite al comando della nave, sia nel senso che devono essere confrontate con valori limite di normativa.

Le prove al vero regolate dall'IMO sono per esplicita attestazione "semplici, pratiche e veloci", esse sono obbligatorie per navi di lunghezza superiore a 100 metri (ma per navi chimichiere e gasiere non c'è un limite inferiore di lunghezza), e devono essere eseguite alla velocità alla quale si prevede che la nave si muoverà nelle aree in cui saranno necessarie le manovre; per navi lente (elevato c_B) la velocità di prova sarà prossima a quella massima di servizio v_S [kn], mentre per navi veloci può essere considerevolmente ridotta. Le norme richiedono che la velocità di prova v_T [kn] sia pari al prodotto $c_B v_S$. Si osservi che questo valore indicherà la sola velocità di ingresso nella manovra, infatti a causa del variare delle forze idrodinamiche la velocità di avanzo tenderà in genere a diminuire.

Tutte le prove vanno condotte in mare aperto ma in assenza di correnti (al limite è accettata una corrente uniforme), di vento (al massimo Beaufort 5) e di onde (al massimo mare Forza 4), e di sufficiente profondità (pari ad almeno $4 T_m$, ove T_m [m] è l'immersione media della nave alle prove), con nave non assettata e ad un'immersione il più possibile prossima a quella di progetto.

Alcune prove vengono eseguite a dritta ed a sinistra per mettere in rilievo eventuali asimmetrie di comportamento della nave, asimmetrie da imputarsi prevalentemente al funzionamento dell'elica propulsatrice.

Le prove di manovrabilità che sono state rese obbligatorie dall'IMO sono le seguenti:

- manovra di evoluzione (turning test)
- manovra a zig-zag (zig-zag test)
- manovra di arresto (stopping test)

e verranno di seguito illustrate anche con l'aiuto di esempi tratti da libretti di manovra di navi di recente costruzione.

La manovra di evoluzione

La prova di evoluzione è condotta a partire da una traiettoria rettilinea percorsa alla velocità prestabilita, portando la nave in moto circolare uniforme con il massimo angolo di barra del timone (usualmente 35°), in modo da poter valutare gli spazi di manovra in relazione alla capacità di effettuare manovre di emergenza per evitare una collisione. La nave viene mantenuta sulla traiettoria circolare per almeno un giro e mezzo (540°), in modo da poter correggere i valori registrati tenendo conto di corrente e vento. I parametri utili alla valutazione della manovrabilità sono raccolti dall'inizio della manovra fino alla fase di rotazione uniforme, perciò

all'uscita dall'evoluzione può essere condotta una manovra di pull-out. Le traiettorie descritte dalla nave a dritta e a sinistra vengono diagrammate; esse mostrano, nelle navi monoelica, una evidente asimmetria dovuta all'azione dell'elica.

La prova di evoluzione è interessante per comprendere la modalità di risposta della nave all'azione generata dal sistema di controllo (usualmente il timone), ed è quindi utile analizzare le singole fasi in cui essa si sviluppa.

La nave viene portata alla velocità voluta v_T su rotta rettilinea (*fase di entrata*) e quando il moto è uniforme si comincia ad effettuare la manovra del timone: a questo punto inizia l'evoluzione della nave. L'accostata è caratterizzata da due differenti fasi: una *fase di evoluzione* propriamente detta ed una *fase di girazione*. Nella fase di evoluzione la nave compie un percorso a spirale con centro di istantanea rotazione variabile e raggio di curvatura della traiettoria sempre più piccolo, nel momento iniziale si manifesta per primo il moto di deriva dalla parte opposta rispetto al timone. Nella fase di girazione la curvatura della traiettoria si stabilizza e la nave prosegue la sua corsa con moto circolare uniforme su un diametro detto diametro di girazione (steady turning diameter).

L'evolversi della manovra può essere spiegato analizzando le forze che agiscono sulla nave. La forza del timone, che causa l'evoluzione della nave e che non si mantiene costante durante le varie fasi della prova, causa un moto di traslazione trasversale, riduce la velocità di avanzo ed imprime un moto di rotazione. Nell'istante in cui il timone è messo alla banda, si genera un moto trasversale ed una rotazione, entrambe ad elevata accelerazione (l'inerzia alla rotazione è maggiore dell'inerzia alla deriva), infatti l'azione del timone è bilanciata dall'inerzia praticamente in assenza di forze di resistenza idrodinamica (che devono ancora maturare pienamente). Durante l'accostata della nave le forze idrodinamiche crescono e assieme matura una forza centrifuga: a regime esse equilibrano la forza del timone in assenza di altre forze inerziali.

Lo svolgersi della prova e la differenziazione delle diverse fasi possono anche essere seguiti osservando l'andamento della velocità di rotazione ψ e della velocità trasversale v_T [m/s] assieme alle relative accelerazioni. In particolare si può notare che la velocità di rotazione prima aumenta e poi si riduce stabilizzandosi, mentre quella di deriva ha una crescita continua fino a stabilizzarsi.

I dati raccolti riguardano gli spazi percorsi in istanti diversi dell'evoluzione. Quando la direzione prora-poppa della nave è variata rispetto a quella iniziale di 90° , lo spostamento trasversale della nave viene definito trasferimento (transfer) e quello longitudinale, misurato dalla posizione di inizio della manovra del timone, viene detto avanzo (advance).

In maniera analoga viene definito il *diametro tattico* (tactical diameter): esso coincide con lo spostamento trasversale corrispondente ad una variazione della direzione prora–poppa di 180° .

Il diametro tattico è il parametro più importante misurato in questa manovra, esso assume valori che mediamente oscillano fra $4,5 \div 7,0 L$ per navi snelle e $2,4 \div 4,0 L$ per navi corte e piene ed è fortemente influenzato dalla rapporto di snellezza di carena (rapporto fra la lunghezza nave L e la radice cubica del volume di carena ∇ [m^3]). Più precisamente il diametro tattico risulta proporzionale al rapporto di snellezza di carena.

Altri dati interessanti da controllare sono rappresentati dall'angolo di deriva e dalla velocità della nave durante l'accostata. L'angolo di deriva è una grandezza fortemente correlata al raggio di girazione, infatti maggiore è l'angolo di deriva, maggiore è il momento generato dalla forza idrodinamica W_{A+D} e conseguentemente minore è il raggio di girazione. Esistono formule di correlazione fra il raggio di girazione R_G [m] e l'angolo di deriva β , tra queste si rammenta la relazione generica che fornisce $\beta = 22,5 L / R_G$ [$^\circ$]. Importante è anche l'angolo di deriva al timone, a tale riguardo si possono osservare le misurazioni condotte su una serie di carene di navi mercantili durante le manovre di evoluzione: esse danno un'idea dell'entità di riduzione dell'angolo di attacco sul timone durante la manovra, e mettono in evidenza il minore rischio di stallo che conseguentemente si viene ad avere. Infine, anche la velocità di manovra è stata abbondantemente misurata durante prove di evoluzione di diverse tipologie di navi mercantili, mostrando come essa si modifichi, riducendosi anche in maniera considerevole (in maniera proporzionale al c_B) per effetto dell'aumento di resistenza idrodinamica all'avanzo.

A conferma di quanto detto si possono analizzare i risultati della prova di evoluzione di una nave monoelica (l'ocean survey vessel "HMS Scott"). La prova è stata condotta alla velocità di circa 18 nodi e con angolo di barra del timone di 30° . I risultati mostrano la traiettoria percorsa dal baricentro della nave, che risente evidentemente delle condizioni ambientali ma che comunque permette di valutare il diametro tattico. Si osservi che il diametro tattico è pari a circa 500 m, ossia circa 4,2 volte la lunghezza della nave, contro quello richiesto pari, come si vedrà, a 600 m. È inoltre interessante notare come la velocità si stabilizzi a circa il 50% di quella di ingresso, mentre l'angolo di deriva rimane praticamente costante e pari a circa 5° (come si può vedere dalla differenza fra "ship heading" e "heading").

Un altro esempio interessante è quello offerto dalle prove di manovrabilità condotte su una nave bielica (il traghetto "Staffetta Ligure"). La prova di evoluzione è stata condotta a due diverse velocità (20 kn e 6 kn) e con angolo di barra del timone di 35° . I risultati mostrano che i tracciati di

dritta e di sinistra sono molto simili, infatti le due eliche sono contro-rotanti, ed inoltre risulta evidente che la velocità di avanzo non influisce sull'esito della manovra. Si osservi che il massimo diametro tattico è pari a 490 m, ossia circa 3,6 volte la lunghezza della nave, contro quello richiesto pari, come si vedrà, a 675 m. Sono inoltre disponibili anche i dati sull'avanzo, che mostrano un valore massimo di 485 m contro il limite di circa 600 m, e i dati sul trasferimento, i quali mostrano un valore massimo di 185 m. È anche interessante notare come la velocità di avanzo in girazione v_G [kn] si stabilizzi rispettivamente a circa 11 kn e 4 kn (il 55% ed il 65% di quella di ingresso), mentre l'angolo di deriva rimane praticamente costante ma è molto influenzato dalle condizioni del mare e del vento, perciò per la velocità di ingresso di 20 kn si ha a dritta $\beta \approx 3^\circ$ ed a sinistra $\beta \approx 20^\circ$. Volendo calcolare poi la velocità di rotazione per le due velocità, si ottiene rispettivamente $\psi = 0.025$ rad/s e $\psi = 0.009$ rad/s, mentre i tempi totali di prova sono rispettivamente di circa 6 minuti e 17 minuti.

Come precedentemente accennato, la nave reagisce all'azione del timone accostando e portando la prora all'interno della traiettoria con un certo angolo di deriva. L'intersezione fra il piano diametrale della nave e la sua normale passante per il centro di istantanea rotazione definisce il *punto giratorio*, ossia quel punto fisso sulla nave rispetto al quale la nave ruota senza subire spostamento trasversale. I triangoli di velocità costruiti sui due punti estremi della nave, ottenuti scomponendo la velocità assoluta in una componente trasversale ed una longitudinale, mostrano infatti che ogni punto del piano diametrale, poiché sottostà ad una velocità d'avanzo (direzione prora-poppa) costante, sperimenta una velocità trasversale che varia linearmente tra i due estremi di prora e di poppa, mutando di verso ed annullandosi su un punto.

Durante la fase di girazione un osservatore posto sul punto giratorio sperimenta una velocità sempre rivolta nella direzione del piano di simmetria, infatti in corrispondenza di tale punto non vi è deriva. Dal punto giratorio è più agevole apprezzare il moto della nave, perciò la plancia per il pilota, quando possibile, viene convenientemente sistemata in prossimità di tale punto, a circa $1/4 \div 1/5 L$ da prora. Il punto giratorio si sposta infatti di poco al variare della velocità e dell'angolo di barra, pur dipendendo essenzialmente dal diametro di girazione, mentre è fortemente influenzato dalla configurazione dell'opera viva.

Per quanto riguarda lo sbandamento causato dall'accostata, si possono osservare tre fasi, per ognuna delle quali il momento di sbandamento, riferito al centro di massa della nave, è generato da forze diverse ed è ovviamente sempre equilibrato dalla coppia di stabilità:

- inizialmente, quando il timone viene messo alla banda, si verifica uno *sbandamento di saluto* verso l'interno della traiettoria causato dalla

forza del timone, e contrastato dalla forza d'inerzia allo spostamento trasversale che tuttavia lavora con minor braccio e minor intensità;

- successivamente, durante l'evoluzione, matura una forza di reazione idrodinamica trasversale; in questa situazione si genera un forte *sbandamento di evoluzione* verso l'interno causato dalla forza d'inerzia della massa aggiunta e dalla forza idrodinamica, che lavorano in contrasto con la forza del timone;
- infine, nella fase di girazione, le forze inerziali centripete si annullano: in questa situazione si ha uno *sbandamento di girazione* causato dalla forza idrodinamica che determina un momento maggiore di quello della forza del timone, ma con minore intensità rispetto alla fase di evoluzione (infatti tutte le forze in gioco hanno ora intensità ridotte).

Lo sbandamento è in genere pericoloso per navi con elevate velocità relative ($F_N > 0,25$). Un comportamento sostanzialmente diverso è quello mostrato dai sottomarini in immersione, i quali, per motivi di stabilità, hanno il baricentro al di sotto del centro di spinta. Il centro di applicazione delle reazioni idrodinamiche si trova infatti in posizione verticale prossima al centro dei timoni, perciò lo sbandamento di saluto si manifesta verso l'esterno della traiettoria e quelli di evoluzione e di girazione verso l'interno.

La manovra a zig-zag

Tornando all'analisi delle prove di manovrabilità, la manovra a zig-zag è ottenuta portando il timone ad un prefissato angolo di barra $+\alpha$ a dritta e mantenendolo in tale posizione finché la nave non modifica la propria rotta di un angolo prestabilito $+\delta$ (angolo relativo alla direzione iniziale della nave), dopodiché il timone viene ruotato dalla parte opposta della stessa quantità ($-\alpha$) e lo si lascia in tale posizione finché la nave risponde al timone con una variazione di rotta, sempre misurata rispetto alla rotta rettilinea d'ingresso, pari a $-\delta$. La procedura, ripetuta per almeno cinque volte per testare le condizioni di prova e per raccogliere dati aggiuntivi, viene caratterizzata dalla scelta della coppia di angoli (α, δ) , e viene indicata con la sigla α/δ .

L'IMO ha standardizzato le manovre $10^\circ/10^\circ$ e $20^\circ/20^\circ$, delle quali la prima è consigliata perché fornisce indicazioni più utili alla valutazione della stabilità di rotta – infatti essa saggia la manovrabilità per angoli di barra e di accostata medio-piccoli, più prossimi a quelli usuali di controllo della rotta. I dati registrati sono essenzialmente: il tempo impiegato nella prima accostata per raggiungere l'angolo di rotta $+\delta$, detto *initial turning time* (t_I), la differenza fra l'angolo di controllo $+\delta$ e l'angolo massimo di variazione di rotta raggiunto alla prima accostata, differenza indicata come *overshoot starboard angle* (δ_S) – detto anche *1st overshoot angle* –, il tempo necessario

per passare da δ a δ_s , indicato come *time to check yaw* (t_C) ed infine la differenza fra $-\delta$ e l'angolo massimo di variazione di rotta raggiunto alla seconda accostata, differenza indicata come *overshoot port angle* (δ_p) – detto anche *2nd overshoot angle* –. La traiettoria descritta dalla nave viene diagrammata in funzione del tempo. Si osservi ancora che la prima accostata viene fatta verso dritta poiché è verso dritta che la nave deve manovrare per disimpegnarsi in una situazione di emergenza (questa prova quindi non viene ripetuta con accostate simmetriche).

Anche in questo caso sono disponibili i risultati della manovra condotta sulla nave bielica “Staffetta Ligure”. Le manovre a zig-zag sono state condotte con le modalità 10°/10° (alla velocità di 20 kn) e 20°/20° (alla velocità di 5,5 kn) fornendo i seguenti risultati per gli angoli di overshoot (tra parentesi i valori limite):

prova 10°/10°: $\delta_s \approx 17^\circ$ (11,5°) $\delta_p \approx 27^\circ$ (26,5°)
prova 20°/20°: $\delta_s \approx 30^\circ$ (25,0°) $\delta_p \approx 30^\circ$ (–)

Inoltre i tempi relativi alla prima prova con la modalità 10°/10° ($t_I \approx 28$ s e $t_C \approx 50$ s) indicano che la distanza coperta durante l'initial turning time è di circa 290 m, inferiore al valore limite di 337 m. I tempi totali di prova sono rispettivamente di circa 4 minuti e 10 minuti.

La manovra di arresto

La manovra di arresto del moto di avanzo viene eseguita esclusivamente per saggiare l'attitudine della nave a fermarsi per evitare la collisione con un ostacolo che si trova sulla propria rotta. La manovra standardizzata prevede che la nave venga portata inizialmente in moto rettilineo uniforme e che ad un certo istante la spinta generata dal propulsore venga invertita nella maniera più veloce possibile fino a generare la massima forza frenante (macchine “indietro tutta”). Altre prove simili sono quella di crash-stop, nella quale il motore viene fermato, e quella in cui, contemporaneamente all'inversione della spinta del propulsore, si porta alla banda il timone.

Dopo l'azione sul sistema propulsivo, la nave inizia a percorrere una traiettoria curva con moto decelerato, usualmente infatti si manifesta una deviazione laterale sia per l'asimmetria del propulsore – spostamento verso destra con elica destrorsa –, sia per le condizioni ambientali, e tutto ciò anche se il timone viene tenuto al centro. Si registrano, a partire dal momento in cui viene dato il comando di macchine indietro (astern order), il tragitto percorso (track reach), la distanza coperta nella direzione della rotta iniziale (head reach) e lo spostamento trasversale da tale rotta. Si osservi che tra l'avanzo ed il tragitto percorso, data l'incertezza della traiettoria, il più significativo ai fini della sicurezza è il track reach. Anche per questa prova la traiettoria descritta dalla nave viene diagrammata in funzione del tempo.

Anche per la prova di arresto sono disponibili i risultati della manovra condotta sulla nave bielica “Staffetta Ligure”. La manovra effettuata alla velocità d’entrata di 20 kn fornisce i seguenti risultati: tempo d’arresto di 480 s (8 minuti), tragitto percorso 1128 m (contro il limite di 1025 m), avanzo 931 m, deviazione laterale 413 m. Sulla stessa nave sono state anche condotte due prove d’arresto con timone alla banda (35°) a dritta e a sinistra: esse forniscono un’indicazione utile ad evitare un ostacolo, infatti si ha una riduzione dell’avanzo a circa 470 m.

I parametri di manovrabilità

Dalle singole prove si raccolgono una serie di dati utili a misurare le diverse qualità manovriere della nave. In particolare, le attitudini di manovrabilità vengono correlate ai parametri misurati nelle prove al vero nel modo seguente:

- la stabilità dinamica viene valutata attraverso le prove di pull-out (velocità residua angolare ψ_0) e di manovra a spirale (larghezza e altezza del ciclo di instabilità, quest’ultima misurata sull’angolo di barra neutro), ma in maniera qualitativa anche attraverso la manovra a zig-zag con l’angolo di overshoot, che mostra la tendenza a continuare il moto impostato nonostante l’azione contraria che matura per effetto dello spostamento del timone;
- la capacità di mantenimento della rotta viene correlata alla stabilità dinamica e misurata attraverso i parametri di quest’ultima, mentre la capacità di controllare l’imbardata si deduce dalla manovra a zig-zag con l’angolo di overshoot ed il time to check yaw, parametri che sono indicativi di quanto la nave riesca a seguire velocemente il comando impartito;
- la capacità di modificare la rotta viene misurata con il valore dell’initial turning time ottenuto dalla manovra a zig-zag, esso fornisce, una volta nota la velocità di ingresso della nave v_T , il tragitto s_I [m] percorso dalla nave prima di rispondere alla variazione di rotta (infatti $s_I = v_T t_I$);
- la capacità di effettuare manovre d’emergenza si misura con i parametri ottenuti dalle prove di evoluzione e di arresto, tra questi i più importanti sono rappresentati dal diametro tattico della prova di evoluzione e dal tragitto percorso (track reach) della prova di arresto.

In TAB.1 sono richiamati dalle Risoluzioni IMO i valori limite previsti per i parametri di manovrabilità finora descritti (le lunghezze sono adimensionalizzate con la lunghezza della nave tra le perpendicolari L [m], mentre v_T [m/s] è la velocità di prova).

Questi valori limite sono validi per tutte le navi e possono essere resi ancora più restrittivi dagli armatori – le caratteristiche di manovrabilità costituiscono parte delle specifiche contrattuali fra armatore e cantiere –

soprattutto per navi che hanno esigenze particolari, quali per esempio rimorchiatori, traghetti, draghe.

PARAMETRO DI MANOVRABILITÀ		CRITERIO IMO
avanzo (turning test)		4,5 L
diametro tattico (turning test)		5 L
distanza coperta durante l'initial turning time (zig-zag test 10°/10°)		2,5 L
1° angolo di overshoot (zig-zag test 10°/10°)	$L/v_T \leq 10$ s	10°
	$10 \text{ s} < L/v_T < 30$ s	(interpolazione lineare)
	$L/v_T \geq 30$ s	20°
2° angolo di overshoot (zig-zag test 10°/10°)	$L/v_T \leq 10$ s	25°
	$10 \text{ s} < L/v_T < 30$ s	(interpolazione lineare)
	$L/v_T \geq 30$ s	35°
1° angolo di overshoot (zig-zag test 20°/20°)		25°
tragitto percorso (stopping test)		15 ÷ 20 L

TABELLA 1: valori limite dei parametri di manovrabilità

I risultati delle prove vanno trascritti su appositi stampati ed affissi in plancia assieme ai tracciati delle stesse, come richiesto dalle Risoluzioni IMO.

Altre manovre IMO

Le prove non obbligatorie, ma ugualmente standardizzate dall'IMO allo scopo di permettere indagini più approfondite sulla stabilità dinamica della nave, sono:

- la manovra a spirale diretta o inversa o semplificata (spiral test) – le prime due sono già state trattate riguardo alla valutazione dello steering diagram, per la terza va detto che si tratta di una manovra a spirale condotta per tre sole condizioni di evoluzione della nave, con timone successivamente alla banda da un lato, al centro ed infine alla banda dal lato opposto;
- la manovra di pull-out (pull-out test) – già trattata con riferimento alla valutazione dello steering diagram;

- la manovra a zig-zag a piccoli angoli (very small zig-zag test) – è una manovra che viene svolta in maniera analoga alla prova di zig-zag già trattata, ma ad angoli di barra non superiori a quelli usuali di controllo della rotta ($\alpha < 5^\circ$), per esempio con la combinazione $1^\circ/5^\circ$. Un caso particolare è quello della prova $0^\circ/5^\circ$ iniziata con velocità di rotazione non nulla.

Si vuole qui rimarcare che i risultati della prova di zig-zag convenzionale vengono utilizzati per misurare la stabilità di rotta della nave solo perché le altre prove qui elencate sono costose in termini di tempo e fortemente sensibili alle condizioni atmosferiche.

Osservazioni sull'efficacia del timone

Fra le diverse prove di manovrabilità, quelle che più interessano per la valutazione dell'efficacia del timone sono quelle di evoluzione e di zig-zag: solo in queste prove si misurano parametri di manovrabilità che dipendono essenzialmente dal timone. Infatti, la stabilità dinamica e la capacità di arrestare il moto di avanzo non dipendono dal timone ma riguardano principalmente attitudini proprie dello scafo (forme di carena, piano di deriva). Va detto comunque che la stabilità dinamica e quindi anche la stabilità di rotta sono favorite da un timone efficace, ossia da un timone in grado di generare velocemente (ovvero a bassi angoli di barra) elevate forze utili.

L'analisi della prova di evoluzione risulta particolarmente utile per mettere in rilievo le condizioni di funzionamento estreme del timone. Dall'analisi delle modalità di accostata della nave si è visto che la forza utile generata dal timone varia considerevolmente durante la manovra, infatti si riduce sia per effetto della diminuzione della velocità di avanzo della nave, sia per effetto dell'angolo di deriva al timone. In conclusione le forze sul timone sono massime nell'istante di inizio della manovra di evoluzione, e quindi all'inizio della generica fase di accostata ad angolo di barra costante.

Lo studio della prova di evoluzione mostra anche che, all'aumentare dell'angolo di barra del timone, il diametro di girazione si riduce con una proporzionalità non lineare, infatti quando l'angolo di barra supera i 30° - 35° le qualità evolutive sostanzialmente non migliorano. Dallo steering diagram si era visto anche che la curva del raggio di evoluzione tende a raggiungere un valore asintotico orizzontale per valori dell'angolo di barra prossimi a quelli appena indicati. Di conseguenza i timoni non vengono manovrati oltre tali valori limite, anche se in tali condizioni l'angolo di attacco effettivo si trova ben al di sotto del valore dell'angolo di stallo.

Riguardo all'angolo di barra massimo efficace, vanno ricordati i risultati delle prove al vero condotte ad Indret sulla Loira da Joessel nel 1873. Egli

misurò la forza idrodinamica che nasce sul timone durante l'accostata: si tratta certamente di forme di pala e di carena datate ma i risultati danno la conferma che il valore di 35° dell'angolo di barra è quello che fornisce il massimo momento evolutivo.

Un'altra osservazione interessante che si può fare in base a queste note è quella che chiarisce quali sono i motivi, legati alla manovrabilità, che giustificano il posizionamento del timone nella volta di poppa.

La collocazione del timone a poppa risponde ad una esigenza fondamentale di sicurezza rispetto alle collisioni ed all'impatto con corpi estranei, ma risulta anche la più funzionale dal punto di vista dell'efficacia nei confronti dell'accostata. Nel caso di timone a prora si ha infatti che:

- la forza trasversale utile F_T è orientata all'interno della traiettoria e ciò comporta un maggior momento di resistenza idrodinamica, infatti in questa circostanza la forza idrodinamica W_{A+D} (agente a prora verso l'esterno della traiettoria) genera un momento verticale $W_{A+D} b_W$ dello stesso segno del momento $M_{W,Y}$ (al contrario di quanto avviene quando il timone si trova a poppa). È importante notare che in questo modo si viene ad avere un minore angolo di deriva ed è noto che un minore angolo di deriva è associato ad un più ampio raggio di girazione.
- la forza trasversale utile F_T si riduce in intensità a causa della riduzione dell'angolo effettivo d'attacco, infatti non si manifesta alcun effetto di raddrizzamento del flusso (raddrizzamento che si ha invece nella scia della nave e dell'elica). Di conseguenza il momento evolutivo M_E tende ad essere di minore intensità.

In conclusione, la maggiore resistenza all'evoluzione ed la minore azione evolutiva concorrono nell'aumentare gli spazi necessari per la manovra di evoluzione e, in generale, per la generica accostata, rendendo meno efficace il timone. Tale fenomeno viene anche spiegato illustrando che gli angoli di deriva che nascono fra la direzione della nave e le velocità indotte dalla deriva e dalla rotazione sono concordi se il timone è a poppa e discordi se il timone è a prora: con timone a poppa si ottiene perciò un angolo di deriva minore e conseguentemente una traiettoria più larga. Inoltre, la minore efficacia del timone può far risentire maggiormente degli effetti dell'instabilità dinamica della nave.

Il caso di nave con timone a prora è molto simile, per certi versi, a quello di nave dotata di timone a poppa e che procede all'indietro per esigenze di manovra: valgono anche in questo caso le osservazioni sul rischio di inefficacia della manovra, vuoi per un'instabilità dinamica intrinseca della nave, vuoi per effetto di una corrente marina che provochi angoli di attacco effettivi opposti a quelli di barra.

Manovre varie

Esistono prove di manovrabilità che non sono standardizzate dall'IMO dal momento che non riguardano tanto la sicurezza della nave, quanto invece l'efficacia dei sistemi di governo negli spostamenti in acque ristrette. Si tratta di prove effettuate con lo scopo di saggiare le caratteristiche di manovrabilità della nave ferma o quasi ferma, per valutare fino a che punto la nave può essere indipendente dai sistemi ausiliari esterni, ovvero dai rimorchiatori, il cui costo per le normali operazioni di avvicinamento alla banchina non è trascurabile. Considerazioni aggiuntive vengono perciò effettuate sulla risposta della nave alle manovre condotte in acque ristrette anche tramite l'azionamento coordinato dei diversi impianti (timone ed eliche trasversali). Tra queste si ricordano:

- la manovra di evoluzione condotta a partire da nave ferma con timone alla banda e macchine a mezza potenza;
- le prove condotte con le sole eliche trasversali, ovvero la manovra di evoluzione (effettuata con velocità comprese fra 0 nodi e 8 nodi e limitata ad una variazione di rotta di 90°) e quella a zig-zag (effettuata con velocità comprese fra 3 nodi e 6 nodi e con riferimento ad una variazione massima di rotta di 10°).

Le prove finora discusse sono tutte effettuate in relazione alla ricerca dei parametri di manovrabilità della nave, esistono però altre prove al vero che sono eseguite con scopi ben diversi. Si citano perciò due importanti manovre di seguito descritte:

- la manovra di recupero uomo in mare,
- la manovra di collaudo del timone.

Con l'intenzione di fornire al comando della nave un'indicazione utile al recupero di un uomo in mare (man over board), l'IMO ha proposto la cosiddetta *manovra di Williamson* (Williamson turn). Questa evoluzione è stata studiata per fare ritornare la nave nella posizione in cui è stato rilevato l'uomo in mare, presumibilmente sotto bordo, e consiste in una serie di manovre tali da far ottenere la variazione di rotta di 180° , nel minore tempo possibile, riportando la nave sulla stessa traiettoria iniziale. In pratica, se l'uomo si trova a sinistra, il timone deve essere portato prima a sinistra in modo da variare la rotta di circa 60° e poi a dritta ottenendo un'ulteriore variazione di rotta di circa 130° , allo scopo di far uscire la nave dalla traiettoria iniziale e di farle fare una forte accostata con uscita, dopo 180° di variazione di rotta, sulla stessa traiettoria. In questo modo, se l'uomo è in mare a sinistra, si controlla agevolmente la manovra, facendo uscire la nave dall'evoluzione in modo da raccogliere l'uomo da dritta.

Una manovra molto importante per la sicurezza della nave è quella che prevede di testare la robustezza del sistema di governo, ovvero del

complesso formato dal timone, dall'asta di controllo e dal suo macchinario. Si tratta del cosiddetto *hard rudder test*, definito dalle normative IMO (SOLAS, Cap.II-1, Part C – “Machinery Installations”, Regulation 29), che prevede di portare la nave su rotta rettilinea alla massima velocità (e alla massima immersione) e quindi di manovrare il timone attraverso la timoneria principale, con la massima velocità di rotazione dell'asta, dal centro a 35° a sinistra e poi immediatamente fino a 30° a dritta. Il tempo impiegato per la successione $0^\circ \Rightarrow 35^\circ P_s \Rightarrow 30^\circ S_s$ non deve superare 28 secondi.

Questa prova serve per valutare sia la robustezza del sistema, sia la velocità di azione, sia ancora per certificare l'angolo massimo di lavoro del sistema. Una prova analoga deve poi essere svolta con la macchina di governo ausiliaria, per la quale si considera – sempre alla massima immersione ma a velocità dimezzata e comunque superiore a 7 kn – un ciclo dell'angolo di barra $0^\circ \Rightarrow 15^\circ P_s \Rightarrow 15^\circ S_s$, da svolgersi in non più di 60 secondi.

Si osservi che, non prevedendo diversificazioni per dimensioni e tipo di nave, il limite previsto dalla normativa non può ritenersi adatto alle diverse esigenze delle navi.