

Lezioni

di

Idrosostentazione Dinamica

Corso di Costruzioni Navali

Laurea in Ingegneria Navale

(Versione in formato [MSWord](#))

Glossario (da spostare alla fine della seconda parte)

aero- - Prefisso comune a tutte le parole concernenti l'aria, come *aerodinamica*, *aeronautica*, *aeroplano*, *aeroporto*. È spesso erroneamente scambiato con la sua metatesi *areo-* o peggio con *aereo-* da alcuni giornalisti, per lo più televisivi, dato che il controllo ortografico ne impedisce per fortuna la sua comparsa sulla carta stampata.

allungamento (*aspect ratio*) - Il rapporto tra l'apertura e la corda alare.

angolo di assetto (*pitch angle*) - L'angolo tra l'orizzontale ed l'asse di riferimento longitudinale di un'ala, di un natante o di un aereo. L'asse longitudinale di riferimento è normalmente orizzontale quando il mezzo è fermo, può essere il ponte per una nave o il pavimento di un aereo. Per un'ala è la linea tra i bordi di attacco e di uscita della sezione alare detta anche corda alare.

angolo di chiglia (*keel*) - L'angolo tra l'orizzontale ed il piano di uno dei lati della carena. Influenza l'efficienza e la tenuta del mare: un angolo maggiore dà bassa efficienza e migliore tenuta (minore risposta alle onde), un angolo minore dà maggiore efficienza, ma minore tenuta (maggiori movimenti con le onde).

apertura alare (*wing span*) - La larghezza di un'ala. La dimensione orizzontale perpendicolare al senso del moto.

assetto - Vedi "angolo di assetto".

babordo (*port*) - Lato o fianco sinistro della nave nel senso del moto.

bagnasciuga - Termine marinaresco: zona dello scafo che può essere bagnata o asciutta a seconda del carico di una nave. È compresa fra l'opera viva e l'opera morta, e ne fa parte alternativamente. Esiste un celebre discorso di Mussolini detto "del bagnasciuga" dove il termine è impropriamente usato al posto del corretto "battigia" (vedi). Lo stesso Mussolini fu molto contrariato nell'apprendere del suo errore, che ha comunque inciso nella lingua italiana, rendendo i due termini impropriamente sinonimi.

battigia - Zona della spiaggia alternativamente coperta e scoperta dalle onde. Nei laghi è dell'ordine dei decimetri, nel Mediterraneo dell'ordine del metro, negli oceani dell'ordine delle decine o anche centinaia di metri (Oahu, Hawaii o Half-Moon Bay, California). Da non confondere con la zona di marea, che può estendersi per vari km (Mont Saint-Michel in Bretagna, baia di Fundy nella Nuova Scozia), la cui estensione oscilla nell'arco del periodo di marea (12 ore).

beccheggio (*pitching*) - Oscillazione della nave in senso longitudinale (prua-poppa).

bordo di attacco - La linea più avanzata nel senso del moto di un'ala, bordo anteriore.

bordo di uscita - La linea più arretrata nel senso del moto di un'ala, bordo posteriore.

broach(ing) - Distacco della vena liquida dall'estradosso dell'ala per infiltrazione d'aria.

carena planante (*planing hull*) - Carena semplice a forma di diedro, la cui parte immersa è un tetraedro sottoposto a due forze simmetriche normali alle due facce esposte al moto nell'idrosostentazione dinamica ed il cui centro di pressione (punto di applicazione della risultante) è ad un terzo dalla faccia di poppa. La carena planante è anche soggetta alla forza di Archimede la cui risultante è nel baricentro, ad un quarto dalla faccia di poppa e sostanzialmente inferiore al peso. L'efficienza (rapporto peso/spinta) dipende dall'angolo di chiglia ed è maggiore quanto minore è quest'angolo, generalmente si aggira fra 5 e 10.

cavitazione - Fenomeno dovuto alla diminuzione della pressione di un liquido al di sotto della sua tensione di vapore (cavitazione primaria o da evaporazione), che dà luogo alla formazione di cavità gassose (bolle) di vapore. Si verifica di solito in corrispondenza di una superficie in movimento (faccia anteriore delle pale dell'elica, estradosso di un'ala portante) nei punti di massima depressione ([vedi riferimento](#)). Nel caso che la superficie sia in comunicazione con l'atmosfera è sufficiente che la pressione scenda al di sotto di quella atmosferica per determinare una cavità piena d'aria (cavitazione secondaria o da insufflamento).

chiglia (*keel*) - Vedi "angolo di chiglia".

coefficiente elastico (*elasticity*) - Il rapporto fra la variazione di una forza e quella della la distanza (la derivata della portanza rispetto all'altezza o quota, nel nostro caso). Si misura in N/m (Newton/metro) o anche in Kgf/m (Kg-forza/metro) o meglio in T/m (Tonnellate-forza/metro). In pratica è la misura di quanto bisogna caricare una nave per farla affondare di un metro. Per una nave in dislocamento si ottiene in Kgf/m dall'area di intersezione col piano di galleggiamento moltiplicando per la densità dell'acqua e in N/m moltiplicando ancora per **g** (accelerazione di gravità pari a 9,81 m/s/s).

corda alare (*wing chord*) - La lunghezza di un'ala. La dimensione orizzontale massima nel senso del moto. È anche la distanza tra il bordo di attacco e il bordo di uscita di una sezione alare.

cresting - Contatto della chiglia di un aliscafo con le creste d'onda. È la situazione opposta al *jumping*.

dislocamento (*displacement*) - Massa d'acqua spostata da una nave. Ne sostiene il peso, secondo il principio di Archimede. Corrisponde anche al peso totale, ed è detto anche galleggiamento, corrisponde al volume dell'opera viva (vedi). Nella navigazione in dislocamento la spinta necessaria all'avanzamento può essere minima per bassissime

velocità, ma sale rapidamente e l'efficienza (rapporto peso/spinta) scende subito a valori bassi (<10) per velocità di crociera, ed a valori dell'ordine dell'unità alle massime velocità (20~30 nodi).

dritta (starboard) - Lato o fianco destro della nave nel senso del moto.

ecranoplano - aeromobile sviluppato in Russia, che vola in effetto suolo sull'acqua, richiedendo circa il 40% in meno di potenza per trasportare grandi carichi a velocità dell'ordine di 400 km/h. Vedere questo [link](#) e questo [link](#).

efficienza - Rapporto portanza/resistenza di un'ala o di una chiglia planante. Fattore fondamentale per il consumo di carburante e quindi per l'autonomia.

estradosso - Parte superiore del profilo alare normalmente sottoposta a depressione. La velocità relativa del fluido è maggiore della velocità di avanzamento dell'ala. Contribuisce per il 70% alla portanza totale.

forze di massa - Forze che sono dovute allo spostamento o all'accelerazione di una massa di fluido, ad esempio la forza di Archimede, la sustentazione dinamica della carena planante e dell'ala, dovute allo spostamento verso il basso di una massa d'acqua notevole ad una velocità comparabile con quella di avanzamento. La portanza alare è una forza di massa. Queste forze sono proporzionali al quadrato della velocità.

forze di superficie - Forze che sono dovute alla frizione viscosa sulla superficie dello scafo o dell'ala. Dipendono dal numero di Reynolds, dalla temperatura, dalla viscosità del mezzo e sono proporzionali alla velocità. Per questa ragione sono preponderanti alle basse velocità, quindi per i mezzi che navigano in dislocazione. Sono anche proporzionali alla superficie immersa, quindi meno importanti man mano che la carena planante o l'ala emerge con l'aumentare della velocità.

FSFS (Fully Submerged Foil System) - Vedi SFS.

imbardata (yaw) - Oscillazione della nave attorno all'asse verticale. È anche l'angolo tra la prua e la rotta in assenza di corrente. In termini velici si dice *scarroccio*.

Imperial System - Sistema di misura in vigore nei paesi anglosassoni detto anche foot-pound-second (FPS) o anche yard-pound-gallon in contrapposizione al Sistema Metrico Decimale (MKS: metro-kilogrammo-secondo). È un sistema in cui i multipli o sottomultipli non hanno rapporti decimali, e spesso neanche rapporti razionali, ad esempio: miglio/piede, miglio/yarda, piede cubo/gallone, ton/pound che non sono esprimibili con frazioni (1/3, 1/8, 1/12, ecc.) o richiedono infinite cifre decimali. È nato dal commercio, ed è praticamente impossibile farne un uso ingegneristico. Nei primi anni '80 in America ne fu annunciata la sostituzione, ma il processo non è andato molto avanti in trent'anni. Quando a Stanford mi domandavano perché il sistema metrico decimale era considerato superiore chiedevo sempre quante yarde fanno un miglio o quanti pollici cubi un gallone. Nessuno ha mai saputo rispondere.

incidenza alare (wing incidence) - L'angolo tra la corda alare e la direzione del moto di un'ala. Si hanno le incidenze di portanza nulla, di resistenza minima, di efficienza massima e di stallo. Detta anche *angolo di assetto*.

incidenza neutra - È l'incidenza di portanza nulla di un'ala, incidenza alla quale la resistenza indotta dalla portanza (la parte parabolica o di 2° grado della curva del coefficiente di resistenza C_D) è pure nulla, di conseguenza è anche l'incidenza di resistenza minima. Nei profili asimmetrici è generalmente negativa, perché questi

presentano una portanza considerevole già ad incidenza nulla (portanza di forma), mentre nei profili simmetrici coincide con l'incidenza nulla, ove la resistenza è anche minore che nei profili asimmetrici. Simmetrizzando un profilo asimmetrico (portando i punti mediani degli spessori alari sulla corda) si riduce la resistenza minima, questo è il vantaggio di questi profili, che però producono meno portanza, mancando la portanza di forma. Essi sono usati dove è più importante la velocità che la capacità di carico, ad esempio negli aerei sportivi, ed anche negli aerei acrobatici, ove la simmetria della portanza migliora le caratteristiche nel volo rovescio.

intradosso - Parte inferiore del profilo alare normalmente sottoposta a pressione. La velocità relativa del fluido sull'intradosso è minore della velocità di avanzamento (l'ala tende a *trascinare* il fluido). Contrariamente all'intuizione contribuisce solo per il 30% alla portanza totale.

jumping - Situazione opposta al *cresting*, quando nel cavo dell'onda le ali escono dall'acqua, provocando un volo per inerzia fino all'onda successiva.

miglio marino (*nautical mile*) - Corrisponde ad un primo di grado di latitudine, quindi ad un 1/60 di 1/360 del meridiano terrestre. Cioè $40.000/(60 \cdot 360) = 400/(36 \cdot 6) = 400/216 = 1851,8$ km, arrotondato a 1852 (US) e 1853 (UK). La coincidenza tra miglia marine e gradi di latitudine semplifica i calcoli dei tempi di percorrenza e delle rotte navali. Ai tempi di Colombo si era incerti sulla lunghezza del grado di latitudine tra 56 e 70 miglia terrestri (per le quali è lungo circa 68,4), dato che il miglio marino non era ancora stato definito. La grande incertezza sulla circonferenza terrestre indusse Colombo a pensare che il mondo fosse più piccolo e che la Cina fosse subito al di là dell'Atlantico, dove invece è l'America. Eratostene, guardando nel pozzo di Syene, aveva determinato il raggio terrestre (40.000 stadi), e quindi il grado di latitudine, con migliore precisione ($\approx 10\%$). Da non confondere con lo *statute mile* (miglio terrestre).

miglio terrestre (*statute mile*) - Esistevano molte miglia terrestri nell'antichità, il più noto è quello di Cesare di mille passi romani, circa 1480 m, quello anglosassone corrisponde a 1760 yarde (11 stadi di 160 yarde, 5280 piedi = 63360 pollici = 1609,344 m).

nodo (*knot*) - La velocità di un miglio marino all'ora, abbreviato in **kt**, **kn** o anche **knt**. Una velocità di 60 nodi equivale a 60 primi di grado/ora, cioè ad un grado/ora di latitudine. Dato che un grado è percorso dal sole in 4 minuti, se ne deduce che la velocità di rotazione terrestre all'equatore è di $60 \cdot 60/4 = 900$ nodi; come verifica: $40000/24 = 1666.67$ km/h, $1666.67/1.8518 = 900$ a meno dell'errore sul raggio terrestre. Un riferimento: la velocità del suono al livello del mare è 600 nodi, gli aerei di linea fanno circa 500 nodi. Il nodo è un'unità di velocità (quindi è errato dare una velocità in *nodi all'ora* o *nodi orari*).

numero di Reynolds - Numero puro che esprime l'importanza delle forze di superficie (vedi) rispetto alle forze di massa (v.). È una funzione del rapporto tra la viscosità e la densità del fluido, rispetto al rapporto tra la velocità e una lunghezza caratteristica (anche il rapporto tra il suo volume e la sua superficie) del corpo immerso (scafo o corda alare). Essendo un rapporto tra due tempi ne risulta un numero puro. Bassi valori di questo numero indicano il regime laminare, nel quale il fluido segue il contorno del corpo immerso con velocità orientata secondo la tangente alla superficie, alti valori indicano il regime turbolento, ove si ha il distacco della vena fluida dalla superficie, con il fluido che rotola sulla superficie del corpo creando vortici che, distaccandosi, sottraggono energia al

moto dello scafo o dell'ala, modificando la resistenza, che in genere aumenta, ma può anche diminuire se i vortici restano stazionari non distaccandosi dalla superficie alare. Indicatore del moto turbolento è la formazione di una scia, che è sempre vorticosa. Valori ancora più alti indicano il distacco del fluido stesso con formazione di vuoti o bolle (cavitazione o super-cavitazione), dove la resistenza può diminuire, ma la portanza viene ridotta e la deportanza annullata (a causa della perdita di contatto). La transizione tra regime laminare e turbolento avviene al valore critico del numero di Reynolds, che è più alto se la velocità aumenta, e più basso se la velocità diminuisce, mostrando un fenomeno di *isteresi* che copre la regione critica.

opera morta - La parte emersa o asciutta dello scafo, che è sottoposta a forze trascurabili, principalmente al vento, rispetto a quelle che sollecitano la parte immersa.

opera viva - La parte immersa o bagnata dello scafo, che è sottoposta a forze molto superiori a quelle che sollecitano la parte emersa, principalmente la spinta di galleggiamento e la resistenza all'avanzamento.

piede (foot) - Unità di misura di lunghezza dell'Imperial System, equivalente a 12 pollici, quindi a $2,54 * 12 = 30,48$ cm, un terzo della yarda. Il *piede marino* non è un'unità di misura come il miglio marino, ma la capacità di stare in equilibrio e di camminare sul ponte in movimento di una nave.

planing - Modo di navigare nel quale il peso è sostenuto più dalla portanza dinamica della carena, dovuta alla velocità, che dal dislocamento (galleggiamento) che pure è presente e partecipa, anche se meno del 50%, al sostentamento.

platforming - Modo di navigare di un aliscafo nel quale il centro di gravità si muove in linea retta, con la chiglia sempre al di sopra delle onde, ma senza seguirne il profilo, utile per la precisione di tiro delle armi, ed anche per il comfort dei passeggeri. È necessario che la distanza tra l'ala e la chiglia sia superiore all'ampiezza delle onde.

pollice (inch) - Unità di misura di lunghezza, fondamento del sistema metrico anglosassone (Imperial Units System), pari a 2,54 cm.

portanza (lift) - Forza verticale o comunque ortogonale al moto di un'ala. È l'effetto utile a sostenere il peso di un aereo o di un aliscafo.

portanza di forma (shape lift) - È la portanza residua di un profilo alare all'incidenza nulla (corda alare parallela al moto). Assente nei profili simmetrici. Ciò deriva dal fatto che la curva della portanza è simile ad una sinusoidale in questi profili, mentre nei profili asimmetrici è la stessa sinusoidale, ma traslata verso l'alto, aumentando la portanza massima per incidenze positive, diminuendo la deportanza massima per le incidenze negative (che interessano solo il volo rovescio), ed aumentando l'efficienza.

poppa (stern) - La parte posteriore della nave nel senso del moto.

prua (bow) - La parte anteriore della nave nel senso del moto.

resistenza (drag) - Forza orizzontale o comunque parallela al moto di un'ala. È l'effetto negativo che ostacola l'avanzamento di un aereo o di un aliscafo.

rollio (roll) - Oscillazione della nave in senso laterale attorno all'asse longitudinale.

SCF (SuperCavitating Foil) - Ala completamente cavitante, dove il contatto con l'acqua è limitato al bordo d'attacco ed alla superficie inferiore (intradosso) e si perde la portanza della superficie superiore (estradosso). È usato per alte velocità dove la

cavitazione è inevitabile ed è quindi provocata per aumentare l'efficienza (la cavitazione riduce l'attrito sostituendo il contatto liquido con il contatto gassoso).

SFS (Submerged Foil System) - Vedi SW.

specchio di poppa (transom) - Superficie, generalmente piatta, verticale o inclinata in avanti, che chiude lo scafo a poppa. Può sostenere uno o più motori fuoribordo. Può avere scale, ed un piano orizzontale vicino alla linea di galleggiamento per facilitare la risalita a bordo. Durante la planata non è in contatto con l'acqua.

SPFS (Surface Piercing Foil System) - Vedi SPW.

SPW (Surface Piercing Wing) - Ala parzialmente sommersa (letteralmente: ala perforante la superficie). Possiede una stabilità intrinseca dovuta alla spinta variabile con l'immersione.

stallo - Fenomeno che fa diminuire bruscamente la portanza alla corrispondente incidenza massima, originato dal distacco della corrente di fluido dall'estradosso di un'ala ed al conseguente crollo della depressione della faccia alare superiore.

supercavitazione - Fenomeno che diminuisce la resistenza di un corpo che si muove in un liquido con il distacco del liquido dalla superficie e l'interposizione di uno strato di gas o di una miscela turbolenta di liquido e gas (=> SCF). È usato dal siluro/missile subacqueo russo "[Shqval](#)".

SW (Submerged Wing) - Sistema di ali completamente sommerse. È incapace di autoregolare la quota a profondità maggiori di metà corda alare e quindi necessita di un sistema aggiuntivo di controllo.

tribordo (starboard) - Lato o fianco destro della nave nel senso del moto.

yarda (yard) - Misura di lunghezza dell'Imperial System, pari a 3 piedi o 36 pollici. Equivale a 91,44 cm.

25/3/7 - Lezione 1

Esaminiamo i tre tipi di natante in base al loro modo di avanzare sull'acqua:

1. le navi, che si spostano in dislocamento (0 ~ 30 nodi)
2. i motoscafi, che planano sulla superficie (20 ~ 50 nodi)
3. gli aliscafi, che volano al di sopra della superficie (30 ~ 60 nodi)

1.) - Le navi sono comode, ma lente (10-20 nodi). Per velocità superiori (30 nodi) sono poco economiche, con un'efficienza (rapporto peso/spinta) di 1~2 alle massime velocità, tanto che sono destinate solo ad usi militari (corvette e caccia). Per avere buona efficienza (>10) si devono limitare a velocità inferiori ai 10 nodi. Il calcolo delle potenze necessarie per spingere una nave ad una certa velocità è oltremodo complesso, tanto che i risultati migliori si ottengono con modelli dello scafo nella vasca navale. Quindi tralasciamo questo capitolo, anche perché siamo interessati solo alle alte velocità.

2.) - I battelli a carena planante (motoscafi, motovedette) sono veloci (30~50 nodi), ma poco efficienti (peso/spinta 5~10) e scomodi, con urti violenti su onde formate. Con mare grosso sono costretti alla navigazione in dislocamento. La prua si solleva notevolmente (5~10°) rendendo disagevole muoversi sul ponte ed il puntamento delle armi.

3.) - Gli aliscafi sono veloci (40~60 nodi), un po' meno economici, confortevoli quando il mare è calmo. Ma hanno anche dei difetti, il loro assetto risente molto del mare mosso, sono soggetti alla cavitazione, la loro efficienza non è superiore alla carena planante, non possono fare virate molto strette a causa dell'imbardata inversa e del baricentro alto.

Volendo confrontare le caratteristiche dei motoscafi plananti e degli aliscafi, ci interesseremo al calcolo delle potenze necessarie solo per questi due tipi di natanti.

La carena planante

Proviamo a calcolare la potenza necessaria all'avanzamento di un battello a carena planante. Il problema si semplifica molto per varie ragioni:

1. l'attrito viscoso non entra in gioco essendo una forza di superficie trascurabile rispetto alle forze di massa all'aumentare delle dimensioni;
2. la forma della parte immersa dello scafo si riduce ad una piramide, e la sezione maestra ad un triangolo, o un pentagono;
3. si può ragionare per "integrali primi" ovvero basta calcolare l'energia o la quantità di moto trasferita all'acqua dal passaggio del natante.

Partiamo dall'assunto che il natante scava un solco triangolare nel mare, e che tutta l'acqua contenuta nel prisma descritto dalla base della piramide (lo specchio di poppa) in un secondo, che è facilmente calcolabile, deve allontanarsi con una velocità ed una direzione definite dalle inclinazioni delle superfici. Questa velocità è pure facilmente calcolabile, conoscendo l'angolo che il diedro formato dallo scafo fa con l'orizzonte. Una piramide triangolare (tetraedro) è il volume compreso fra due diedri di cui quello che tocca l'acqua, che è simmetrico, ci interessa, mentre l'altro diedro, che non tocca l'acqua,

costituito dallo specchio di poppa e dall'intersezione dello scafo col livello del mare, non ci interessa perché non è soggetto ad alcuna forza.

Applichiamo il teorema dell'impulso (quantità di moto):

$$F \cdot T = M \cdot (V_f - V_i) \quad (\text{Forza} \times \text{Tempo} = \text{Massa} \times \text{variazione di Velocità})$$

in pratica una forza applicata per un dato tempo ad una certa massa produce una variazione definita della velocità nella direzione della forza (sono ambedue vettori). Derivando rispetto al tempo ed alla massa possiamo scrivere:

$$F \cdot dT = dM \cdot V \quad \text{o meglio} \quad F = V \cdot dM/dT$$

La quantità dM/dT è la massa d'acqua spostata ogni secondo, il flusso misurato in kg/sec, mentre V è la velocità assoluta che acquista questa massa d'acqua dopo il passaggio del battello, espressa come differenza tra la V_i (velocità iniziale) e V_f (velocità finale), ma dato che V_i è nulla (con mare calmo), lasciamo pure il simbolo V . Se chiamiamo S la superficie ortogonale alla direzione del moto, della proiezione della parte immersa dello specchio di poppa, cioè la sezione libera del solco di scia, abbiamo:

$$dM/dT = V_t \cdot S \cdot \rho \quad \text{quindi} \quad F = V \cdot V_t \cdot S \cdot \rho$$

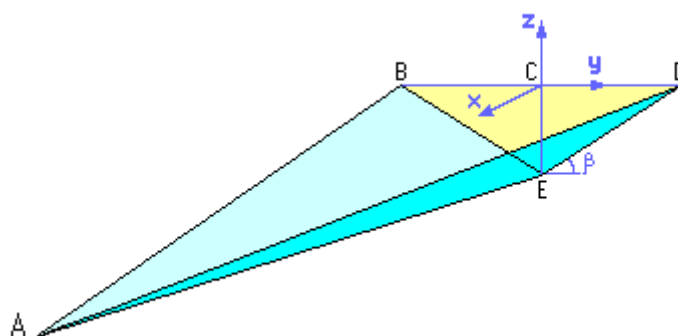
dove ρ è la densità dell'acqua (1030 kg/m³ se di mare). Vediamo ora apparire la Velocità (che è un vettore come F) sotto due forme: V_t è la velocità di traslazione dello scafo, mentre V è la velocità assoluta che acquista l'acqua dopo il passaggio del battello. La direzione di questo vettore V è ortogonale alle facce del diedro formato dalla chiglia in assetto di planata, quindi principalmente verso il basso (V_z) con una componente laterale (V_y) minore (~1/5 di V_z) ed una componente verso l'avanti (V_x) ancora minore (~1/12) con i valori degli angoli di planata e di chiglia (α e β) che si trovano normalmente.

Come si calcola questa V ? Si cercano le proiezioni della V_t , che è orizzontale, sulle normali alle facce del diedro che taglia l'acqua, nel senso che, in assenza di viscosità (trascurata) la velocità impressa all'acqua è quella normale (ortogonale) alla superficie che spinge via l'acqua come un pistone, ignorando lo scorrimento (parallelo alla detta superficie), quindi nel senso perpendicolare alla faccia (del lato del diedro). La scia è formata da due prismi triangolari accostati e simmetrici che acquistano due velocità simmetriche che hanno in comune la componente orizzontale (in avanti), la componente verticale (in basso) e opposte componenti laterali, che quindi hanno risultante nulla, ma richiedono comunque un'energia che calcoleremo. La componente verticale V_z ci dà la spinta prodotta dalla sustentazione dinamica, che aggiunta alla spinta di galleggiamento data dal volume del tetraedro (che si può valutare a circa il 40% del totale) deve controbilanciare il peso, mentre la componente orizzontale V_x ci dà la parte dinamica della spinta che il motore deve fornire per mantenere la velocità di avanzamento, la parte idrostatica, dovuta alla mancanza di pressione sullo specchio di poppa, sarà calcolata dopo. Le velocità laterali V_y hanno la loro importanza, perché sono un'altra parte della spinta totale necessaria per l'avanzamento, in pratica la spinta necessaria è la somma vettoriale della spinta longitudinale dovuta a V_x e della spinta laterale dovuta a V_y , con la spinta laterale che predomina ed è proporzionale all'angolo di chiglia, in pratica nel calcolo basta sostituire la componente V_x con la somma vettoriale V_{xy} . Il rapporto V_z/V_x tra i valori della componente verticale e della componente longitudinale ci dà

l'efficienza teorica, mentre il rapporto V_z/V_{xy} ci da l'efficienza reale. Questa efficienza viene diminuita dalla parte orizzontale della spinta statica ed aumentata dalla parte verticale di detta spinta, cioè la spinta di galleggiamento (residua) che comunque non sono trascurabili.

5/2/8 - Lezione 2

Proviamo a completare il calcolo. Facciamo riferimento alla figura seguente che può essere interpretata come una vista dall'alto o anche come una vista dal basso, tenendo sempre presente che il triangolo BAD è orizzontale essendo l'intersezione dello scafo con la superficie dell'acqua. Per caratterizzare le componenti di V bisogna conoscere due angoli: l'angolo (o semiangolo) di chiglia (β nella figura), che normalmente è di 17-19° per i battelli ad elica e tra 11° e 16° per i battelli ad idrogetto, e l'angolo di assetto o di planata α (C-Â-E tra l'orizzontale C-A e la linea di chiglia A-E, che è lo spigolo del diedro in celeste chiaro/scuro nella figura).



A questo punto si nota una correlazione tra la posizione del baricentro (che consideriamo fissa perché al variare di α si sposta solo verticalmente) ed un'altra grandezza che ci permette di calcolare poi l'angolo di planata: la cosiddetta "Lunghezza Equivalente" L (appunto lo spigolo A-E, che ha la particolarità di rimanere di lunghezza circa costante al variare della velocità, cambiando solo l'angolo α ed il segmento C-E, cioè l'immersione). Questo segmento A-E è la lunghezza della parte immersa dello scafo (opera viva) in regime di planata, che è naturalmente minore di quella in regime di dislocamento quando la prua è completamente immersa.

Considerando la spinta di galleggiamento dovuta al volume della piramide immersa, troviamo che il baricentro, o meglio il centro di pressione, è situato ad **un quarto** dell'altezza della A-E della piramide. Ricordiamo qui che tutti gli angoli con vertice in E, vale a dire B-Ê-A, C-Ê-A e D-Ê-A sono retti, vale a dire che lo specchio di poppa B-D-E è ortogonale alla linea di chiglia A-E (non è sempre vero, ma è un'approssimazione minima, come vedremo dopo, che ci semplifica i calcoli). Se facciamo l'ipotesi che la pressione dinamica sia uniforme, i centri di pressione delle due facce triangolari del diedro di chiglia (ABE e ADE) sono situati ad **un terzo** di questa lunghezza da poppa per il semplice fatto che queste facce sono triangoli, e la lunghezza equivalente A-E è la loro altezza con alcune piccole approssimazioni. Le forze statiche e dinamiche sono quindi applicate a punti diversi, ma molto vicini, alle basse velocità prevale la spinta statica di galleggiamento, più arretrata, mentre alle alte velocità prevale la spinta dinamica della

planata, più avanzata. Questo spostamento della risultante verso l'avanti crea una coppia che tende ad alzare la prua e contrasta quindi il diminuire di α con l'aumentare della velocità, ma l'effetto è comunque trascurabile.

Questa è una prima approssimazione: la differenza tra $\frac{1}{4}$ e $\frac{1}{3}$ è $\frac{1}{12}$, e dato che la variazione delle due forze è circa del 50%, lo spostamento del punto è di meno di $\frac{1}{24}$ della lunghezza equivalente A-E. Ignorando questo spostamento facciamo una prima approssimazione.

Una seconda approssimazione è che consideriamo lo specchio di poppa (BDE, in giallo nella figura) ortogonale alla linea di chiglia (A-E), così abbiamo il diedro di chiglia formato da due triangoli rettangoli; dal regime di planata poi si deduce che non c'è contatto tra l'acqua e lo specchio di poppa, semplificando ulteriormente il calcolo: la lunghezza equivalente diventa la parte immersa dello spigolo di chiglia. La conclusione è che al variare della velocità varia solo l'angolo di assetto α ($C\hat{A}E$), aumentando così la superficie esposta al flusso con la maggiore immersione della poppa alle minori velocità, ma non varia la lunghezza equivalente, che assume la caratteristica di una costante di progetto della barca, pari a tre volte la distanza del baricentro dallo specchio di poppa. Nei nostri calcoli assumeremo la lunghezza equivalente pari a $\frac{3}{4}$ della lunghezza fuori tutto. Si ha inoltre l'equilibrio perché le forze di sustentazione dinamica che agiscono sui triangoli del diedro di chiglia sono applicate ai centri di pressione dei due triangoli, situati ad un terzo delle loro mediane verso poppa (baricentri delle aree).

L'angolo di assetto dipende dalla posizione del baricentro (che come già detto consideriamo invariabile rispetto alla chiglia) e dalla velocità, ed è compreso fra i 5° e i 7° per gli scafi a elica (bisogna tener conto del momento appoppante della spinta delle eliche che è al di sotto del centro di pressione) e tra i 4° ed i 6° per quelli a idrogetto (che hanno una spinta più in alto, vicina al centro di pressione).

Cerchiamo ora di calcolare questo angolo di assetto in funzione della velocità di traslazione V_t . Cominciamo col calcolare la Sezione Maestra S che corrisponde alla parte immersa dello specchio di poppa (BDE in figura), detto p = pescaggio (C-E) e W la larghezza (B-D) e β l'angolo di chiglia (CBE) si ha:

$$S = p \cdot W/2 \qquad W = 2 \cdot p / \tan \beta \qquad S = p \cdot p / \tan \beta$$

Sostituendo:

$$dM/dT = V_t \cdot S \cdot \rho \qquad dM/dT = V_t \cdot \rho \cdot p^2 / \tan \beta$$

Per calcolare la forza verticale dobbiamo calcolare la componente verticale della velocità assoluta impressa all'acqua dal passaggio del natante. Evidentemente questa componente è:

$$F = V \cdot dM/dT \qquad V = V_t \cdot \sin \alpha \qquad F = V_t \cdot \sin \alpha \cdot V_t \cdot \rho \cdot p^2 / \tan \beta$$

$$F = \rho \cdot V_t^2 \cdot \sin \alpha \cdot p^2 / \tan \beta \quad p = L \cdot \sin \alpha \qquad F_s = \rho \cdot V_t^2 \cdot L^2 \cdot \sin^3 \alpha / \tan \beta$$

Abbiamo quindi il legame tra la Velocità di Traslazione V_t , il seno dell'angolo di assetto α e la forza F_s di sustentazione dinamica. Se operasse solo questa forza essa dovrebbe eguagliare il peso dell'imbarcazione e quindi il prodotto $V_t^2 \cdot \sin^3 \alpha$ sarebbe una costante,

ed il legame tra le due grandezze un'iperbole retta, nel senso che $\text{sen}^3 \alpha$ deve aumentare al diminuire di Vt^2 . Ma non è così, c'è un'altra forza che contribuisce al sostentamento ed è la spinta di galleggiamento che dalla quiete, ove è l'unica forza agente, è diminuita all'aumentare della velocità di traslazione Vt ed del conseguente sollevamento dello scafo, ma non è ancora trascurabile. Il suo punto di applicazione differisce da quello della forza precedente, che si trova ad $1/3$ della Lunghezza Equivalente A-E, perché corrisponde al baricentro del volume della piramide, che sappiamo essere ad $1/4$ dell'altezza, cioè della stessa Lunghezza Equivalente. Calcoliamo anche questa forza. Essa è data dal peso del volume di acqua spostato, quindi dal prodotto del volume immerso per la densità dell'acqua per l'accelerazione di gravità:

$$F = M \cdot g$$

$$F = \rho \cdot g \cdot \text{Volume}$$

$$F = \rho \cdot g \cdot L \cdot S/3$$

$$F = \rho \cdot g \cdot L \cdot p^2 / \tan \beta$$

$$p = L \cdot \text{sen} \alpha$$

$$Fg = \rho \cdot g \cdot L^3 \cdot \text{sen}^2 \alpha / \tan \beta$$

Notiamo per inciso che la Fs è proporzionale al cubo di $\text{sen} \alpha$ mentre Fg è proporzionale al quadrato di questo seno. Sommiamo ora le due forze Fs ed Fg ed eguagliamole al Peso totale, trascurando il fatto che hanno due punti di applicazione diversi ($1/3$ e $1/4$ di L), ma molto vicini ($1/12$ di L), e quindi la risultante avrà anch'essa un punto di applicazione intermedio non molto distante da quello che abbiamo supposto, otteniamo allora:

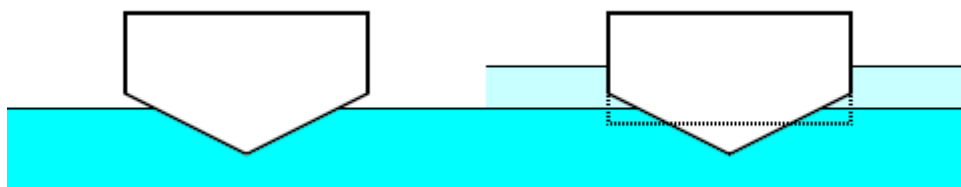
$$P = Fs + Fg$$

$$P = \rho \cdot Vt^2 \cdot L^2 \cdot \text{sen}^3 \alpha / \tan \beta + \rho \cdot g \cdot L^3 \cdot \text{sen}^2 \alpha / \tan \beta$$

$$P = \rho \cdot L^2 \cdot (Vt^2 \cdot \text{sen} \alpha + g \cdot L) \cdot \text{sen}^2 \alpha / \tan \beta$$

Una rapida verifica dimensionale ci dice che l'equazione è corretta, essendo P una forza, ρ una densità, g una accelerazione ed L una lunghezza. Come si vede l'equazione è di terzo grado in $\text{sen} \alpha$, manca del termine di primo grado e gli altri termini di grado superiore sono tutti positivi. Ne consegue che la funzione è monotona crescente e la derivata prima è nulla all'origine. Per Vt nulla la funzione si riduce alla sola spinta di galleggiamento che è di secondo grado. L'equazione di terzo grado è risolvibile con i metodi iterativi o in alcuni casi col sistema di quattro o, come in questo caso, tre equazioni dei coefficienti, ma possiamo ancora approfittare di alcune approssimazioni per ridurla al secondo grado.

Vediamo come possiamo fare per semplificare il problema: abbiamo detto che la parte immersa dello scafo è un tetraedro, ma questo si verifica solo alle alte velocità, mentre alle medie velocità ed al decollo la parte di scafo immersa è un prisma pentagonale; la figura seguente illustra le due situazioni:



La parte sinistra si riferisce al calcolo precedente relativo alle alte velocità, quella destra mostra la situazione alle basse velocità, quando lo scafo è maggiormente immerso perché l'idrosostentazione dinamica è minore.

In questo caso, dato che la parte triangolare è totalmente immersa, si può semplificare la forma della parte triangolare dello scafo ad una rettangolare, un semplice parallelepipedo (cuneo con angolo di chiglia $\beta = 0^\circ$) di sezione equivalente (larghezza W e profondità $pc/2$ dove pc è il pescaggio critico pari all'altezza CE del triangolo BDE), con la superficie che sostituisce il diedro di chiglia parallela allo spigolo che abbiamo eliminato. Con questa nuova configurazione si calcola correttamente la stessa componente verticale V_z della velocità impressa all'acqua, mentre sparisce la componente laterale V_y . Dovendo calcolare l'equilibrio delle forze verticali questa perdita non ci interessa. In poche parole le due forme sono equivalenti per le forze nel piano di simmetria, quelle verticali (sostentazione dinamica e galleggiamento) e quelle orizzontali, ma nel senso del moto (resistenza). Poiché a noi interessa solo trovare l'angolo α di assetto, possiamo prima risolvere questo problema, e poi, con l'angolo di assetto trovato, ricalcolare tutte le componenti del flusso e della velocità dell'acqua con la forma giusta (triangolare).

Per prima cosa dobbiamo trovare la velocità critica alla quale abbiamo la transizione tra le due geometrie, triangolare e pentagonale. Rovesciamo l'equazione precedente prendendo V_t come incognita e l'angolo di assetto come quantità nota, visto che il pescaggio pc è l'altezza $C-E$ della parte triangolare dello specchio di poppa. Detto pc il pescaggio critico, con semplici passaggi abbiamo:

$$P = \rho \cdot V_t^2 \cdot L^2 \cdot \sin^3 \alpha / \tan \beta + \rho \cdot g \cdot L^3 \cdot \sin^2 \alpha / \tan \beta$$

$$\rho \cdot V_t^2 \cdot L^2 \cdot \sin^3 \alpha / \tan \beta = P - \rho \cdot g \cdot L^3 \cdot \sin^2 \alpha / \tan \beta$$

$$V_t^2 \cdot L^2 \cdot \sin^3 \alpha = P \cdot \tan \beta / \rho - g \cdot L^3 \cdot \sin^2 \alpha$$

$$V_t^2 = P \cdot \tan \beta / (\rho \cdot L^2 \cdot \sin^3 \alpha) - g \cdot L / \sin \alpha \quad \text{ma} \quad \sin \alpha = pc / L$$

$$V_t^2 = P \cdot L \cdot \tan \beta / (\rho \cdot pc^3) - g \cdot L^2 / pc \quad \text{ma} \quad P = M \cdot g$$

$$V_t^2 = g \cdot L \cdot (M \cdot \tan \beta / (\rho \cdot pc^2) - L) / pc$$

Essendo tutte le quantità a destra note, si ricava la V_{tc} (Velocità di traslazione critica). La verifica dimensionale ci dice che l'equazione è corretta. Sostituendo i valori di una imbarcazione conosciuta otteniamo per l'AB68 33 m/sec (64 kt), che significa che ci troviamo sempre nel caso di destra, anche alla velocità massima, cioè lo scafo non uscirà mai a sufficienza dall'acqua da essere considerato un semplice diedro.

Riscriviamo l'equazione precedente in $\sin(\alpha)$ e vediamo cosa otteniamo. Per fare questo ripetiamo il ragionamento già fatto usando però la nuova geometria, quella del cuneo. Dobbiamo calcolare l'angolo di assetto in funzione della velocità di traslazione V_t . Cominciamo col calcolare la Sezione Maestra S che corrisponde alla parte immersa dello specchio di poppa (BDE in figura), detto p = pescaggio (maggiore del pescaggio critico pc) e W la larghezza ($B-D$) si ha:

$$S = (p - pc/2) \cdot W \quad \text{dove} \quad W = \text{larghezza}$$

Sostituendo:

$$dM/dT = V_t \cdot S \cdot \rho$$

$$dM/dT = V_t \cdot \rho \cdot (p - pc/2) \cdot W$$

Per calcolare la forza verticale dobbiamo calcolare la componente verticale della velocità assoluta impressa all'acqua dal passaggio del natante. Evidentemente questa componente è:

$$F = V \cdot dM/dT$$

$$V = V_t \cdot \sin \alpha$$

$$F = V_t \cdot \sin \alpha \cdot V_t \cdot \rho \cdot (p - pc/2) \cdot W$$

$$F = \rho \cdot V_t^2 \cdot \sin \alpha \cdot (p - pc/2) \cdot W$$

$$\sin \alpha = p/L$$

$$F_s = \rho \cdot V_t^2 \cdot p/L \cdot (p - pc/2) \cdot W$$

$$F_s = \rho \cdot V_t^2 \cdot p \cdot (p - pc/2) \cdot W/L$$

Abbiamo quindi il legame tra la Velocità di Traslazione V_t , il seno dell'angolo di assetto α e la forza F_s di sustentazione dinamica.

Ricaviamo di nuovo la forza di galleggiamento calcolata in funzione di p nell'ipotesi del cuneo rettangolare la cui lunghezza non è più L , ma L_r , ridotta rispetto allo spigolo di chiglia che si è sollevato nell'appiattimento della carena:

$$F = M \cdot g$$

$$F = \rho \cdot g \cdot \text{Volume}$$

$$F = \rho \cdot g \cdot L_r \cdot S/2$$

$$S = (p - pc/2) \cdot W$$

$$L_r = L (p - pc/2)/p$$

$$F_g = \rho \cdot g \cdot L \cdot (p - pc/2) (p - pc/2) \cdot W/2p$$

$$F_g = \rho \cdot g \cdot L \cdot (p^2 - pc \cdot p + pc^2/4) \cdot W/2p$$

Il termine $2p$ sotto la linea di frazione ci darà molto fastidio, aumentando di grado l'equazione finale. Vediamo di eliminarlo. Moltiplicando per $2p$ abbiamo una equazione di secondo grado:

$$2F_g \cdot p = \rho \cdot g \cdot L \cdot W \cdot (p^2 - pc \cdot p + pc^2/4)$$

Notiamo però che il rapporto pc/p si avvicina ad $1/2$ e quindi il termine tra parentesi ha tre componenti di peso diverso:

$$(p^2 - pc \cdot p + pc^2/4) = (1 - 1/2 + 1/4/4) = (1/2 + 1/16) = (1 + 1/8)$$

Potremmo tranquillamente trascurarlo per avere un'equazione di primo grado accettando un errore di $1/9$, ma possiamo fare meglio, sostituiamo solo in quel termine pc con $p/2$ (molto vicino al valore previsto) ed otteniamo:

$$F_g = \rho \cdot g \cdot L \cdot (p^2 - pc \cdot p + p^2/16) \cdot W/2p$$

semplificando per p otteniamo la nuova F_g approssimata:

$$F_g = \rho \cdot g \cdot L \cdot (p - pc + p/16) \cdot W/2$$

$$F_g = \rho \cdot g \cdot L \cdot (17p/16 - pc) \cdot W/2$$

che è un'equazione di primo grado. Questo significa che al variare di p la forza di galleggiamento varia in modo quasi-lineare, come la forza di Archimede, essendo minime le componenti di grado superiore. Questo è in accordo con la pratica e con l'intuizione.

Per spiegare meglio questo punto immaginiamo di immergere progressivamente tre oggetti nell'acqua:

1. un parallelepipedo secondo uno dei suoi assi, la spinta crescerà linearmente essendo costante l'area di intersezione fra il solido e la superficie;
2. un cono (prisma triangolare) cominciando da uno spigolo, la spinta crescerà secondo il quadrato della quota essendo l'area di intersezione con la superficie linearmente crescente;
3. una piramide cominciando dalla punta, la spinta crescerà secondo il cubo della quota essendo l'area di intersezione con la superficie crescente con il quadrato.

È logico che se immergiamo il parallelepipedo ruotandolo attorno ad un asse orizzontale partendo con una faccia coincidente con la superficie, almeno all'inizio la superficie di intersezione con la superficie libera del liquido sarà costante, e quindi ricadiamo nel primo caso.

Sommiamo ora le due forze ed eguagliamole al peso totale P , otteniamo allora:

$$P = F_s + F_g$$

$$P = \rho \cdot V_t^2 \cdot p \cdot (p - pc/2) \cdot W/L + \rho \cdot g \cdot L \cdot (17p/16 - pc) \cdot W/2$$

$$P = \rho \cdot W \cdot (V_t^2 \cdot p \cdot (p - pc/2)/L + g \cdot L \cdot (17p/16 - pc)/2)$$

Ordinando per il grado di p :

$$P = \rho \cdot W \cdot (V_t^2 \cdot p^2/L - V_t^2 \cdot p \cdot pc/2L + g \cdot L \cdot 17p/32 - g \cdot L \cdot pc/2)$$

otteniamo l'equazione di secondo grado:

$$V_t^2 \cdot p^2/L - V_t^2 \cdot p \cdot pc/2L + g \cdot L \cdot 17p/32 - g \cdot L \cdot pc/2 - P/\rho W = 0$$

con coefficienti a , b , c :

$$a = V_t^2/L$$

$$b = g \cdot L \cdot 17/32 - V_t^2 \cdot pc/2L$$

$$c = -g \cdot L \cdot pc/2 - P/\rho W$$

Il coefficiente c (termine noto) negativo ci dice che le soluzioni sono reali e che una è positiva.

Come si vede l'equazione risultante è di secondo grado in p , cosa che semplifica molto la ricerca della soluzione.

26/3/7 - Lezione 3

Facciamo un calcolo d'esempio su dati reali.

Prendiamo il modello AB68 da 68 piedi della AB Yachts con una velocità massima di 50 nodi (25 m/sec) ed un peso di 24 t. Stimiamo per ora la spinta di galleggiamento ridotta a 9.2 t a causa del sollevamento dello scafo in planata, quindi la spinta dinamica di sostentamento necessaria è di 14.8 t. Il pescaggio in planata è 0.82 m e la sezione maestra della parte immersa è di 2.65 mq (il calcolo è esposto in questo [foglio elettronico](#)), quindi la massa d'acqua spostata è:

$$dM/dT = Vt \cdot S \cdot \rho = 25.7 \cdot 2.65 \cdot 1030 = 70148 \text{ kg/sec}$$

mentre la sua velocità assoluta è:

$$F = V_z \cdot dM/dT \quad V_z = F/(dM/dT) = 14800 \cdot 9.81/70148 = 2.07 \text{ m/sec}$$

dove F è il peso e V_z la velocità verticale dell'acqua. Conclusione: per sostenere il peso di 14.8 tonnellate bisogna accelerare verso il basso ad una velocità di 2.07 m/sec una quantità di acqua di 70 t al secondo. Corollario: se la barca cadesse, in un secondo raggiungerebbe la velocità di 9.81 m/sec, ma non cade perché spinge (fa cadere al suo posto) una massa di 70 t ad una velocità di 2.07 m/sec. Notiamo che $14.8 \cdot 9.81 = 70 \cdot 2.07 = 145$ è un prodotto costante. Applichiamo l'equazione dell'impulso alle due condizioni:

$$M_1 \cdot V_1 = M_2 \cdot V_2 \quad 70 \cdot 2.07 = M_2 \cdot 9.81$$

$$M_2 = 70 \cdot 2.07 / 9.81 = 14.77$$

Da questa verifica si ottiene la massa sostenibile con la sola sostentazione dinamica, pari a 14.8 t, inferiore alle 24 t totali, le 9.2 t mancanti sono sostenute dalla spinta idrostatica residua dovuta alla parte immersa dello scafo, circa un terzo del peso totale perché la parte immersa è un terzo del volume della parte immersa in condizioni statiche, cioè in dislocamento.

Al diminuire della velocità, per mantenere la spinta verticale totale, devono aumentare l'angolo di assetto ed il pescaggio, e quindi la quantità d'acqua spostata (dinamicamente e staticamente). Se vogliamo calcolare la spinta necessaria per sostenere questa andatura (50 kt = 25.7 m/sec) possiamo calcolare le componenti orizzontali della velocità impressa all'acqua, che sono:

$$V_x = V_z \cdot \tan \alpha \quad \text{sen } \alpha = \text{pescaggio/lunghezza eq.} = \text{sen (angolo d'assetto)}$$

$$V_y = V_z \cdot \tan \beta \quad \tan \beta = \text{tan (angolo di chiglia)}$$

sostituendo i dati (pescaggio = 0.82 m, lunghezza eq. = 68 piedi $\cdot \frac{3}{4}$, angolo di chiglia = 13°) e approssimando la tangente al seno dell'angolo d'assetto (perché è piccolo) otteniamo:

$$V_x = 2.07 \cdot 0.82 / (68 \cdot 0.305 \cdot 0.75) = 2.07 \cdot 0.82 / 15.55 = 0.1086 \text{ m/sec}$$

$$V_y = 2.07 \cdot \tan(\pi \cdot 13/180) = 2.07 \cdot 0.231 = 0.478 \text{ m/sec}$$

facendo la somma vettoriale si ottiene:

$$V_{xy} = 0.490 \text{ m/sec} \quad \text{efficienza} = V_z/V_{xy} = 2.07/0.49 = 4.22$$

Ora possiamo calcolare la spinta necessaria, facendo un primo tentativo col metodo dell'impulso. Riprendiamo un'equazione precedente e calcoliamo la forza per spostare l'acqua in direzione orizzontale:

$$F = V_{xy} \cdot dM/dT \quad F = 0.49 \cdot 70148 = 34372 \text{ N} = 3.5 \text{ ton}$$

La spinta dei motori deve essere di circa 3.5 tonnellate a cui si devono aggiungere 0.66 t per la spinta idrostatica mancante sullo specchio di poppa immerso, e la potenza necessaria è:

$$P = F \cdot V_t = (3500 + 660) \cdot 25.7 = 4160 \cdot 25.7 = 106912 \text{ Kgm/sec}$$

$$P = 106655/75 = 1425 \text{ CV}$$

Considerando un rendimento di 0.70 delle eliche si ottiene una potenza richiesta di $1425/0.7 = 2036 \text{ CV}$, in buon accordo con la potenza installata di 3000 CV. Proviamo a verificare l'efficienza della spinta idrodinamica:

$$E_d = \text{Peso}/\text{Spinta} = 14800/3500 = \mathbf{4.22}$$

mentre per la componente idrostatica si ha:

$$E_s = \text{Peso}/\text{Spinta} = 9200/660 = \mathbf{13.94}$$

sommando le due componenti si ottiene l'efficienza totale:

$$E_t = \text{Peso}/\text{Spinta} = (14800+9200)/(3500+660) = 24000/4160 = 5.77$$

Calcoliamo di nuovo la spinta dei motori, ma questa volta usiamo l'energia totale. Abbiamo già calcolato le componenti della velocità assoluta impressa all'acqua:

$$V_z = 2.07 \text{ m/sec} \quad V_{xy} = 0.49 \text{ m/sec}$$

Si deduce che:

$$V^2 = V_z^2 + V_{xy}^2 \quad V^2 = 4.525 \quad V = 2.127 \text{ m/sec}$$

Ricordando che l'energia impressa all'acqua è $E = mV^2/2$ e che la potenza spesa è $P = dE/dt$:

$$E = mV^2/2 \quad P = dE/dt \quad P = (dm/dt)V^2/2$$

Sostituendo i valori:

$$P = 70148 \cdot 4.5/2 \quad P = 157833 \text{ kgm/sec} \quad P = 2104 \text{ CV}$$

Considerando di nuovo un rendimento di 0.70 delle eliche si ottiene una potenza richiesta di $2104/0.7 = 3006$ CV, in perfetto accordo con la potenza installata. La differenza fra i due metodi di calcolo dipende dalle approssimazioni e dalle semplificazioni del primo metodo (dell'impulso), mentre il secondo metodo (dell'energia totale) usa i cosiddetti "integrali primi" calcolando il bilancio dell'energia ceduta all'ambiente esterno (la scia).

Quanto detto fin'ora riguarda gli scafi plananti.

26/3/7 - Lezione 4

Gli aliscafi, per semplificare il controllo dell'altezza sull'acqua, cioè per ottenere una stabilità intrinseca indipendente dalle manovre del pilota, usano un'ala denominata SPW (*Surface-Piercing Wing*), un'ala immersa con le estremità affioranti e sporgenti da un terzo fino a circa metà della apertura totale (*piercing* = perforante, nel senso che l'ala = *wing* ad un punto della sua larghezza interseca la superficie = *surface* dell'acqua). In questo modo all'aumento del carico l'ala si immerge di più aumentando la portanza, con un effetto (dinamico) simile al principio di Archimede (statico), la stessa cosa avviene quando si riduce la velocità. Quando l'ala incontra un'onda si ha un improvviso aumento di immersione e quindi di portanza, questa volta indesiderato, che tende a sollevare lo scafo, l'opposto avviene nel cavo dell'onda, innescando oscillazioni verticali e conseguente beccheggio per la non contemporaneità degli effetti sulle ali di prua e di poppa.

Il primo problema, il beccheggio, è particolarmente pericoloso per la conseguente variazione dell'incidenza delle ali, che amplificando via via l'oscillazione arriva fino a far immergere la carena (*cresting*) o alla completa uscita delle ali dall'acqua (*jumping*).

Queste oscillazioni, ancorché eccitate dalle onde, che a 30-50 nodi vengono percorse in una frazione di secondo, hanno un periodo che dipende dalla massa del battello e dal coefficiente elastico della portanza (la quale varia con l'immersione). Questo coefficiente elastico è minore che nel caso della navigazione in dislocamento (che è circa un equivalente del peso su metà¹ del pescaggio), ed ha un valore di circa la metà o un terzo, col risultato che il pescaggio *virtuale* è di 2~3 volte quello in dislocamento ed il periodo di beccheggio è altrettanto più lungo.

Tale condizione è in un certo senso favorevole, simulando in un aliscafo da 100 tonnellate il comportamento di una nave da 1000 tonnellate (la massa è proporzionale al cubo del pescaggio) e quindi un rapporto di 2~3 nel pescaggio *virtuale* equivale ad un rapporto da 8 a 27 fra i coefficienti elastici e quindi tra i periodi di oscillazione. Resta comunque il fatto che il beccheggio, e anche il rollio se le onde sono prese in diagonale,² rimane notevole, anche se con periodo più lungo. Il pescaggio virtuale dell'aliscafo, che corrisponde all'estensione verticale della "V" dell'ala, maggiore che nel caso del dislocamento, serve a mantenere lo scafo lontano dalle creste d'onda (in senso aeronautico: lo scafo sorvola le onde ad una quota definita), ma spesso questa quota viene annullata dal beccheggio sommato all'altezza d'onda (*cresting*). Le oscillazioni dello scafo possono essere ridotte da apposite superfici mobili (alettoni e flap, come sugli aerei) azionate dal pilota, o da un sistema automatico che normalmente non è presente

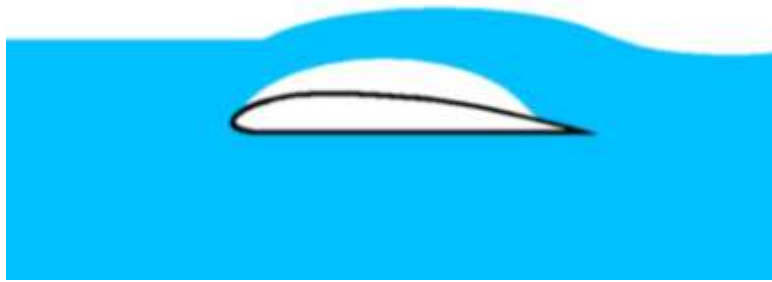
¹⁾ Si consideri lo scafo come un prisma triangolare, con volume equivalente ad un parallelepipedo di altezza metà.

²⁾ In questo caso per una rotta diversa dall'angolo ottimo rispetto alle onde, bisogna fare i bordi come a vela in andatura di bolina, riducendo l'efficienza (ed aumentando il tempo di percorrenza) col coseno (cosecante) del loro semiangolo.

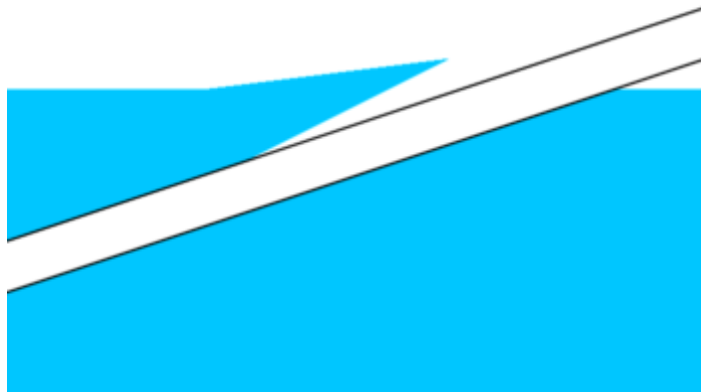
sugli aliscafi commerciali, ma su quelli militari. Questo è il primo problema: sostanzialmente la non eliminazione delle oscillazioni, ma solo l'aumento del periodo e dell'ampiezza.

Il secondo problema è forse quello fondamentale della SPW, la *cavitazione*. Se si osserva l'andamento delle pressioni lungo il profilo dell'ala, si vede che l'estradosso (la parte superiore) è soggetta ad una depressione, che è anche maggiore della sovrappressione sull'intradosso (la faccia inferiore), determinando circa il 70% della portanza totale. Questa depressione (che gli americani chiamano più propriamente *suction*, suzione) può arrivare ad essere maggiore della pressione idrostatica dovuta alla profondità (0,1 Atm/m) e non può esistere alla superficie determinando una cavità (riempita d'aria se in comunicazione con l'atmosfera) che altera il profilo dell'estradosso diminuendo l'efficienza ed annullando la depressione.

Questo fenomeno (cavitazione secondaria) si presenta a qualunque velocità, estendendosi in profondità fino al punto di equilibrio della depressione (che aumenta con la velocità) con la pressione idrostatica. La cavitazione si presenta anche su di un'ala totalmente immersa e davanti alle pale delle eliche, quando la depressione supera la somma della pressione atmosferica e della pressione idrostatica dovuta alla profondità, meno la tensione di vapore dell'acqua. Questa è la cavitazione propriamente detta o primaria, dove la pressione all'interno della bolla, priva d'aria, è la tensione di vapore dell'acqua (vicina al vuoto a temperatura ambiente), mentre nella cavitazione secondaria la pressione nella bolla, riempita d'aria, è quella atmosferica. La differenza tra le due pressioni è dovuta al fatto che nella primaria non c'è comunicazione con l'atmosfera; se l'ala fosse cava e non a tenuta stagna, si svuoterebbe d'acqua e convoglierebbe aria attraverso i piloni di sostegno verso la depressione dell'estradosso, dando origine alla cavitazione secondaria che si presenta molto prima, a velocità minori rispetto alla cavitazione primaria. La cavitazione primaria comincia a presentarsi solo per velocità molto elevate (50~80 nodi) nei profili normali, ed ancora più elevate (>100 nodi) per i profili cosiddetti "non cavitanti" (essenzialmente parabolici dove l'estradosso è una parabola ad asse verticale, in modo che la cavitazione non abbia un punto debole del profilo dove iniziare, ma si verifichi contemporaneamente su tutta la corda alla più alta velocità possibile, cioè la depressione è costante lungo la corda alare come costante è la derivata seconda). La cavitazione primaria non è affatto un problema per un'ala immersa, ma lo è, ed anche grave quando diventa secondaria, per una SPW che emerge dall'acqua: nel punto di emersione basta che ci sia una leggera depressione che il flusso liquido si stacca dall'estradosso, ed una lingua d'aria si propaga in profondità fin dove c'è depressione (*foil broaching* = cavitazione secondaria o da insufflamento), annullando completamente l'effetto di suzione, e quindi la portanza della superficie interessata dell'estradosso, che contribuisce per il 70% al totale. Se il distacco si propagasse a tutta la superficie superiore la portanza si ridurrebbe al 30%, cosa che per fortuna non si verifica alle basse velocità. Nella figura seguente si vede l'effetto della cavitazione secondaria, notare l'onda di superficie che contribuisce alla perdita di energia. Questa onda in assenza di cavitazione sarebbe minore, essendo dovuta solo allo spessore dell'ala, e diviene trascurabile all'aumentare della profondità dell'ala stessa.

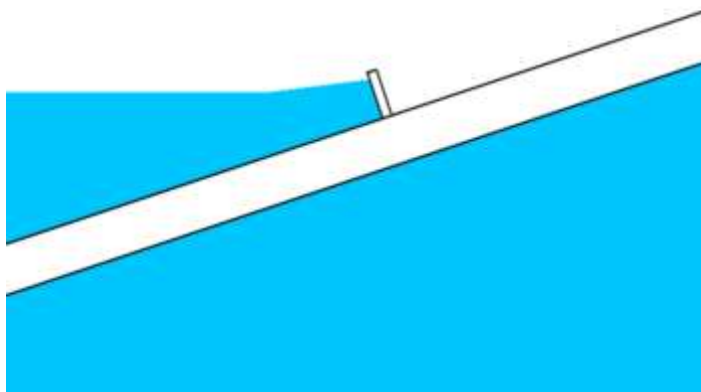


Questa è una visione laterale del fenomeno che in una proiezione frontale si presenta come nella figura seguente:

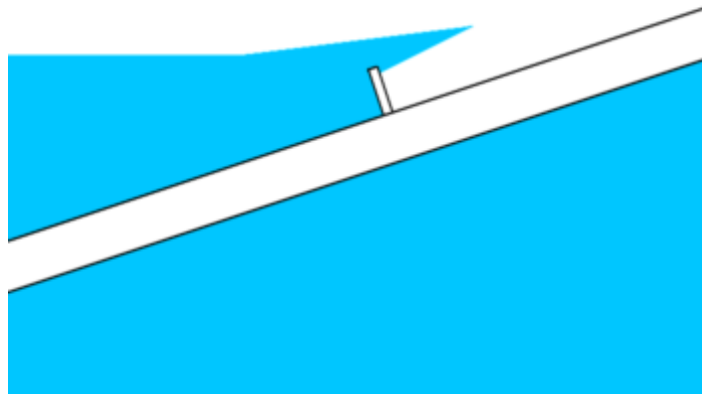


ove si vede il cuneo di aria a pressione atmosferica aspirato dal distacco per inerzia del fluido dall'estradosso, ed il suo sollevamento in un'onda che assorbe energia disperdendola nella scia. Si vede anche che lo spessore di aria diminuisce all'aumentare della profondità, cioè della pressione idrostatica, che contrasta il fenomeno.

Questo effetto può essere limitato, nelle sezioni d'ala più vicine alla superficie, da alette (*fences* o *stop winglets*) che funzionano come setti di arresto ortogonali di altezza comparabile allo spessore del profilo, come nella figura seguente:

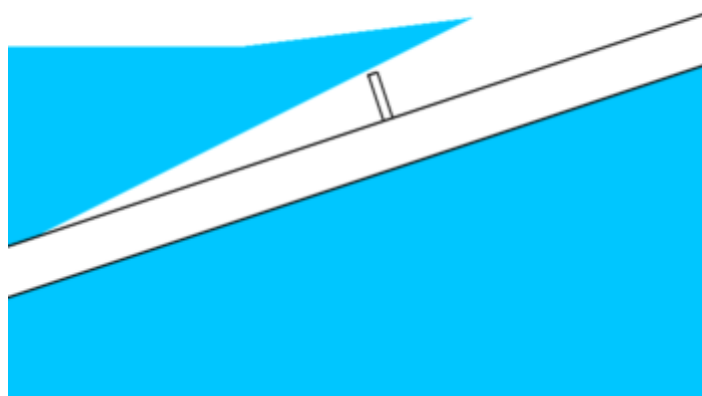


che, bloccano l'ingresso dell'aria nella zona a valle e impediscono la formazione dell'onda nella zona a monte. Quando queste alette si immergono si comportano come nella figura seguente:

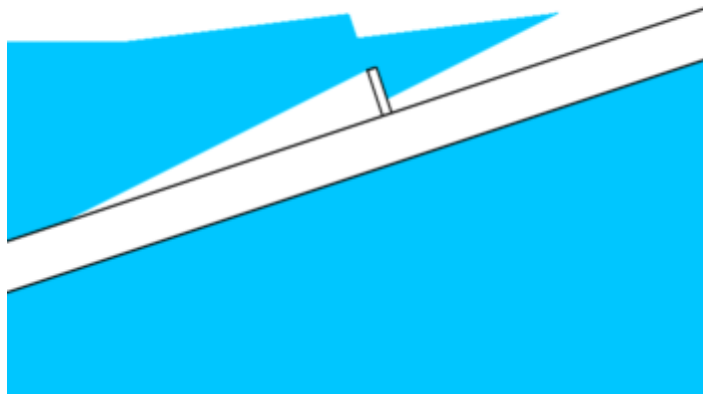


ove si vede che lo strato di fluido a valle (più profondo) dell'aletta rimane a contatto con l'estradosso dell'ala per mancanza d'aria, ripristinando la portanza, mentre nulla cambia nella parte a monte dove l'aria continua a penetrare senza ostacoli formando un'onda di scia.

Queste alette limitano, ma non eliminano il fenomeno, aggiungendo ulteriore resistenza idrodinamica. Esse sono efficaci fino ad una certa velocità di progetto, al di sopra della quale lo spessore dello strato d'aria di cavitazione le supera e si ha un istantaneo riversamento d'aria nella parte a valle dell'aletta con una diminuzione brusca della portanza, come si vede nella figura seguente:

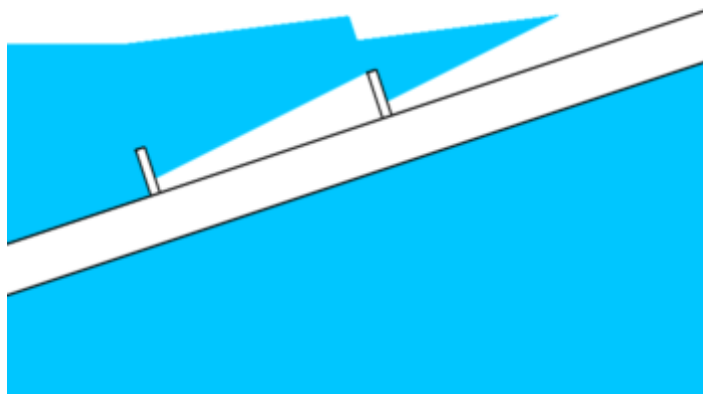


In questo caso, dovuto anche all'aumento di livello per un'onda o anche allo sprofondamento per il beccheggio del mezzo, l'effetto dell'aletta si annulla completamente. Al ripristino delle condizioni iniziali come si vede nella figura seguente:



l'aria imprigionata a valle dell'aletta continua i suoi effetti dannosi, con la assenza di depressione, anzi con una compressione pari al dislivello del fluido in corrispondenza dell'aletta, che riduce ulteriormente la portanza, e anche con la formazione di una seconda onda a valle della prima.

Tutti questi fenomeni che si verificano in sequenza in parti diverse delle ali (che sono due o tre, ma possono essere di più) rendono l'andamento della portanza con la velocità, le onde ed il beccheggio, una funzione discontinua non reversibile. L'effetto è quello di una automobile che corre sui sassi. Questo fenomeno di traboccamento rende necessario altri insiemi di alette più interne e profonde, come si vede nella figura seguente:



L'effetto della seconda aletta è comunque marginale, ci può essere un riversamento d'aria a valle anche di questa, con conseguente formazione di una terza onda. Anche le seconde alette hanno una velocità di progetto che, anche se più elevata delle prime, quando viene superata porta ad un secondo riversamento d'aria, e così via, tanto che se si osserva questo tipo di ala (SPW) in bacino di carenaggio la si trova irta di alette e profili vari con conseguenti resistenze passive. Alla fine il processo di cavitazione non è più graduale, ma discontinuo, determinando salti di portanza che eccitano sia il beccheggio che il rollio, ed anche l'imbardata se si presentano in modo asimmetrico. In definitiva la portanza diventa imprevedibile, anche in acque calme con onde ridotte. Il pilotaggio degli aliscafi con ali SPW somiglia a quello degli aerei in presenza di turbolenza, ove l'impegno richiesto al pilota è gravoso, a meno di non adottare un pilota automatico.

In conclusione il secondo problema limita sostanzialmente la velocità degli aliscafi con disegno SPW. La cavitazione riduce la portanza, diminuisce l'efficienza e quindi produce un aumento sostanziale della resistenza, con un fenomeno simile al "muro del suono" che incontrano gli aeroplani.

Il terzo problema, la *curvatura* dell'ala, ha effetto sulla efficienza. La forma dell'ala SPW non è rettilinea, e per questo la spinta portante non si somma in modo scalare, ma in modo vettoriale (si crea un poligono dei vettori di area non nulla), dando una risultante minore della massima possibile, mentre la resistenza si somma in modo pseudo-scalare (poligono dei vettori di area nulla), rimanendo massima. L'efficienza ne viene diminuita proporzionalmente al coseno dell'angolo medio che l'ala forma con la superficie dell'acqua. Questo problema è puramente matematico e non c'è né soluzione né una via per aggirarlo o ridurlo, se non facendo l'ala a tratti orizzontali e rettilinei (a scaletta, ma rendendola più fragile) o usando piani orizzontali multipli e immergendo solo quelli inferiori (vedi il [Meteor](#), uno degli [aliscafi russi](#)); ambedue le soluzioni pongono più problemi rispetto al disegno della SPW di quanti non ne risolvano. Infatti due profili vicini (con distanza inferiore alla corda alare) si influenzano negativamente l'un l'altro diminuendo la portanza ed aumentando la resistenza. Una spiegazione semplice e intuitiva per questo fenomeno: la velocità sull'estradosso deve essere superiore a quella sull'intradosso, ma nello spazio fra due ali vicine questa differenza si attenua a spese di vortici cilindrici con asse parallelo all'apertura alare, che comunque assorbono energia, che va perduta.



C'è anche un quarto problema, minore perché si presenta solo in virata, ma comunque importantissimo per il comfort dei passeggeri. Si tratta del rollio indotto dalla virata (una rotazione attorno all'asse longitudinale). Nella navigazione in dislocamento la forza centrifuga inclina lo scafo verso l'esterno perché il baricentro è più alto del centro di pressione, che si sposta all'esterno con la rotazione impedendo il rovesciamento, come si vede nella foto a sinistra, nella quale è visibile l'orizzonte che serve da riferimento, e anche in

[questo filmato](#).

Per questa ragione nessuna nave ha una sezione immersa di forma semicilindrica che renderebbe il centro di pressione incapace di spostarsi. Questo effetto farebbe scivolare di lato un bicchiere sul tavolo e farebbe inclinare la superficie del vino verso l'esterno della virata fino a versarlo o a far scivolare il bicchiere giù dal tavolo. Nelle grandi navi questo effetto è impercettibile a causa delle (relativamente) basse velocità e del grande raggio di virata, mentre sulle navi veloci (per esempio le corvette o i caccia antisom) l'inclinazione è notevole, e sarebbe per niente confortevole per i passeggeri fino a rendere quasi impossibile restare in piedi, e per questo navi con queste velocità e manovrabilità sono riservate ai militari. La stessa cosa avviene sugli aliscafi ed è anche più accentuata a causa della maggiore altezza del baricentro, tanto che è raccomandato di stare seduti come in aereo o in autobus o reggersi ai corrimano.

Il fenomeno è inverso sulle carene plananti che, come si vede nella foto di destra, e in [questo filmato](#) si inclinano verso la parte interna della virata come gli aerei, perché il loro centro di pressione non si sposta apprezzabilmente dal piano mediano, e quindi la virata è una manovra più complessa, come negli aeroplani dove la virata con la “pallina al centro” è un segno dell’abilità del pilota,³ manovra guidata dalle eliche e dai timoni che spingono la chiglia e la poppa verso l’esterno da una quota sotto il centro di pressione. Quindi un bicchiere di vino su un tavolo rimarrebbe al suo posto senza tendenza a scivolare giù dal tavolo, ed il livello del vino resterebbe parallelo alla superficie del tavolo stesso (salvo poi a saltare per aria a causa degli urti con le onde).



Sugli aliscafi dotati di ala SPW si potrebbe fare una manovra simile, ma l’ala esterna uscirebbe quasi totalmente dall’acqua diminuendo la portanza, non compensabile con l’alettone esterno che sarebbe pure emerso, mentre l’ala interna finirebbe totalmente immersa dando portanza maggiore all’interno, da contrastare con controalettone interno; in questa situazione manca totalmente il coefficiente elastico della portanza lato interno, ed il mantenimento della stabilità resta affidato solo al pilota. Questa situazione critica porterebbe facilmente al rovesciamento per sprofondamento dell’ala interna, perciò questa manovra non viene mai nemmeno tentata, facendo solo virate larghissime. Normalmente il pilota interviene per contrastare la pendenza verso l’esterno, mantenendo tutti e due gli alettoni immersi, con il risultato nel migliore dei casi di una virata che in gergo aeronautico è chiamata “piatta”, cioè il ponte del battello resta parallelo alla superficie marina. In questo caso il bicchiere di vino sul tavolo tende a scivolare e il vino a salire verso l’esterno della virata, un po’ meno per la mancanza di inclinazione verso l’esterno, ma un po’ di più per la maggiore forza centrifuga dovuta alla maggiore velocità. Per questa ragione le virate sugli aliscafi normali vengono evitate in sostentazione idrodinamica, oppure vengono affrontate con raggio di curvatura molto grande, mentre le virate più strette vengono fatte in dislocamento, quando sono realmente necessarie per entrare nel porto e accostare al molo.



Sugli aliscafi ad ala totalmente immersa è necessario che la spinta idrodinamica dovuta alla portanza, normalmente verticale, si inclini verso l’interno per contrastare la forza centrifuga. Per ottenere ciò tutto lo scafo, che è solidale con l’ala, deve inclinarsi verso l’interno della virata, come si può vedere nella foto di sinistra che ritrae il PHM-3 Taurus in virata destra con sullo sfondo il waterfront di Seattle. Il pilota deve quindi impostare una manovra di rollio verso l’interno della virata,

³) La “pallina” è uno strumento simile alla livella che indica se il piano alare è perpendicolare alla risultante della forza di gravità e della forza centrifuga.

contrastando il rollio verso l'esterno naturalmente indotto dalla virata stessa. È la stessa manovra che si deve fare sugli aeroplani. Se ci fosse un pendolo sul natante, durante la virata dovrebbe rimanere ortogonale al ponte. Dalla precisione di questa manovra si può vedere l'abilità di guida del pilota. Naturalmente un bicchiere pieno su un tavolo appoggiato sul ponte di questo tipo di aliscafo non sarebbe disturbato durante la virata.

27/3/7 - Lezione 5

Una parola sull'efficienza: in mare come in cielo la rotta più corta è la linea retta (in realtà è la rotta *ortodromica*, quella che segue il cerchio massimo terrestre) tra i due punti, di partenza e di arrivo, e quindi le virate in mare aperto sono inutili, oltre che dannose per l'efficienza, a meno che non ci sia un ostacolo da aggirare, come un'isola o una secca. Chi vira in mare aperto lo fa perché ha sbagliato rotta.

Per sintetizzare, i principali difetti delle ali SPW sono:

1. il minore coefficiente elastico della portanza tende ad amplificare le oscillazioni
2. la cavitazione secondaria rende variabile in modo aleatorio la portanza
3. la curvatura dell'ala produce spinte non verticali
4. il rollio inverso (verso l'esterno) indotto dalla virata

Per risolvere questi quattro problemi proviamo una lista di rimedi:

1. eliminare il coefficiente elastico della portanza
2. eliminare la cavitazione secondaria (il contatto con l'aria)
3. eliminare la curvatura dell'ala
4. eliminare il rollio indotto dalla virata immobilizzando il centro di pressione

Sembra semplicissimo. Basta riuscire a realizzare queste quattro condizioni. Proviamo ad espanderle una ad una:

Per eliminare il coefficiente elastico della portanza è necessario che questa non sia variabile con la profondità (quota). Togliendo la parte emergente dell'ala questa condizione è soddisfatta.

Per eliminare la cavitazione secondaria o da insufflamento è necessario che l'estradosso del profilo alare non venga mai in contatto con l'aria. Mantenere tutto l'estradosso sempre immerso.

Eliminare la curvatura significa un'ala rettilinea, ma non basta: la spinta deve essere verticale, quindi l'ala sarà anche orizzontale, oltre che rettilinea.

Il centro di pressione è il baricentro della parte sommersa, immobilizzarlo rispetto alla struttura equivale ad un'ala totalmente sommersa (la cui parte immersa non varia).

Le quattro soluzioni puntano tutte alla stessa configurazione: un'ala rettilinea orizzontale totalmente sommersa. A questo punto abbiamo tre domande a cui rispondere:

Questa configurazione è possibile?

Se è possibile, è stata già realizzata?

Se ha avuto dei problemi, come sono stati risolti?

Andiamo per ordine.

Alla prima domanda la risposta è positiva, e viene dagli studi di Konstantin I. Matveev, ma fa sorgere un altro problema: la portanza di un'ala totalmente immersa non cambia apprezzabilmente con la profondità, quindi per stabilizzare la quota bisogna usare un altro metodo, possibilmente automatico, con l'uso di alettoni o con la variazione di incidenza dell'ala. In realtà se l'ala è abbastanza vicina alla superficie (meno di una corda alare) c'è una modesta variazione con la quota, come scoperto da Matveev, perché la depressione sull'estradosso tende a diminuire con lo spessore del flusso d'acqua residuo. Intuitivamente: se l'ala scorre sulla superficie marina con l'intradosso, lasciando asciutto l'estradosso, la portanza prodotta da questo non ci sarà, e mancherà il 70% della portanza totale. I risultati di Matveev ci dicono che a partire dalla profondità di una corda alare con l'innalzamento dell'ala la portanza diminuisce dapprima lentamente e poi velocemente, con una funzione di forma parabolica dal 100% al 30%. Il calcolo della portanza al variare della profondità è disponibile in questo [foglio Excel](#).

Alla seconda domanda la risposta è ancora positiva, esistono le seguenti realizzazioni militari:

1961	PCH-1 High Point	local
1966	PGH-2 Tucumcari	local
1973	Pegasus PHM class	local
1974	classe P42x Sparviero	local

Esistono anche realizzazioni civili:

1961	Little Squirt	local
1981	Boeing Jetfoil	local
2003	Superfoil 40	local

Di queste la prima (Little Squirt) è molto interessante, perché è un battello sperimentale di soli 6 metri.

Esiste anche una realizzazione sportiva: l'[hydrofoil](#) surfboard di [Laird Hamilton](#) che è una tavola da surf con un'ala al di sotto che la solleva dall'acqua, diminuendo l'attrito, aumentando la stabilità e la facilità di controllo, e infine anche la velocità. Un breve filmato di 3 minuti tratto da "Passaggio a Nord-Ovest" di Alberto Angela del 15/3/2008 è disponibile qui in formato [mpeg](#)⁴ o in formato [dvr-ms](#) (130-140 Mb). Questa tavola da surf ci mostra che non c'è limite inferiore al progetto di un'ala per idrosostentazione dinamica, come anche il "Little Squirt" ci ha indicato, mentre vedremo che c'è un limite superiore.

⁴) Può essere necessario installare un codec su Windows Media Player per decifrare il formato mpeg per dvd

Alla terza domanda ci sono varie risposte: prima di tutto come è stato risolto il problema del controllo dell'assetto? Nel caso del Little Squirt con un sensore acustico per la profondità, derivato dall'ecoscandaglio, ma rivolto verso la superficie invece che verso il basso, con un sistema elettronico di controllo, e la cosa è comprensibile trattandosi di un esperimento della Boeing con in vista le applicazioni militari. Quindi questa tecnologia passa sulle realizzazioni militari, con la necessità di un sistema di controllo basato su un calcolatore. Le applicazioni civili seguono lo stesso percorso, quando la complessità e il costo sono giustificati dalla dimensione dell'oggetto. Il problema della stabilità dell'ala completamente sommersa era stato già affrontato da [Hanns Schertel](#) negli anni '30.

Un sistema di controllo elettro-meccanico o elettronico sembra la soluzione ideale, ma bisogna considerare due fattori principali: il costo e l'affidabilità.

Il costo di un sistema complesso come quello elettro-meccanico o elettronico è considerevole rispetto ad un sistema puramente meccanico o idro-meccanico, senza considerare la manutenzione dei circuiti elettronici che è problematica per un mezzo che deve viaggiare in mare, mentre la manutenzione di un sistema di controllo idraulico o meccanico è più semplice, tanto che può essere fatta a bordo.

L'affidabilità è forse il fattore fondamentale quando ci si trova in mare, lontano dalla costa. Per questo i sistemi elettrici, che fanno uso di contatti, sono molto fragili in un ambiente aggressivo come quello dell'acqua salata, e necessitano di connettori professionali ermetici molto costosi, se non addirittura della saldatura di tutti i cavi che si trovano in ambiente non protetto, mentre i circuiti delicati, come quelli dei calcolatori, devono stare in un ambiente stagno, isolato dall'atmosfera e dall'acqua, con conseguenti problemi di raffreddamento. Al contrario un sistema mecano-idraulico è molto più semplice ed affidabile, ed è facile da mantenere proprio per la sua semplicità. Henry Ford parlando del suo *Modello "T"* diceva: "Quello che non c'è non si rompe", quindi quanto più è semplice una macchina, tanto più è affidabile. Inoltre l'affidabilità influisce pesantemente sul costo.

Nella seconda parte di questa trattazione vedremo nei particolari vari sistemi di controllo automatico dell'assetto delle ali immerse, dai più semplici, totalmente meccanici con meno parti mobili, a quelli più complessi di tipo idro-meccanico. Rimanderemo ad un altro corso invece i sistemi elettro-idraulici, e quelli assistiti da calcolatore.

6/10/8 - Lezione 6

L'ala. È un oggetto la cui invenzione ha permesso al genere umano un salto di qualità nel controllo delle forze naturali, salto ancora maggiore dell'invenzione della ruota nei primi millenni di civiltà. Questo oggetto, o meglio attrezzo, meraviglioso, è giunto molto tardi, solo cento anni fa, ma ha trasformato la nostra vita in modo incredibile.

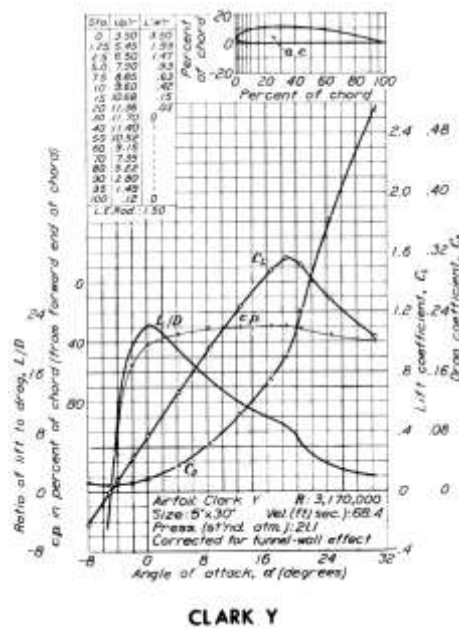
Leonardo ha a lungo studiato il funzionamento delle ali degli uccelli, e ne ha sfiorato la comprensione. Se invece di costruire strade e ponti in Valdarno fosse stato incaricato di fare il ponte di Calafuria, sul mare, solo osservando il volo dei gabbiani avrebbe subito capito che l'ala fissa era la soluzione, invece di intestardirsi sull'ala battente.

L'ala fissa non richiede molta energia per volare, proprio perché è fissa. In volo planato basta sacrificare un po' di quota per andare avanti. È così che gli alianti volano, senza bisogno di motore, basta una debole corrente ascendente per compensare la loro discesa e

tenerli in volo per un tempo indefinito. La quota perduta per avanzare è una misura dell'efficienza dell'ala.

Efficienza. Il punto cruciale è proprio questo. Abbiamo visto che le carene plananti possono raggiungere un'efficienza di 10, ma più spesso è di meno, intorno a 5. L'ala in aria, con il suo restare sospesa, senza contatto con altri corpi, dà immediatamente la sensazione di efficienza; sembra che nessuno sforzo sia necessario per sostenerla, che nessun attrito le impedisca di avanzare, che il suo volo sia lontano da sudore e polvere. A parte le sensazioni, più o meno reali, l'efficienza delle ali degli aerei è come minimo 20, il doppio esatto del massimo possibile alle carene plananti, se poi esaminiamo i profili alari adottati dagli alianti, si passa a 30÷50, con alcuni profili speciali, detti laminari, si possono raggiungere valori di 60÷80. È evidente che l'ala permette il salto di un intero ordine di grandezza: da 10 a 100. Abbiamo parlato per ora dell'ala aerea. Se consideriamo l'ala immersa in acqua le cose cambiano, ed anche in modo favorevole, in quanto i fattori di scala concorrono a ridurre le dimensioni dell'ala a parità di carico e di velocità. La ragione principale di questo fenomeno è che la densità dell'aria in condizioni standard (0 °C, 1 Bar) è di 1.3 Kg/m³, quindi molto bassa, mentre quella dell'acqua è di 1000 Kg/m³, più di 700 volte superiore. Questo fatto dà alle ali marine un enorme vantaggio, e spiega perché è stato così difficile volare nell'aria, anzi siamo di fronte al paradosso che le ali marine avrebbero dovuto nascere prima delle ali aeree.

Vediamo un po' di dati: prendiamo un manuale delle sezioni alari più comuni, per esempio l'*Handbook of Airfoil Sections for Light Aircraft* di M.S.Rice, i cui frontespizi sono raffigurati qui sotto, insieme alla pagina riguardante uno dei profili più comuni, il **Clark Y**. Le figure sono ingrandibili a dimensione di pagina.



Nella terza figura, che contiene i grafici per il profilo alare, si vede che ci sono quattro grafici che hanno in comune l'asse delle ascisse, che rappresenta l'angolo di assetto in gradi. In alto a destra c'è il disegno della sezione alare, in alto a sinistra le coppie di coordinate dei profili superiore e inferiore. In basso, sotto i grafici, ci sono le condizioni

di misura, compreso il numero di Reynolds (**R**: 3,170,000) che è molto alto, quindi in regime turbolento.

I quattro grafici sono:

1. C_L : Coefficiente di Portanza (Coefficient of Lift)
2. C_D : Coefficiente di Resistenza (Coefficient of Drag)
3. L/D: Efficienza (Lift/Drag ratio)
4. c.p.: Centro di Pressione (Center of Pressure)

La curva C_L è rettilinea crescente, la curva C_D ha una forma parabolica caratteristica, mentre la curva L/D ha un andamento a cuspide asimmetrica con un massimo ben definito. Quella che ci interessa di più è L/D cioè l'efficienza. Ingrandendo la figura si osserva che il massimo della curva raggiunge il valore di 22,5 in corrispondenza di un angolo di attacco di poco più di 0° (0.5°). Il valore dell'efficienza è rappresentato dall'asse delle ordinate più a sinistra, che va da -8 a 24, etichettato "Ratio of Lift to Drag, L/D" (rapporto della portanza sulla resistenza).

Alcune considerazioni sono qui necessarie: i dati riportati nel manuale si riferiscono all'aria, che come abbiamo visto è 700 volte meno densa dell'acqua, ne consegue che le superfici portanti saranno 700 volte più piccole, e questo ci porta un considerevole vantaggio nel progetto. Infatti le curve restano le stesse, a meno dell'influenza del numero di Reynolds, che nell'acqua è più basso, rendendo più vicini i regimi laminari. Nel caso di regime laminare la curva della resistenza cambia nel senso che la resistenza si abbassa considerevolmente, ma solo alle incidenze vicine allo zero, abbassando il vertice della parabola (la curva C_D) in una specie di "catino" a fondo piatto. A noi questo fenomeno interessa poco, perché il regime laminare si verifica solo per basse velocità, dove è necessaria una maggior incidenza, e quindi siamo comunque fuori della parte vantaggiosa della curva di resistenza.

Proviamo a calcolare la potenza necessaria per far avanzare un'ala con questo profilo, per l'AB68 da 24 tonnellate e 20 m di lunghezza fuori tutto (i dati sono in questo [foglio elettronico](#)). La velocità di crociera planante è di 46 nodi (circa 24 m/sec), noi useremo la stessa velocità per fare il confronto. Useremo l'incidenza di massima efficienza. Si ricava subito che con l'efficienza di 22.5 la spinta necessaria è $24000/22.5 = 1067$ Kg cioè circa una tonnellata. Ne deduciamo la potenza necessaria moltiplicando la spinta per la velocità: $24 * 1067 = 25600$ Kgm/sec da cui, dividendo per 75 si ottiene: $25600/75 = 341$ CV che è 1/9 della potenza installata (3100 CV). Normalmente la potenza richiesta per la velocità di crociera è da 2/3 a 3/4 della potenza massima, quindi nel caso più sfavorevole passiamo da 2/3 cioè 6/9 ad 1/9 della potenza, con un risparmio di 5/6. Naturalmente questo calcolo è fatto a braccio e non tiene conto della resistenza dei piloni di sostegno e delle bocche di presa d'acqua per gli idrogetti, che potrebbero far scendere il risparmio di energia da 5/6 a 3/4 portando la potenza necessaria a 500 CV.

Sembra troppo bello per essere vero, un risparmio di energia dal 75 all'85%! Probabilmente, tenendo conto solo dell'efficienza abbiamo trascurato qualche altro parametro che rende il progetto non ben dimensionato. Proviamo a calcolare le dimensioni di questa ala. La formula che dà la Portanza o la Resistenza è:

$$F = C \delta S V^2$$

$$C = C_L \text{ o } C_D$$

dove **F** è la forza (Portanza o Resistenza) in Newton (cioè Kgf · 9.8), **C_L** il coefficiente di Portanza (Lift), **C_D** il coefficiente di Resistenza (Drag), **δ** la densità del fluido in Kg/m³, **S** la superficie frontale (ortogonale al flusso) dell'ala in m², e **V** è la velocità in m/sec. Dal grafico del manuale si ricava C_L = 0.4 e C_D = 0.018 con un rapporto di circa 22. Di tutte queste grandezze solo la S è incognita, quindi sostituendo per la F il peso del battello, per C il valore 0.4, per V=24 la velocità di calcolo in m/sec, e per δ 1000 Kg/m³ si ottiene la sezione frontale:

$$S = F / (C \delta V^2)$$

$$S = 24000 \cdot 9.8 / (0.4 \cdot 1000 \cdot 24^2)$$

$$S = 24 \cdot 9.8 / (0.4 \cdot 24^2)$$

$$S = 9.8 / (0.4 \cdot 24)$$

$$S = 9.8 / 9.6 = 1.02 \text{ m}^2$$

abbiamo ottenuto poco più di un metro quadro di superficie frontale (sezione maestra) dell'ala. Dal grafico, sommando la seconda e terza colonna, si ottiene lo spessore massimo dell'ala pari a 11.7 % della corda, che ci dà la superficie totale dell'ala nel piano orizzontale che è pari a:

$$S_t = S \cdot 100 / 11.7$$

$$S_t = 102 / 11.7$$

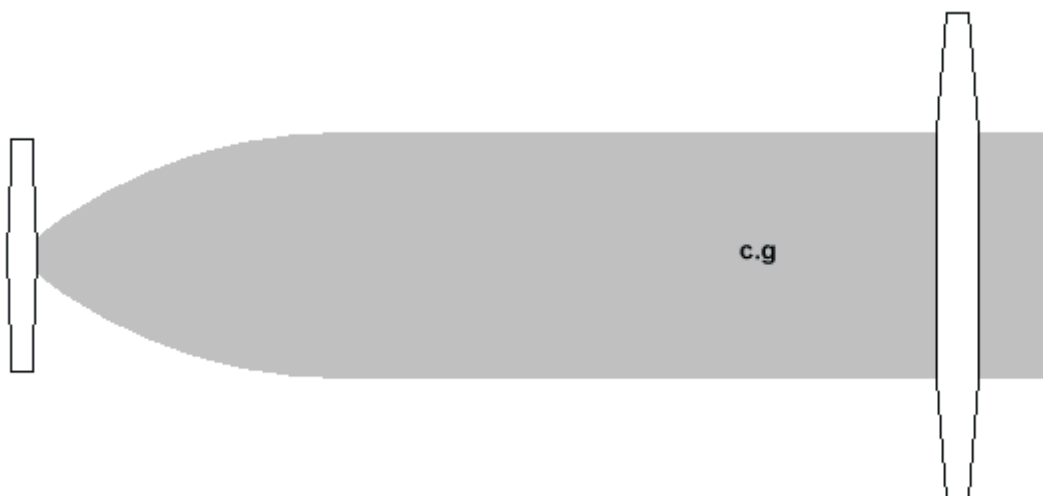
$$S_t = 8.72 \text{ m}^2$$

anche se sembrava troppo bello per essere vero, in effetti è vero, grazie al 1000 sotto il segno di frazione (la densità dell'acqua) otteniamo un valore inferiore ai nove metri quadri. La nostra barca (AB68) è lunga 20.7 m e larga 5 m, quindi ha una impronta sul mare di circa 100 mq che si riducono a 80 perché la forma della prua è affusolata. Quindi l'ala ha una superficie di poco più di un decimo della superficie totale vista dall'alto. Se l'ala è divisa in due sezioni di 1/5 a prora e di 4/5 a poppa, otteniamo 8.72 / 5 = 1.75 m² avanti e 6.97 m² dietro. Dato il rapporto 1/5 tra le superfici, l'ala posteriore deve essere posizionata in modo che il baricentro (c.g) si trovi a 4/5 della distanza fra i loro centri.



Se poi decidiamo per un fattore di allungamento (apertura/corda alare) delle ali di 10 (fattore medio in uso sugli aerei, mentre gli alianti usano 20÷30) otteniamo delle corde alari di 42 cm avanti e 83 cm dietro, ed una apertura alare di 4.2 m avanti e 8.3 m dietro,

con l'ala anteriore appena più stretta della larghezza del battello, e l'ala posteriore che si estende di 1.65 m da ogni lato oltre le murate.



Aggiungiamo un particolare al disegno in pianta delle ali: le due metà dell'ala anteriore e le parti sporgenti dallo scafo dell'ala posteriore sono dei trapezi con base minore la metà della base maggiore che è la corda alare calcolata. Per avere la stessa area del rettangolo equivalente l'altezza deve essere aumentata di $1/3$, quindi l'apertura dell'ala anteriore passa da 4.2 m a 5.6 m, e la parte sporgente ai lati dei montanti dell'ala posteriore da 1.65 m a 2.2 m. Per calcolare la Resistenza basta ricordare che in assetto di crociera ci troviamo nella situazione di massima efficienza e che quindi la Resistenza sarebbe 22 volte minore della Portanza, come già calcolato. Abbiamo usato il condizionale perché bisogna aggiungere altre resistenze.

1/12/8 - Lezione 7

La Resistenza. Ricordiamo che questa comprende non solo quella dell'ala, ma anche la parte immersa dei montanti di sostegno, e che quindi l'efficienza viene ridotta di conseguenza. Stabiliamo che il profilo dei montanti sia simile a quello dell'ala, ma simmetrico in modo da non avere reazioni laterali che disturbino l'equilibrio, e resistenza uguale a metà di una pari lunghezza di sezione alare. Abbiamo detto metà perché manca la resistenza indotta dalla portanza, che come abbiamo detto è nulla per la simmetria di forma, infatti sarebbe solo una forza laterale di disturbo. Osservando il [grafico](#) del coefficiente di resistenza C_D si vede che ha un andamento parabolico con valore di 0.02 all'incidenza di massima efficienza (circa 0°) e valore 0.01 al vertice della parabola (incidenza neutra), cioè all'incidenza di portanza nulla che coincide con quella di minima resistenza (circa -5°). Notiamo che dalla incidenza di massima efficienza a quella di minima resistenza quest'ultima si dimezza. Rendere il profilo simmetrico vuol dire spostare tutto il grafico di $+5^\circ$ per far coincidere l'incidenza neutra con l'incidenza nulla, invece che negativa come nel caso del nostro profilo, il Clark Y. Quindi per i montanti useremo un profilo Clark Y modificato per renderlo simmetrico. Se così non fosse avremmo la resistenza indotta dalla portanza, e questa portanza, se l'intradosso fosse rivolto all'interno, sarebbe verso l'esterno. Le due portanze quindi si annullerebbero con assetto laterale orizzontale, ma se l'assetto orizzontale fosse inclinato, la portanza del montante più immerso sarebbe maggiore, e tenderebbe a spingerlo verso l'esterno, diminuendo l'inclinazione laterale. L'effetto sarebbe di rendere tutto il meccanismo

autostabile, e sembrerebbe una caratteristica utile, ma vedremo poi che non vale la pena di rendere i comandi laterali più duri, in più pagando il prezzo di una maggiore resistenza. Per inclinare da un lato un oggetto di 24 tonnellate è più facile che serva un aiuto piuttosto che un contrasto. L'autostabilità la possiamo ottenere con mezzi più semplici e meno costosi in termini di energia, per esempio: degli alettoni rivolti verso l'interno normalmente non immersi in condizioni di crociera, che si immergono dalla parte che sprofonda e tendono a riportarla in fuori, questa soluzione ha costo energetico zero quando il sistema è in equilibrio.

Considerando una distanza del piano alare dalla chiglia di 1.6 m (l'altezza massima dell'onda scavalcabile) e quindi di una immersione media di 0.8 m dei montanti, con resistenza uguale a metà (la forma simmetrica del profilo elimina la resistenza indotta) di una pari lunghezza di sezione alare, è come aggiungere all'ala rettangolare equivalente tre sezioni da 0.4 m (0.8/2), una con corda di 42 cm all'ala anteriore, e due con corda di 83 cm all'ala posteriore. L'aumento percentuale di resistenza è $(4.2+0.4)/4.2 = 9.5\%$ avanti e $(8.3+0.8)/8.3 = 9.5\%$, che per caso (caso dovuto al fatto che la ripartizione dell'area alare avanti/dietro è ottimale) coincidono, quindi l'efficienza passa a $22/1.095 = 20$ che è ancora un valore molto conveniente, sempre il doppio della migliore carena planante.

La Portanza. A questo punto il progetto è ben delineato. L'ala non è troppo ingombrante. Ci resta da calcolare la velocità e l'incidenza di decollo, cioè la velocità alla quale lo scafo esce dall'acqua. Descriviamo, o meglio definiamo la situazione di “*decollo*” come quella in cui la metà del peso dello scafo viene sostenuta dalle ali, ed il rimanente dalla chiglia planante, che è ancora parzialmente immersa. Assumiamo per semplicità che l'assetto planante non vari al crescere della velocità, mentre in realtà passa da zero ad un massimo (circa 8°) e si stabilizza verso i 4° alla velocità di crociera. Il coefficiente C_L delle ali passa da 0.94 a 8° scendendo fino a circa 0.65 a 4°. In pratica però la presenza delle ali impedisce di raggiungere la massima incidenza di 8°, ma tende a mantenerla costante, poco sopra a 4° e poi a ridurla all'aumentare della velocità fino a che la chiglia sia perfettamente orizzontale, dato l'angolo di attacco delle ali, che noi avremo scelto coincidente con quello di massima efficienza (0.5°).

Il momento del decollo è il punto critico, ove la potenza richiesta è il massimo o molto vicino al massimo. In realtà dovremmo fare una serie di calcoli per varie percentuali di immersione dello scafo, calcolare le potenze richieste sia dallo scafo planante, sia dalle ali, ma confidiamo di approssimare al meglio con pochi passi. Ci basta trovare tre punti della curva di potenza con il punto centrale maggiore degli altri. Conoscendo il calcolo della potenza planante alle varie velocità e approssimando C_L ad una retta e C_D ad una parabola per calcolare Resistenza e Portanza delle ali, si può invece costruire la curva completa nel piano Velocità-Potenza e individuare il massimo, lavoro abbastanza gravoso, che per ora evitiamo.

Proviamo 30 nodi con la carena planante e 12 tonnellate di sustentazione, l'angolo di assetto è 4.1° e la potenza richiesta è 395 CV. Vediamo che fa l'ala:

$$F = C_L \delta S V^2 \qquad F = 0.65 \cdot 1000 \cdot 1.02 \cdot 15.4^2$$

$$F = 650 \cdot 1.02 \cdot 237.16 \qquad F = 157237 \text{ N}$$

dividendo per 9.8 si passa dai Newton ai Kg-forza e si ottiene 16 tonnellate. Ciò significa che a 30 nodi già le ali sostengono più della metà del peso. Riproviamo con 28 nodi ove la carena planante ha un assetto di 4° e richiede una potenza di 349 CV, allora l'ala:

$$F = C_L \delta S V^2 \qquad F = 0.65 \cdot 1000 \cdot 1.02 \cdot 14.4^2$$

$$F = 650 \cdot 1.02 \cdot 207.36 \qquad F = 137480 \text{ N}$$

dividendo per 9.8 si ottiene 14 tonnellate. Ripetendo con 26 nodi si ha l'assetto di 4.3° e la potenza di 304 cavalli, continuando con l'ala:

$$F = C_L \delta S V^2 \qquad F = 0.65 \cdot 1000 \cdot 1.02 \cdot 13.4^2$$

$$F = 650 \cdot 1.02 \cdot 179.56 \qquad F = 119048 \text{ N}$$

dividendo per 9.8 si ottiene 12 tonnellate. Calcoliamo ora la potenza assorbita dall'ala:

$$F = C_D \delta S V^2 \qquad F = 0.018 \cdot 1000 \cdot 1.02 \cdot 13.4^2$$

$$F = 18 \cdot 1.02 \cdot 179.56 \qquad F = 3297 \text{ N}$$

dividendo per 9.8 si ottiene 336 kgf. Moltiplicando per la velocità (13.4 m/sec) si ottengono 4500 Kgm, cioè 60 CV, notevolmente inferiori alla potenza per la carena planante. La potenza totale a 26 nodi è quindi 364 CV. Potremmo rifare i conti per il 40 % e il 60% di peso sostenuto dalle ali o la carena per verificare che c'è un massimo. A causa delle iterazioni è meglio utilizzare il foglio di calcolo. Per fare questo dobbiamo descrivere i coefficienti C_L e C_D con due funzioni che li approssimino al meglio nel campo degli assetti intorno ai 4°.

3/9/9 - Lezione 8

Il profilo Clark Y. A questo punto, in vista delle numerose iterazioni che dovremo fare per trovare l'equilibrio tra la portanza dello scafo e quella delle ali, dobbiamo automatizzare il calcolo dei coefficienti C_L e C_D del profilo Clark Y in funzione dell'angolo di assetto. Per questo osserviamo che nel nostro campo di lavoro, tra 0° e 4° di questo angolo, il coefficiente C_L somiglia moltissimo ad una retta, mentre il coefficiente C_D somiglia ad una parabola. Queste caratteristiche ci aiuteranno molto, semplificando i calcoli.

Per trovare la retta che rappresenta C_L prendiamo due punti dal grafico in corrispondenza dei valori di incidenza di 0° e di 4° che è la zona di lavoro: (0, 0.35) e (4, 0.65). La retta che passa per i due punti ha equazione:

$$y = b \cdot x + c \qquad b = (0.65 - 0.35)/4 \qquad c = 0.35$$

sostituiamo le coordinate dei punti ed otteniamo un sistema di 2 equazioni con 2 incognite **b** e **c**:

$$\begin{array}{ll} 0.35 = b \cdot 0 + c & 0.35 = c \\ 0.65 = b \cdot 4 + c & 0.65 = b \cdot 4 + 0.35 \end{array}$$

sottraendo la prima dalla seconda o anche sostituendo **c** nella seconda:

$$\begin{array}{lll} 0.3 = b \cdot 4 & b = 0.3/4 & b = 0.075 \\ y = 0.075 \cdot x + 0.35 & & \end{array}$$

ponendo **α** al posto di **x** e **C_L** al posto di **y** si ottiene l'equazione:

$$C_L = 0.075 \cdot \alpha + 0.35$$

sostituendo **x** con **α** che è l'angolo di assetto dell'ala.

Analogamente cerchiamo la parabola che rappresenta **C_D** prendendo 3 punti: (-8, 0.012), (0, 0.018) e (8, 0.064). La parabola che passa per questi tre punti ha equazione:

$$y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$$

anche questa volta sostituiamo le coordinate dei punti ed otteniamo un sistema di 3 equazioni con 3 incognite **a**, **b** e **c**:

$$\begin{array}{lll} 0.012 = a \cdot 64 - b \cdot 8 + c & y = 0.012 & x = -8 \\ 0.018 = c & y = 0.018 & x = 0 \\ 0.064 = a \cdot 64 + b \cdot 8 + c & y = 0.012 & x = 8 \end{array}$$

eliminiamo **c** ottenendo:

$$\begin{array}{l} -0.006 = a \cdot 64 - b \cdot 8 \\ 0.046 = a \cdot 64 + b \cdot 8 \end{array}$$

sommando le due equazioni per eliminare **b**:

$$0.040 = a \cdot 128 \quad a = 0.04/128 \quad a = 0.0003125$$

sostituendo **a** nella seconda:

$$0.046 = 0.04 \cdot 64/128 + b \cdot 8 \qquad 0.046 = 2.56/128 + b \cdot 8$$

$$b = (0.046 - 0.02)/8 \qquad b = 0.026/8 = 0.00325$$

ponendo α al posto di x e C_D al posto di y si ottiene l'equazione:

$$C_D = 0.0003125 \cdot \alpha^2 + 0.00325 \cdot \alpha + 0.018$$

I coefficienti vengono numeri molto piccoli e poco maneggevoli, ma questo dipende dal fatto che abbiamo usato per α i gradi invece dei radianti, come sarebbe stato più giusto dal punto di vista matematico. È invece meglio dal punto di vista pratico, visto che operiamo nel campo tra 0 e 4 gradi, che in radianti è da 0.00 a 0.07.

Facciamo ora lo studio della funzione. Verifichiamo prima l'asse della parabola:

$$x = -b/(2 \cdot a) = -0.00325/(2 \cdot 0.0003125) = -0.00325/0.000625 = -5$$

in buon accordo col grafico. Verifichiamo per $\alpha = 8$:

$$C_D = 0.0003125 \cdot 64 + 0.00325 \cdot 8 + 0.018$$

$$C_D = 0.020 + 0.026 + 0.018$$

$$C_D = 0.064$$

in ottimo accordo col grafico. Verifichiamo per $\alpha = -8$:

$$C_D = 0.0003125 \cdot 64 - 0.00325 \cdot 8 + 0.018$$

$$C_D = 0.020 - 0.026 + 0.018$$

$$C_D = 0.012$$

Di nuovo in ottimo accordo col grafico.

Ora che abbiamo l'espressione di C_L e C_D non ci resta che inserirla nel foglio dati. Riprendiamo la formula che ci dà Portanza e Resistenza:

$$F = C \delta S V^2 \qquad C = C_L \text{ o } C_D$$

e sostituiamo le grandezze ora note in funzione di α (angolo di assetto):

$$C_L = 0.075 \cdot \alpha + 0.35$$

$$C_D = 0.0003125 \cdot \alpha^2 + 0.00325 \cdot \alpha + 0.018$$

Dati S (superficie frontale dell'ala) = 1.02 mq, V (velocità di avanzamento) = 24 m/s, e δ (densità dell'acqua marina) = 1030 Kg/mc, calcoliamo ora la Portanza P :

$$P = C_L \delta S V^2 = (0.075 \cdot \alpha + 0.35) \cdot 1030 \cdot 1.02 \cdot 576$$

Come si vede l'unica incognita è α che rappresenta l'angolo di assetto dell'ala, mentre nel foglio dati abbiamo l'angolo di assetto della chiglia. La differenza tra i due angoli è l'angolo di attacco dell'ala, cioè la differenza tra il piano della corda alare ed il piano di chiglia. Per semplicità ammettiamo per ora che questo angolo di attacco sia nullo, e che quindi quando la chiglia è orizzontale (assetto di crociera) anche le ali siano orizzontali ($\alpha = 0$). Questa assunzione ci semplifica un po' il calcolo:

$$P = C_L \delta S V^2 = 0.35 \cdot 1030 \cdot 1.02 \cdot 576 = 357 \cdot 576 = 211800 \text{ Newton}$$

$$P = C_L \delta S V^2 = 211800/9.81 = 21590 \text{ Kgf} = 21.6 \text{ ton}$$

Alla velocità di 24 m/s la Portanza risultante è 21.6 tonnellate-forza, quindi inferiore alle 24 ton che è il peso dell'imbarcazione. Questo significa che l'assetto α non sarà nullo, ma leggermente positivo, oppure dobbiamo aumentare la sezione frontale dell'ala di un 10%, o, meglio ancora, scegliere un angolo di attacco leggermente positivo.

Siccome vogliamo privilegiare il comfort dei passeggeri, e per questo desideriamo che il ponte sia orizzontale in condizioni di crociera, optiamo per la seconda soluzione, che ha un costo in termini energetici, ma influenza positivamente (riduce) la velocità di decollo, oppure per la terza soluzione, che non costa nulla in termini di energia, ma influenzerà negativamente (aumentando) la velocità di decollo. Infatti l'angolo di assetto minore dello scafo darà un aiuto inferiore alla portanza, costringendo le ali ad un maggior carico. Ambedue le soluzioni comportano che alle velocità superiori a quella di crociera il ponte sia leggermente inclinato in avanti, con la prua più bassa della poppa; questo è un assetto inusuale, ma sarà usato raramente, e comunque migliora la visibilità del pilota, cosa che alle massime velocità non guasta, andando a vantaggio della sicurezza. L'assetto non orizzontale dello scafo riduce l'altezza d'onda accettabile, ma alla velocità massima il mare può essere più calmo, mentre in crociera è meglio che l'onda accettabile sia la massima. La velocità di decollo inferiore migliora la maneggevolezza e la facilità di decollo con onde maggiori. Ripetiamo che tutto deve essere calcolato per la velocità di crociera, che sarà usata il 95% del tempo di "volo" (quando l'imbarcazione è sulle ali).

Un'altra soluzione è di ricalcolare la Velocità, proviamo con 25.6 m/s:

$$P = C_L \delta S V^2 = 0.35 \cdot 1030 \cdot 1.02 \cdot 660 = 357 \cdot 660 = 233964 \text{ Newton}$$

$$P = C_L \delta S V^2 = 233964/9.81 = 23859 \text{ Kgf} = 24 \text{ ton}$$

Ricordiamoci che questa è la velocità per angolo di assetto nullo, mentre quella di crociera è con angolo di assetto 0.5° corrispondente alla massima efficienza.

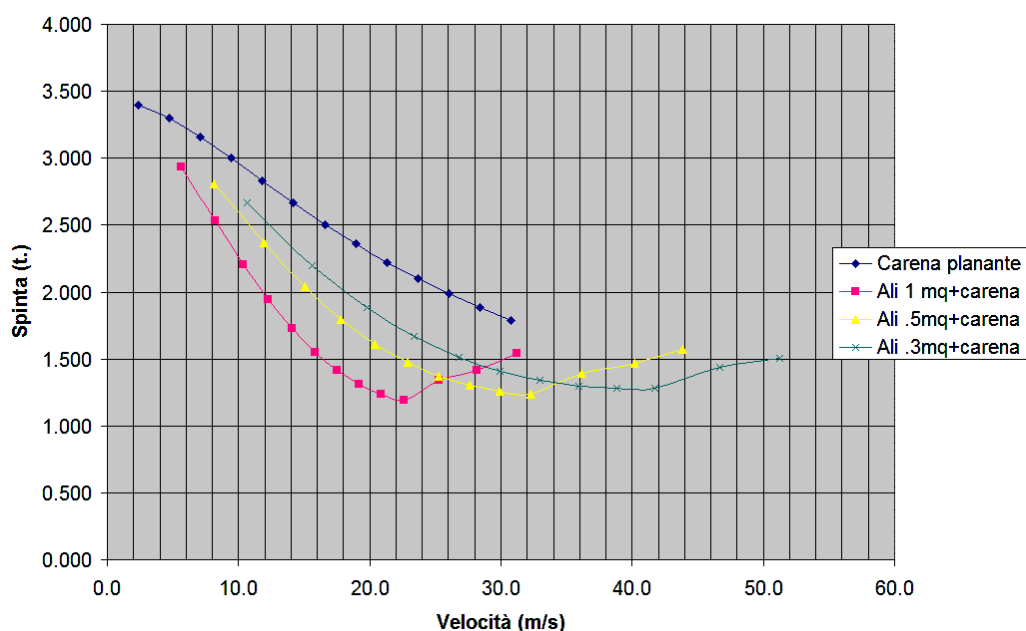
Infatti a noi interessa più che altro la potenza necessaria in crociera, usata per lunghi periodi, più che la potenza di decollo, usata per breve tempo, perché vedremo che la

potenza non è un problema, essendone queste imbarcazioni più che dotate perché calcolata per la carena planante che è meno efficiente delle ali.

5/9/9 - Lezione 9

Grafici. Dopo aver inserito questi altri dati nel foglio elettronico otteniamo i grafici della spinta necessaria in funzione della velocità, e della potenza corrispondente. Abbiamo calcolato quattro casi: la carena planante pura (senza ali), e tre casi ove la carena è provvista di ali con area frontale di 1, 0.5 e 0.3 mq, cioè ali progressivamente più piccole. Dato che il profilo Clark Y ha uno spessore massimo di 0.117 corde alari, ha quindi una sottigliezza di $1/0.117 = 8.5$, la superficie alare totale è nei tre casi di 8.5, 4.25 e 2.55 mq. È stato tenuto conto della resistenza dei montanti verticali, cioè i piedi che sostengono le ali, considerando il fatto che la loro parte immersa è di lunghezza fissa (0.8 m) e che influiscono relativamente di più nel caso delle ali più piccole, e di meno con le ali più grandi.

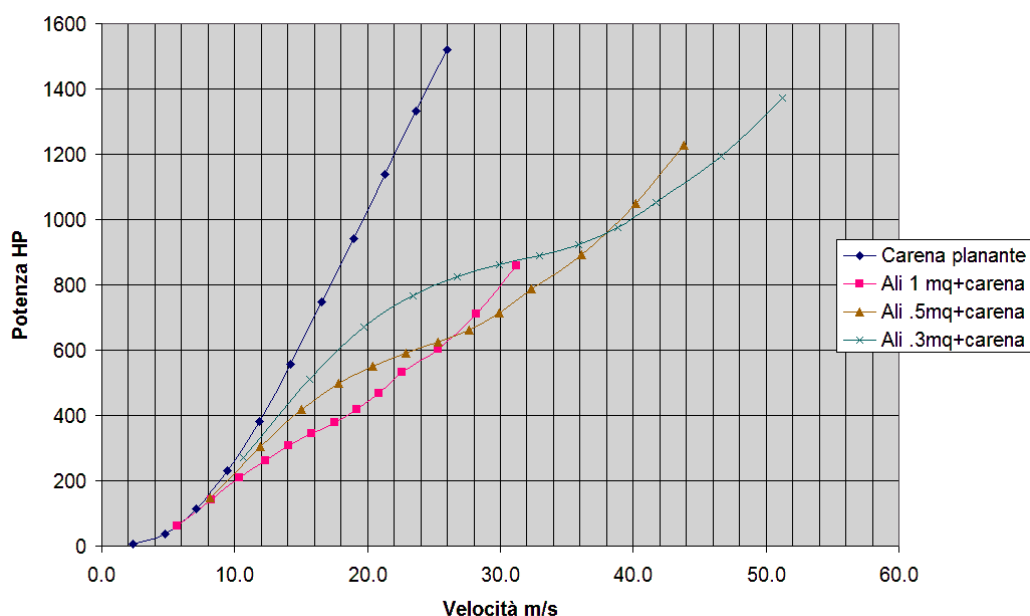
Il primo grafico rappresenta la spinta necessaria all'avanzamento nei 4 casi. Si vede subito che la spinta (somma di tutte le resistenze) massima è quella della carena planante pulita. Le ali riducono la spinta in modo notevole, con un minimo netto, corrispondente alla condizione di massima efficienza e quindi alla velocità di crociera. In questo punto la riduzione di spinta è quasi il 50% nel primo caso, con l'ala più grande. Con le ali più piccole la diminuzione della spinta, rispetto alla carena planante, è relativamente minore, ma la velocità ottimale si innalza. Quindi la dimensione dell'ala dipenderà da un compromesso tra il risparmio di energia, e la maggiore velocità utile. Si nota anche che i minimi di resistenza sono tutti allo stesso livello di spinta, corrispondente all'efficienza del profilo alare scelto, che è di circa 20, e quindi la spinta è circa $1/20$ del peso totale ($24/20 = 1.2$ ton), con una leggera tendenza all'aumento per le ali più piccole a causa della resistenza dei montanti che conta relativamente di più.



Le velocità sono date in m/s, ma per averle in nodi basta raddoppiare, quindi le velocità di crociera nei tre casi sono di 45, 64, e 82 nodi. Per la precisione possiamo anche dare le velocità in km/h: 81, 115 e 148.

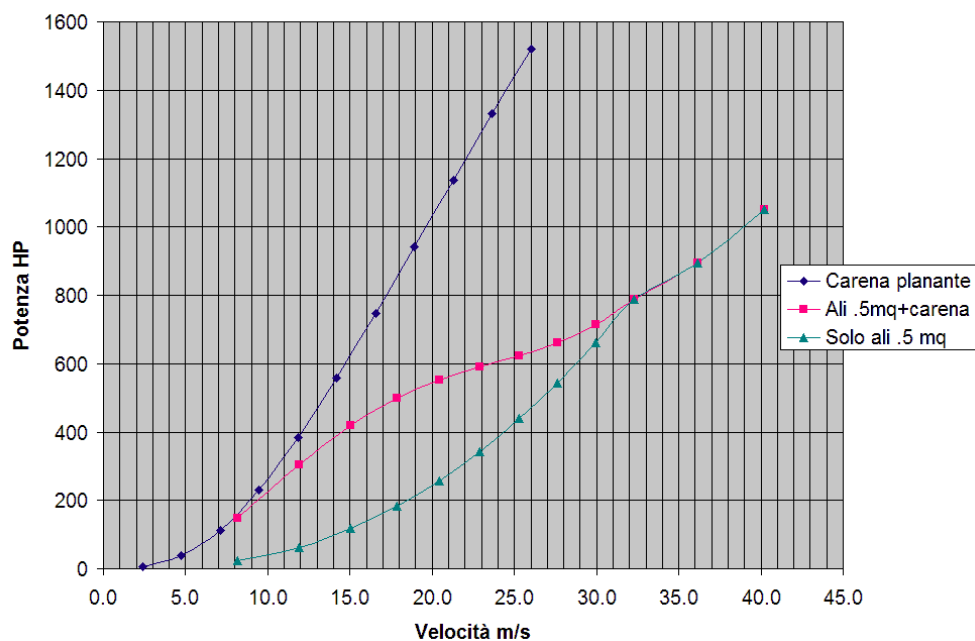
Passiamo ora ad esaminare il grafico delle potenze corrispondenti. Per calcolarle abbiamo tenuto conto del rendimento del propulsore, che nel caso delle eliche usate sulle carene plananti pure è di 0.7. Nel caso degli idrogetti che sarebbero più appropriati a questo tipo di imbarcazione (che non ha contatto dello scafo con l'acqua) si deve notare che le pompe ben disegnate hanno un rendimento superiore (0.8-0.85), ma tenuto conto della lunghezza dei condotti necessari, abbiamo fatto i calcoli con lo stesso valore del rendimento (0.7).

Si nota subito l'estensione delle curve di potenza delle ali verso velocità maggiori, di un fattore intorno a 2, e verso valori di potenza inferiori, ancora di un fattore 2. Ciò significa che a parità di potenza si ha una velocità più che doppia, o a parità di velocità una potenza necessaria inferiore della metà. In questo grafico delle potenze è più difficile stabilire il punto di massima efficienza, il metodo è quello di tirare un retta dall'origine degli assi, che sia tangente al di sotto della curva di potenza: l'ascissa del punto di tangenza (ammesso che esista un punto di tangenza, come non esiste per la carena planante, che ha derivata prima crescente) dà la velocità di crociera, e l'inclinazione della tangente dà l'efficienza. Infatti l'inclinazione è il rapporto tra potenza e velocità che dimensionalmente sono: energia/tempo e spazio/tempo. Eliminando il tempo abbiamo energia/spazio che è il fabbisogno di energia per percorrere una certa distanza, in pratica il consumo di carburante in litri/km. Quindi più bassa è questa inclinazione, meno carburante si consuma per percorrere la stessa distanza. Questa retta si trasforma nel grafico precedente in una linea orizzontale corrispondente ad una forza, di ordinata proporzionale all'inclinazione di questa prima retta. Infatti un po' di analisi dimensionale ci dice che il rapporto energia/spazio è una forza, o meglio il prodotto forza · spazio è un lavoro, cioè un'energia spesa. Ecco il grafico delle potenze:



Le curve delle ali sono ondulate e intrecciate, e per ognuna c'è una regione di velocità dove è la più efficiente: la curva rossa, delle ali grandi, da 10 a 26 m/s, quella marrone, delle ali intermedie, da 26 a 38 m/s e quella azzurra, delle ali piccole, da 38 m/s in su. Anche nel primo grafico, quello della spinta, le tre curve si incrociano alle stesse velocità, perché i due grafici descrivono lo stesso fenomeno da due viste diverse, e sono una trasformazione dell'altro. Ciò non ostante, ci mostrano cose che nell'altro non si vedono bene.

C'è un altro grafico che è interessante esaminare, ed è quello che presenta le potenze impiegate separatamente dalla carena planante e dalle ali per confrontarle al variare della velocità, ed è quello qui sotto:



La curva blu a losanghe è la potenza necessaria per la carena planante pulita (senza ali) che arriva a 1520 CV a 26 m/sec e che è stata tracciata con punti equidistanti in velocità, mentre la curva verde a triangoli è la potenza assorbita dalle sole ali. La curva in rosso a quadrati fra le due è la potenza totale della macchina ibrida (ali + carena). Come la seconda curva, quella verde, è stata presa con punti non equidistanti in velocità (infatti le ascisse dei suoi punti non corrispondono a quelle dei punti della prima curva, ma sono stati scelti per percentuali equidistanti di peso diviso tra la carena e le ali (10%, 20%, e così via). Si nota subito che alle basse velocità questa curva coincide con quella della carena pura, alle velocità intermedie se ne discosta sempre più verso il basso, finché, alle velocità più elevate, si avvicina alla curva delle sole ali fino a coincidere con essa quando la carena fuoriesce dall'acqua, al 10° punto a 32 m/s.

Questa curva rappresenta il passaggio graduale del peso dalla carena planante alle ali. Alle basse velocità il peso viene sostenuto dalla carena sia per il principio di Archimede (galleggiamento) che per lo spostamento verso il basso della massa d'acqua dovuto alla planata, mentre le ali non contribuiscono in modo apprezzabile al sostentamento. All'aumentare della velocità la carena esce dall'acqua diminuendo il galleggiamento a favore della spinta dovuta alla planata, ma nello stesso tempo le ali, favorite dall'assetto

cabrato (vicino ai 4°) cominciano ad agire, e poiché le ali sono più efficienti, la loro portanza è meno costosa in termini di spinta, e quindi di potenza (la curva si abbassa). Alle velocità superiori la carena esce sempre più dall'acqua, diminuendo anche l'angolo di assetto, perché la prua si alza poco o nulla, mentre la poppa si alza di più. Le ali, superato il punto di "decollo" (che abbiamo definito come il punto ove il peso è diviso al 50% con la carena planante, ed è quindi rappresentato dal quinto punto da sinistra con ascissa, e velocità, di poco meno di 21 m/s), cominciano a sopportare la maggior parte del peso, fino ad arrivare al punto del "distacco" (che qui definiamo come il punto in cui la carena esce completamente dall'acqua, ma la sfiora ancora, con un angolo di assetto di circa 2°) dopo il quale le ali da sole sostengono tutto il peso della macchina, ed all'aumento ulteriore della velocità si portano all'assetto ottimale (di massima efficienza, circa 0.5-1°) corrispondente alla velocità di crociera. A questo punto la chiglia non è ancora orizzontale se l'angolo di attacco delle ali è nullo (come abbiamo già detto), ma può esserlo se questo angolo di attacco è uguale a quello di massima efficienza.

In conclusione: lo spazio al di sotto della curva verde, quella delle ali, corrisponde alla potenza assorbita da queste, mentre lo spazio lenticolare compreso fra la curva rossa (che rappresenta la potenza assorbita totale) e la curva verde, rappresenta la parte di potenza assorbita dalla carena planante, che è massima al decollo (al 5° punto) e diminuisce man mano che esce dall'acqua, per annullarsi al momento del distacco (10° punto) dove le due curve coincidono. Da qui in poi la curva continua con l'inclinazione della curva rossa salendo più lentamente della curva delle sole ali, e questo significa che siamo nella regione di massima efficienza e la domanda di ulteriore potenza per un incremento di velocità è modesta. La distanza tra la curva blu e quella rossa è la potenza risparmiata tra carena planante da sola e la nostra configurazione ibrida (ali più carena).

Naturalmente qui siamo in una regione del grafico totalmente sconosciuta alla carena planante, dove si fanno 80 nodi con solo 1050 CV e non si riesce nemmeno ad immaginare una velocità massima raggiungibile con la potenza installata di 3000 CV. Per essere più precisi bisogna dire che queste ali non sono adatte alla massima potenza, ma per sfruttarla al meglio sarebbero indicate delle ali più piccole.

9/7/10 - Lezione 10

Fattore di scala. Abbiamo visto prima che con l'aumentare della potenza servono ali più piccole, e questo è intuitivo, visto che aumenta anche la velocità. Riprendendo l'equazione della Portanza:

$$P = C_L \delta S V^2$$

si nota che, per una portanza costante (corrispondente al peso del battello, che non varia), la superficie frontale S dell'ala è inversamente proporzionale al quadrato della velocità V . Poiché la superficie frontale dell'ala è proporzionale al quadrato della sua apertura (larghezza), infatti detta " f " la *finezza* dell'ala, cioè il rapporto tra il suo spessore e la sua apertura, essendo $f \cdot l$ lo spessore, si ha che $S = f \cdot l^2$ e sostituendo:

$$P = C_L \delta f l^2 V^2$$

si può concludere che l'apertura è inversamente proporzionale alla velocità. In parole più semplici a velocità doppia, l'apertura alare deve essere la metà.

Se invece di osservare le variazioni di velocità, osserviamo cosa succede al variare del peso del battello, scopriamo cose molto interessanti.

Facciamo l'assunzione che la densità della costruzione della nave sia costante, e quindi che il peso sia proporzionale al cubo della lunghezza fuori tutto dello scafo secondo un coefficiente D , che ha le dimensioni di N/mc , sostituendo $D \cdot L^3$ a P si ottiene:

$$D \cdot L^3 = C_L \delta f l^2 V^2$$

Definiamo ora il rapporto K tra apertura delle ali e lunghezza della nave (numero puro, adimensionale), sostituiamo poi $l = K \cdot L$ ed otteniamo:

$$D \cdot L^3 = C_L \delta f K^2 L^2 V^2$$

semplifichiamo dividendo per L^2 ed abbiamo:

$$D \cdot L = C_L \delta f K^2 V^2$$

Dato che tutti i fattori dell'equazione sono costanti, eccetto L e V , se ne conclude che il vincolo restante tra L e V è del tipo:

$$L = \text{cost} \cdot V^2 \qquad \text{cost} = C_L \delta f K^2 / D$$

che vuol dire che, se non si vuole alterare il rapporto tra apertura delle ali e la lunghezza dello scafo, quadruplicando la lunghezza L della nave bisogna raddoppiare la velocità. Questo è un vincolo molto limitante, che alla fine rende impossibile l'uso delle ali alle navi più lunghe di 100 m.

Sostituendo i valori reali otteniamo per la costante:

$$\text{cost} = C_L \delta f K^2 / D = 0,4 \cdot 1000 \cdot 0,1 \cdot 0,25 / 26,7 = 10 / 26,7 = 0,37$$

e applicando l'equazione precedente si ottiene che un natante di 37 m può avere una velocità superiore a 10 m/sec (20 nodi, 36 km/h). Uno scafo di 150 m deve andare a 40 nodi, ed uno di più di 340 m deve andare a 60 nodi. Considerando che la potenza necessaria aumenta col peso (proporzionale al cubo della lunghezza dello scafo) e col cubo della velocità, si raggiungono presto dei limiti invalicabili.

Aggiornato il 19/7/2010, il 6/2/2013, il 3/5/2013, il 7/11/13.