

15/7/7 - Lezione 11

Dobbiamo dunque affrontare il problema di realizzare un sistema di controllo, semplice ed affidabile per l'ambiente marino, per regolare in modo automatico o semi-automatico l'altezza dello scafo rispetto al livello medio del mare in condizioni di idrosostentazione dinamica, cioè quando lo scafo "vola" completamente fuori dall'acqua.

Mettiamo da parte per ora le soluzioni che la tecnologia imperante ci suggerisce: sensori elettronici e calcolatori di processo, nonché attuatori elettrici, per le considerazioni sul costo e l'affidabilità che abbiamo già fatto.

Pensiamo invece a qualcosa di meccanico come farebbe Leonardo, o meglio, visto che siamo sull'acqua, a qualcosa di ibrido idro-meccanico. Il sistema di controllo consta di tre parti: i sensori, l'elaboratore vero e proprio, e gli attuatori. In alcuni sistemi essi sono distinti, in altri sono associati, altri sistemi invece, quelli più semplici, mancano dell'elaboratore.

La letteratura ci dà una soluzione al controllo dell'assetto che è il *Savitsky flap*, che viene deflesso con forza proporzionale all'immersione e comanda l'incidenza dell'ala sottostante con un semplice collegamento meccanico. Il pregio principale di questo meccanismo è la semplicità e quindi la sua affidabilità. Il difetto di questo sistema è però che funziona come un timone e quindi tende a disturbare la rotta. Si può ovviare all'inconveniente mettendone in numero pari con deflessioni opposte, se invece ne abbiamo un numero dispari, ne dovremmo fare uno con due flap antagonisti. Il sistema è costruito come si vede nella figura:

A clever and more recent mechanical system which is still in use is the "Savitsky Flap" invented by Dr. Daniel Savitsky of the Davidson Laboratory, and used by Atlantic Hydrofoils on

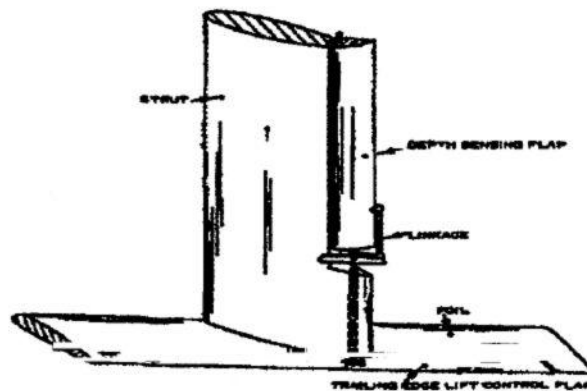
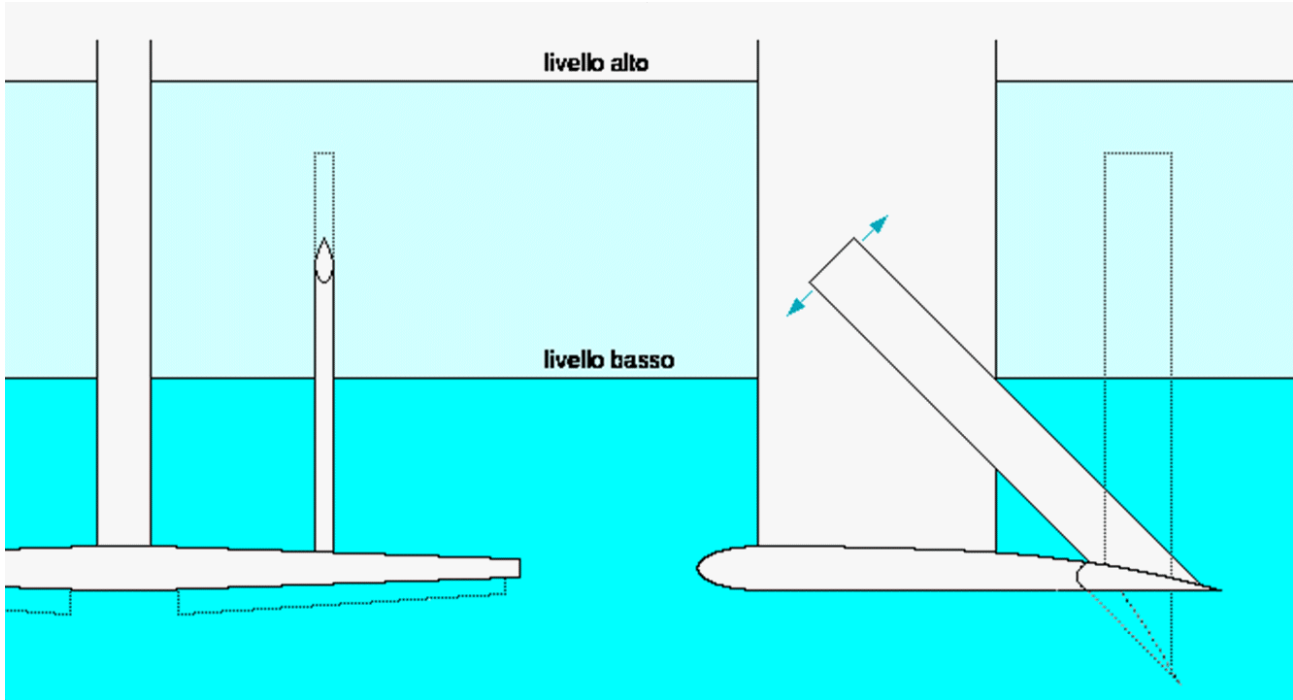


Figure 17. The Savitsky Flap

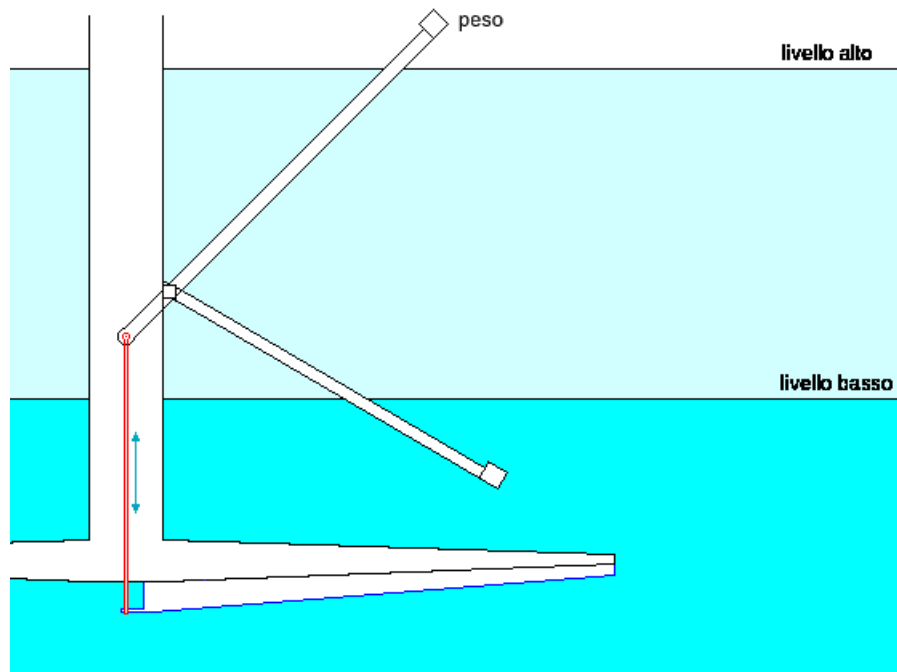
che è tratta dal libro “*Hydrofoil Ship Design*” di William C. O’Neill, reperibile sul sito della “*International Hydrofoil Society*” (www.foils.org) da cui sono tratte le altre foto che appaiono in questa presentazione.

Si può semplificare l’aletta Savitsky trasformandola in un’aletta verticale inclinata di 45° in avanti sopra l’alettone, come nella figura:



Questo sistema non produce forze laterali e presenta un attrito molto minore, dato che le forze in gioco sono minime grazie all’effetto leva dovuto alla lunghezza dell’aletta. Ha anche il vantaggio di non aumentare le parti mobili essendo l’aletta solidale con l’alettone.

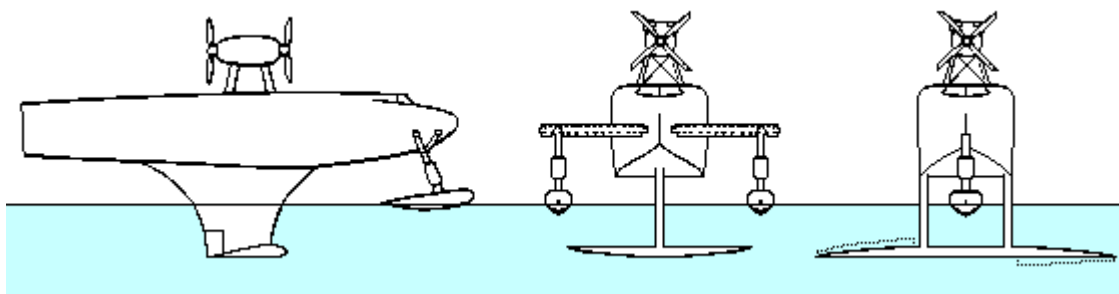
Una variante interessante che propongo è un’alula con un peso all’estremità, incernierata a metà della colonna portante che si alza o si abbassa al variare della quota, aggiustando la sua incidenza con la posizione, leggermente positiva in basso e sempre più positiva in alto, giusto per compensare la reazione dell’alettone dell’ala, che lo comanda con un opportuno rinvio, come nella figura:



Se poi si varia l'incidenza di questa "alula" con il comando del pilota, allora si ottiene un semplice servocomando. Infatti per smuovere gli alettoni principali ci vuole una forza considerevole, ed un aiuto non guasta.

Altri sistemi, magari più semplici, come un galleggiante che plana sulla superficie rilevandone il livello, raggiungerebbero lo stesso scopo, ma non si adatterebbero alla funzione di servocomando.

A questo proposito dobbiamo citare il sistema di regolazione del russo Vsevolode Grunberg, degli anni '30, del quale non esistono fotografie, ma una descrizione sul sito dell'[International Hydrofoil Institute](http://www.ihydrofoil.org/) (vedi figura):



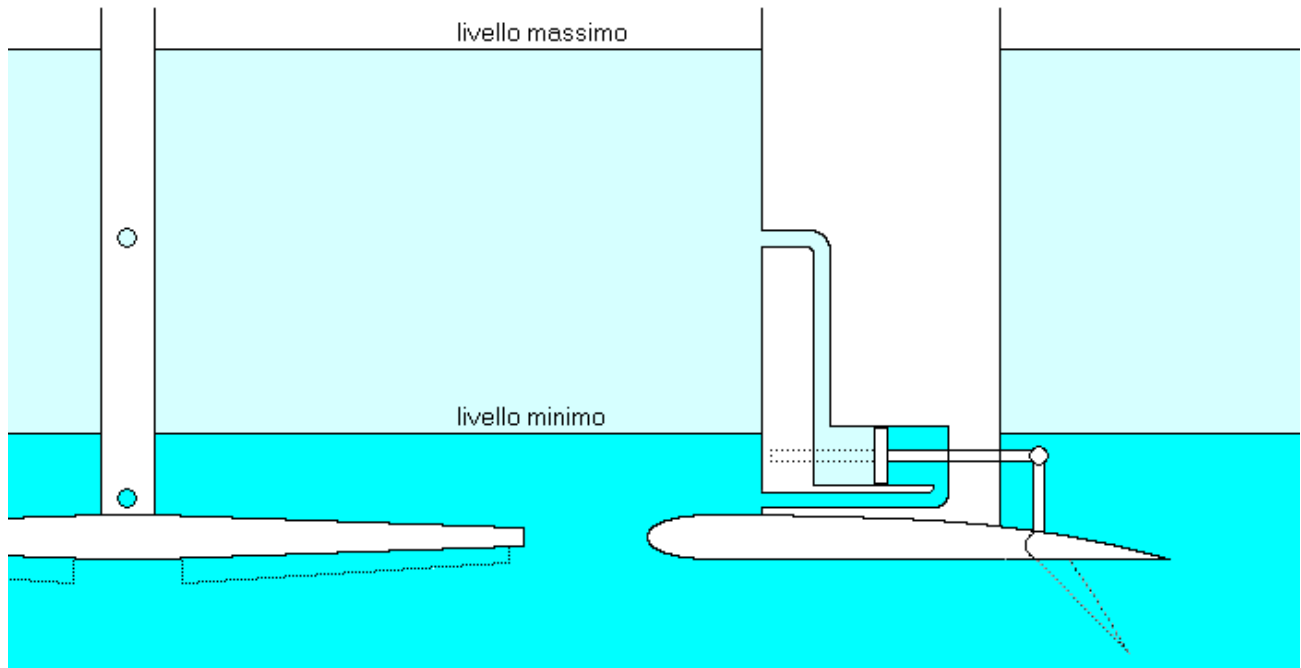
dove sono usati dei *surface riders* come riferimento di quota. La prua dell'aliscafo appoggia su due scarponi plananti tipo idrovolante che sostengono una frazione minima del peso, ma mantengono la prua stessa ad una quota costante sulla superficie, regolando automaticamente l'incidenza dell'ala principale che si trova subito dietro il baricentro. È un

sistema ingegnoso nella sua semplicità, non avendo addirittura parti mobili, ma la sua stessa rigidità non permette, per esempio, le virate coordinate (con inclinazione verso l'interno) se non rendendo mobili i galleggianti.

Una disposizione più maneggevole che propongo sarebbe con un'ala di maggiore apertura ed un solo galleggiante a prua (come nel disegno più a destra), in questo caso l'equilibrio e la stabilità laterale sarebbero affidati agli alettoni (tratteggiati), che possono essere comandati dal pilota o da un sistema automatico. Un altro punto da modificare è lo scarpone di prua, che in caso di navigazione in dislocamento tenderebbe a sollevare troppo la prua con il suo galleggiamento, alterando l'assetto. Lo scarpone andrebbe quindi represso, o comunque sollevato quanto più possibile, magari fino ad integrarlo con la linea della chiglia, ma ciò porterebbe ad una complicazione notevole del sistema, per cui suggerisco di sostituirlo con la sola superficie inferiore dello stesso, eliminandone la galleggiabilità. Così alle basse velocità della navigazione in dislocamento questo sprofonda senza creare ulteriori problemi, se si esclude la modesta resistenza e la pure modesta portanza residue. Si potrebbe anche sostituire la sagoma complessa dello scarpone, che comprende anche il "gradino", con una specie di vomere, cioè un semplice diedro formato da due triangoli piani, che avrebbe una minore resistenza se completamente immerso, e che si comporterebbe come uno scafo planante alle alte velocità.

16/7/7 - Lezione 12

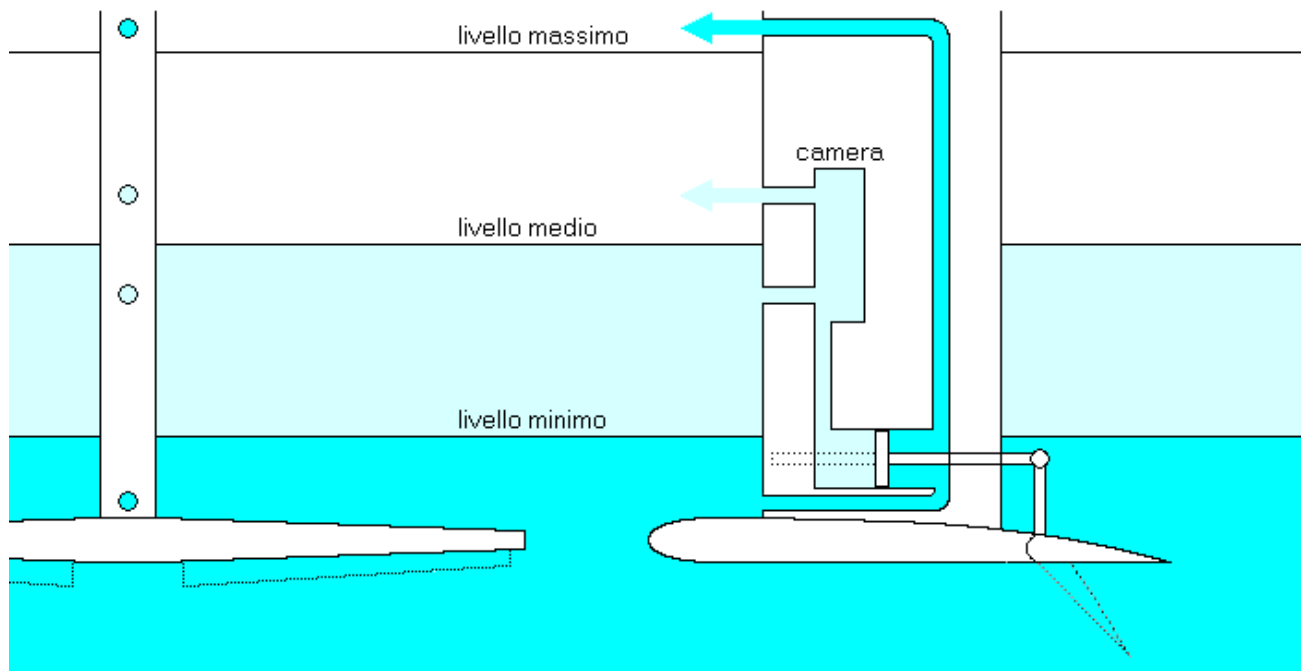
Se esaminiamo le caratteristiche di uno yacht di media grandezza (sui 20 m) si vede che la potenza installata è di 3000 HP. Questo significa che la superficie frontale esposta al flusso assorbe circa un cavallo per pollice quadrato (uso questa unità perché produce un numero più facile da ricordare: uno), in altre parole se noi facciamo un'apertura frontale di 3 cm di diametro otteniamo, all'interno dello scafo, un getto d'acqua uguale a quello di una pompa da un cavallo, già più potente di quella che usiamo per innaffiare il giardino! L'idea che viene subito in mente è: perché non sfruttare questa potenza per azionare gli alettoni, o addirittura per variare l'incidenza delle ali? Il sistema di autoregolazione è presto fatto: se un'apertura è al livello giusto, quando è immersa pomperà acqua in un cilindro con un pistone che abbassa l'alettone, mentre quando è scoperta l'alettone si raddrizzerà da solo sotto la pressione della corrente ed espellerà l'acqua dalla stessa apertura. Naturalmente per deflettere l'alettone dall'altra parte avremo bisogno di un'altra apertura, più in basso, quindi sempre immersa, il cui getto pomperà acqua nella camera opposta per deflettere l'alettone in alto come si vede nella figura seguente, dove il senso del moto dell'ala è verso sinistra.



Semplice, non serve altro. In realtà la cosa si complica un po' perché un tale congegno sarebbe instabile, essendo un sistema "tutto o niente" che oscillerebbe sempre intorno alla quota del foro più alto. Infatti il meccanismo è vicino, ma non all'equilibrio quando i due fori sono immersi, perché il gambo del pistone ne riduce la superficie utile posteriore, dando un leggero vantaggio alla camera anteriore, che con la stessa pressione, ma una superficie utile leggermente maggiore, tende a spostare il pistone all'indietro e l'alettone in basso, facendo emergere il foro superiore, che perde pressione facendo svuotare la camera anteriore, che di nuovo affonda il tutto immergendo il foro superiore, e così via. Per evitare questo piccolo squilibrio dovremmo prolungare il gambo del pistone come nella parte tratteggiata della figura precedente.

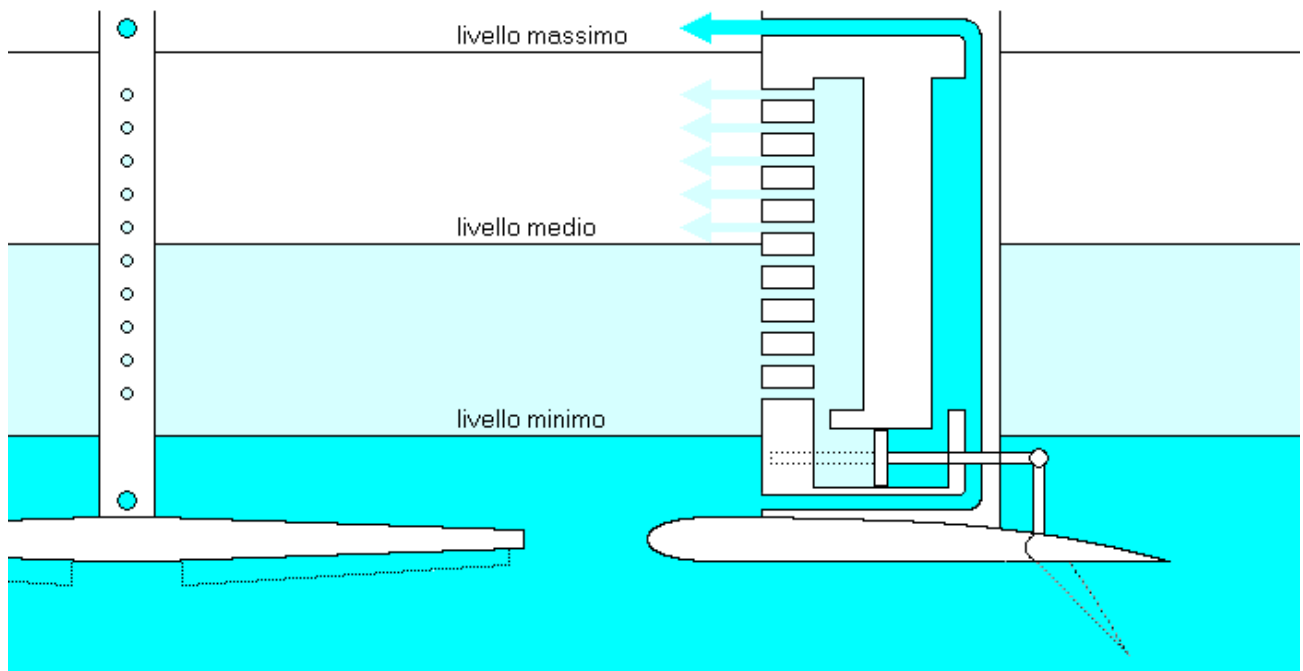
Bisogna rendere il sistema più graduale. Proviamo ad aggiungere un'altra apertura, ottenendo così non un sistema a due stati, ma a tre stati, corrispondenti a nessuna, una, o due aperture immerse, non considerando quella inferiore, comunicante con l'altra faccia del pistone. Nel primo e nell'ultimo caso il sistema si comporta come prima, ma nel secondo caso, di una sola apertura esposta al flusso, si verifica un fenomeno nuovo: la pressione indotta nel pistone dell'attuatore dell'alettone dall'acqua che entra dall'apertura inferiore produce la fuoriuscita dell'acqua all'apertura superiore, che è libera, non sottoposta ad alcuna pressione. Questo getto, rivolto in avanti e uscente dall'apertura superiore, diminuisce la pressione nel cilindro attuatore, portandola ad un livello minore, intermedio tra i due casi estremi: nessuna o due aperture immerse nel flusso. Naturalmente per avere l'equilibrio del pistone bisogna dotare anche l'altro circuito di una seconda apertura, posta al di sopra del livello massimo perché sia sempre libera, in modo che la pressione di riferimento sulla faccia posteriore del pistone non cambi con il livello dell'acqua, mentre quella sulla faccia anteriore può assumere 3 valori a seconda del livello d'immersione. Nella figura seguente è stata aggiunta una camera di compensazione delle pressioni, in modo che

nel cilindro non ci sia troppa circolazione di fluido (la stessa cosa andrebbe fatta per il circuito idraulico posteriore).

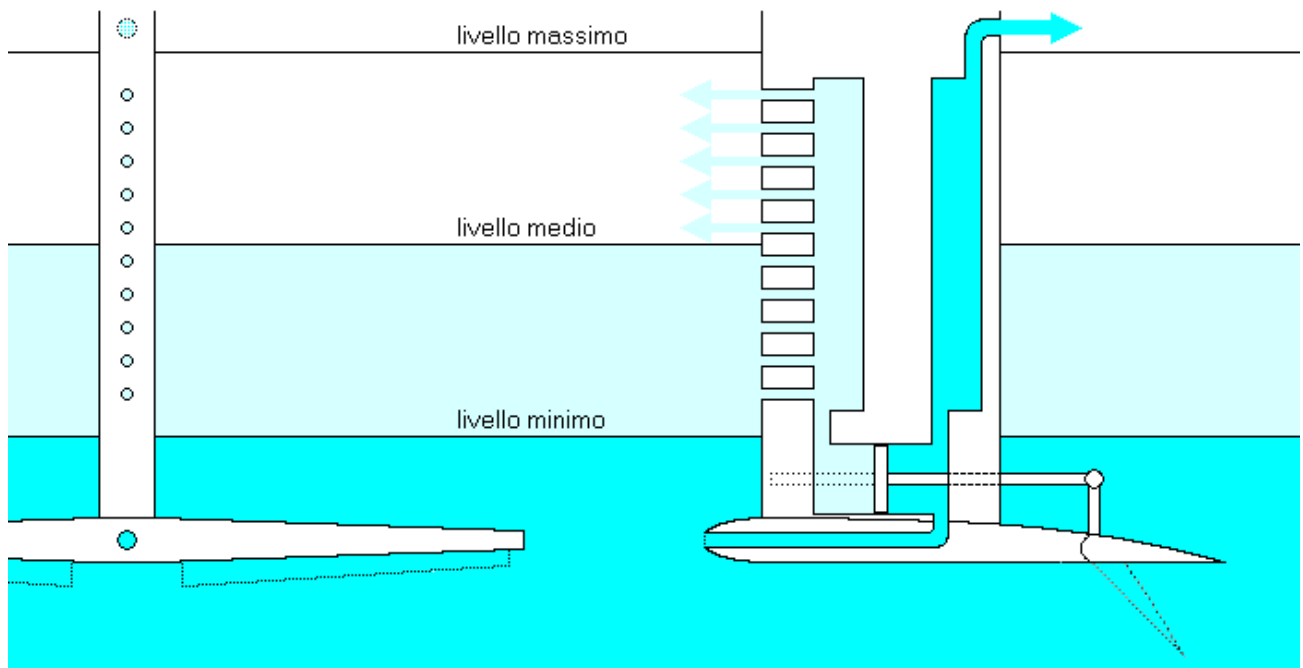


Il sistema nella figura è nello stato di equilibrio perché da ognuna delle due facce del pistone c'è un foro alimentato dalla corrente di fluido e uno libero e quindi la pressione è la stessa. La leggera disuguaglianza delle facce del pistone può essere compensata anche da una leggera differenza dei fori che vanno alla camera posteriore.

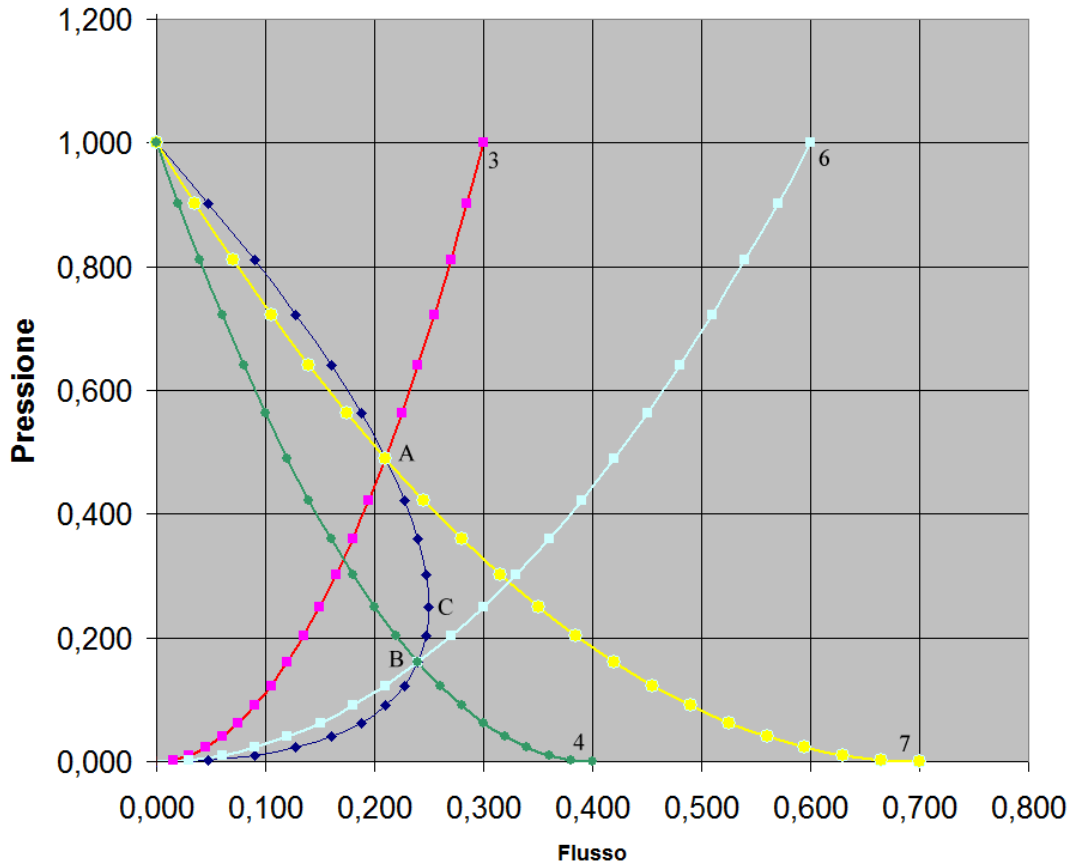
Cosa succede se le aperture diventano tre, o quattro, e ancora di più? Un'analisi matematica del problema ci dice che la pressione nel cilindro attuatore si stabilizzerebbe su $N+1$ livelli se N è il numero di aperture, man mano che esse si immergono o si liberano. Non è ancora un sistema lineare, ma ad $N+1$ scalini. Se N è abbastanza grande questo sistema approssima un sistema lineare (meglio dire proporzionale, o ancora meglio graduale) in modo del tutto soddisfacente, né più e né meno come fanno i calcolatori *digitali* quando trattano grandezze fisiche, e perciò analogiche, in modo *discontinuo*. Abbiamo bisogno di una camera di compensazione delle pressioni prodotte dai numerosi fori anteriori, camera dove la pressione si stabilizza ad un valore intermedio. La condizione necessaria per il formarsi di questa pressione intermedia è che i flussi entranti (quelli inferiori dei fori immersi) perdano quasi tutta la loro velocità, mentre i flussi uscenti (quelli superiori dei fori liberi) acquistino una velocità sufficiente partendo da una velocità minore, perciò la sezione della camera deve essere almeno il doppio della somma delle sezioni dei fori. Nell'esempio della figura la sezione della camera equivale a 20 fori, il flusso è da 5 a 5 fori, quindi la velocità massima nella camera è $5/20 = 1/4$ di quella dell'acqua entrante o uscente (e le differenze di pressione, che sono proporzionali ai quadrati delle velocità, pari ad $1/16$), quindi la variazione di velocità è largamente preponderante rispetto alla velocità all'interno della camera.



La figura qui sopra rappresenta l'esempio con 10 fori e quindi un sistema ad 11 livelli. Notare la nuova camera posteriore di compensazione della pressione media di riferimento. Si vede anche che il sistema è nello stato di equilibrio, in quanto nelle due camere di compensazione le pressioni sono uguali perché i fori immersi che alimentano la camera anteriore sono lo stesso numero di quelli liberi, come per la camera posteriore. Se poi vogliamo lasciare libero il bordo di entrata del piede di sostegno per i dieci fori della camera anteriore, possiamo scegliere una configurazione come nella figura seguente:



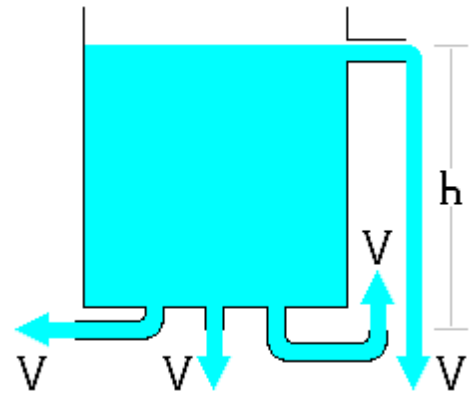
dove il condotto inferiore della camera di riferimento è sceso nell'ala, e quello superiore è rivolto all'indietro, cosa che non disturba perché equivale ad uno sempre emerso, anzi sostituisce la spinta frenante del getto rivolto in avanti con una spinta accelerante di quello rivolto all'indietro. La parte anteriore del piede di sostegno dell'ala resta così libera per spaziare maggiormente i fori della camera di misura del livello, oppure per alloggiare una presa d'acqua per i propulsori, che deve essere sempre immersa, ed è anche di dimensioni maggiori.



Il grafico precedente mostra le pressioni nella camera di compensazione nel caso dei 10 fori. I grafici decrescenti a cerchi rappresentano la pressione nella camera in funzione del flusso nei fori immersi, nel caso di 4 fori (verde) e 7 fori (gialla), mentre i grafici crescenti a quadrati rappresentano la pressione necessaria per avere un certo flusso uscente dai fori liberi nel caso di 3 fori (rossa) e 6 fori (celeste). Il punto di incrocio "A" rappresenta il punto di equilibrio nel caso di 3 fori liberi e 7 fori immersi (immersione al 70%) dei 10 totali, con pressione relativa di 0.5 e flusso relativo di 0.21. Il punto "B" rappresenta il caso di 6 fori liberi e 4 immersi (immersione al 40%), sempre dei 10 totali, con pressione relativa 0.15 e flusso relativo 0.24. Nel grafico mancano tutti gli altri 9 casi (0-11, 1-10, 2-9... 10-1, 11-0) per evitare che l'intrico di linee (più di 20) andasse a scapito della chiarezza. Quindi i due punti A e B sono solo due degli undici possibili, e si nota che giacciono su un'altra curva, quella blu scura a losanghe con la forma di un fiasco. Questa curva è il *luogo* degli undici punti di equilibrio (le losanghe ne mostrano 19 esclusi i punti estremi) con pressioni e flussi analoghi al grafico di una pompa idraulica, pressioni e flussi il cui prodotto ci dà la

potenza disponibile di questa pompa (ricordando la pompa da giardino prima menzionata). Per inciso la potenza massima è rappresentata dal punto di tangenza di questa curva a fiasco con l'iperbole equilatera (luogo dei punti con prodotto costante Flusso x Pressione) più lontana, che ad occhio sembra molto vicino al punto A. Il punto di flusso massimo (flusso e pressione 0.25 relativi, cioè un quarto dei massimi) rappresenta il caso di 5 fori liberi e 5 immersi, corrispondente al punto "C", infatti tutte le altre combinazioni, avendo meno della metà dei fori immersi o liberi produce un flusso minore. Questo è anche il caso della camera di compensazione posteriore, o di riferimento, che ha due soli fori più grandi (ognuno equivalente a 5 fori della camera anteriore).

Finora abbiamo usato il termine *relativo* e abbiamo parlato di una pressione intermedia che si sviluppa nelle camere di compensazione. Possiamo calcolare questa pressione? Vediamo come si può fare. Bernoulli e Stevino ci dicono che un fluido, contenuto in un serbatoio a pelo libero in comunicazione con un tubo aperto verso l'esterno, esce ad una velocità il cui quadrato è proporzionale alla pressione locale, quindi alla differenza di quota tra il livello del serbatoio e l'apertura di uscita. Senza scrivere le equazioni possiamo affermare che la velocità di uscita dal tubo è uguale alla velocità che il fluido acquisterebbe in caduta libera dalla quota del livello libero alla quota dell'apertura.



Vediamo le formule ora. La velocità si calcola così:

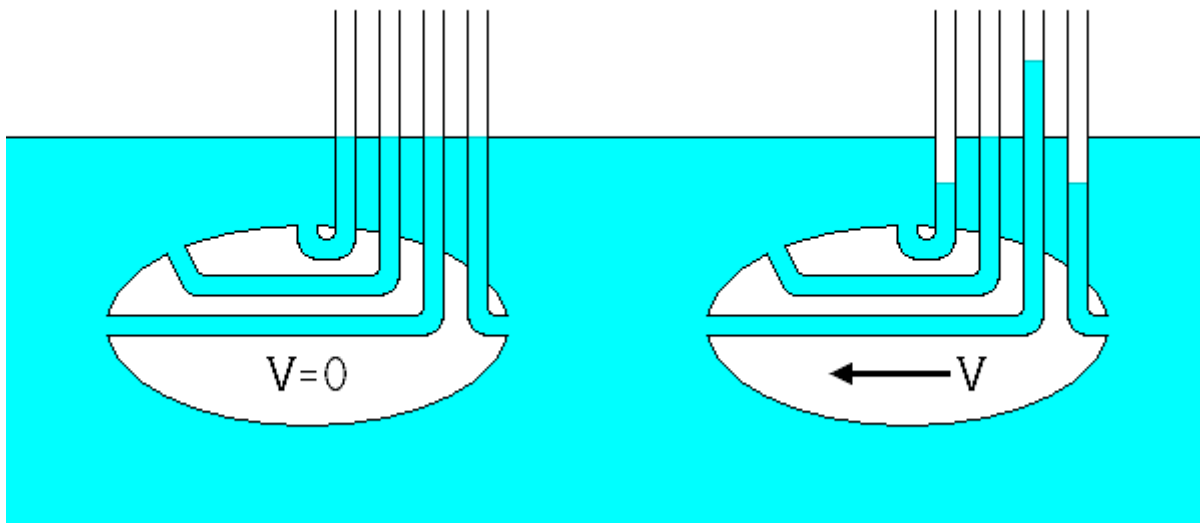
$$\begin{array}{lll}
 V^2 = 2gh & P = \rho gh & \rho V^2 = 2P \\
 V^2 = 2P/\rho & P = \rho V^2/2 & h = V^2/2g
 \end{array}$$

dove "g" è l'accelerazione di gravità (9,81 m/s²) e "ρ" è la densità del fluido (1030 kg/m³ per l'acqua di mare). Possiamo ora evidenziare la pressione massima che si può ricavare all'interno del nostro misuratore di livello (o di quota):

$$P = \rho V^2/2$$

Seguendo il ragionamento logico inverso si può dire che un fluido dotato di velocità verso l'alto (come in una fontana), e anche se costretto a risalire un condotto verticale, raggiungerà una altezza (e quindi una pressione se siamo nel condotto) uguale a quella che produrrebbe la stessa velocità nel caso precedente (quando il fluido cade dalla stessa altezza). Il ragionamento sembra complicato a parole, ma dice sostanzialmente che nel getto verticale di una fontana la velocità di ricaduta dell'acqua alla quota dell'ugello di origine del getto è uguale a quella con cui fuoriesce dall'ugello stesso. La cosa non sembra così innaturale, è come una palla lanciata verso l'alto che ricade con la stessa velocità a terra. Anzi potremmo dire che a qualunque quota la velocità di ricaduta è uguale (in modulo, ma in direzione opposta) a quella di salita.

Lo stesso fenomeno (trasformazione di una velocità in una pressione e viceversa) si verifica quando un corpo si muove relativamente al fluido. In questo caso ha molta importanza in quale direzione è rivolta l'apertura del condotto che capta il fluido e ne rileva la pressione, come si vede nella figura seguente, dove il corpo in moto ha forma ellissoide (la più semplice da studiare), ed è mostrato prima in quiete (a sinistra) e poi in movimento (a destra), come un sommergibile a quota periscopica, con vari tubi verticali emergenti dall'acqua, dove si vede che col moto il livello del fluido nei tubi si modifica:

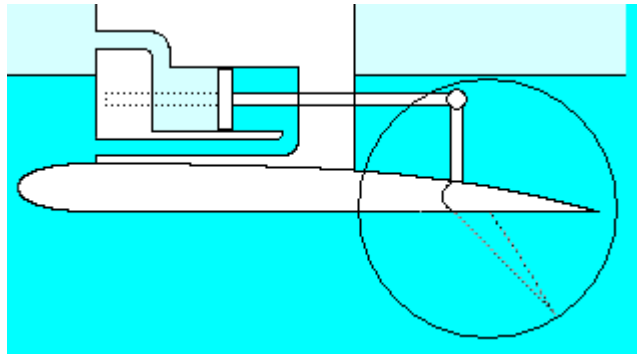


Nella parte frontale la pressione dinamica (pressione di stagnazione) è superiore a quella idrostatica, le aperture situate in posizione tangenziale e anche quelle rivolte all'indietro rilevano una pressione inferiore (depressione), mentre l'apertura sulla superficie che forma un angolo di circa 30° rispetto alla direzione del moto risente di una pressione uguale a quella idrostatica. Una spiegazione intuitiva di questi tre casi è che nelle aperture frontali il fluido entra per inerzia, e cede la sua energia cinetica al fluido del condotto che la trasforma in energia potenziale (pressione, secondo il teorema di Bernoulli), in quelle tangenziali il fluido viene sottratto (creando una aspirazione di altro fluido) dal condotto per miscelazione e ablazione (effetto Venturi), nell'apertura obliqua il poco fluido che entra per inerzia viene risucchiato via, e il fluido del condotto resta indisturbato. Questa situazione di equilibrio esiste per un angolo preciso, che è di circa 30° tra il senso del moto e la corrente relativa di fluido (sempre parallela alla superficie, se questa è impenetrabile). Se ne può dedurre che su tutta la superficie del corpo immerso la pressione varia, aumentando nella zona anteriore, e diminuendo nella zona laterale e posteriore, ma naturalmente l'integrale della pressione esteso alla totalità della superficie non può variare rispetto allo stato di quiete, altrimenti verrebbe contraddetta la legge di Archimede, ed il corpo tenderebbe ad affondare o ad emergere col moto.

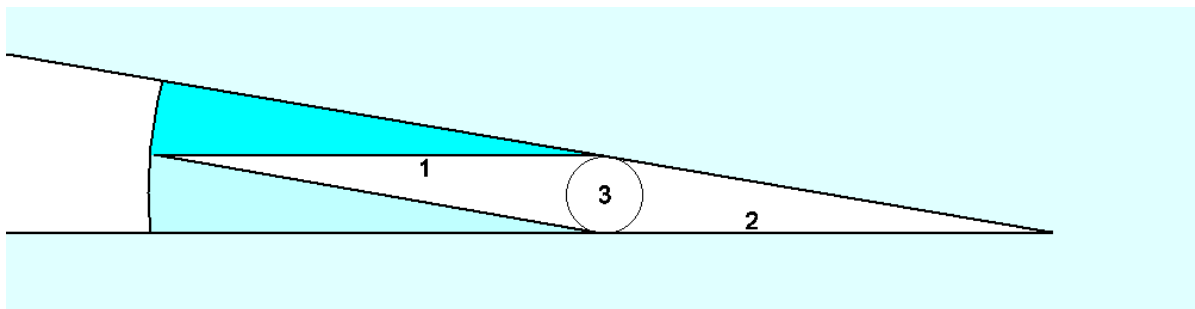
Il tubo di Pitot, usato per misurare la velocità negli aerei, sfrutta questo fenomeno.

16/5/13 - Lezione 13

Facciamo ora una verifica: controlliamo se la pressione che abbiamo a disposizione con questo misuratore di livello è sufficiente a spostare l'alettone nella corrente di fluido, che oppone una resistenza notevole e misurabile al movimento dell'alettone dalla sua posizione mediana (in linea col profilo alare). Dovremmo confrontare la pressione sulle due facce dell'alettone con la pressione sulle due facce del pistone. Ma prima di perdere tempo con questa configurazione, notiamo che il diametro del pistone dovrebbe, come nella figura seguente, essere maggiore dello spessore dell'ala, e quindi anche dei pilastri di sostegno. Intuitivamente questo diametro deve essere parecchie volte più grande, lo verificheremo più tardi. Perciò dobbiamo trovare un'altra configurazione.

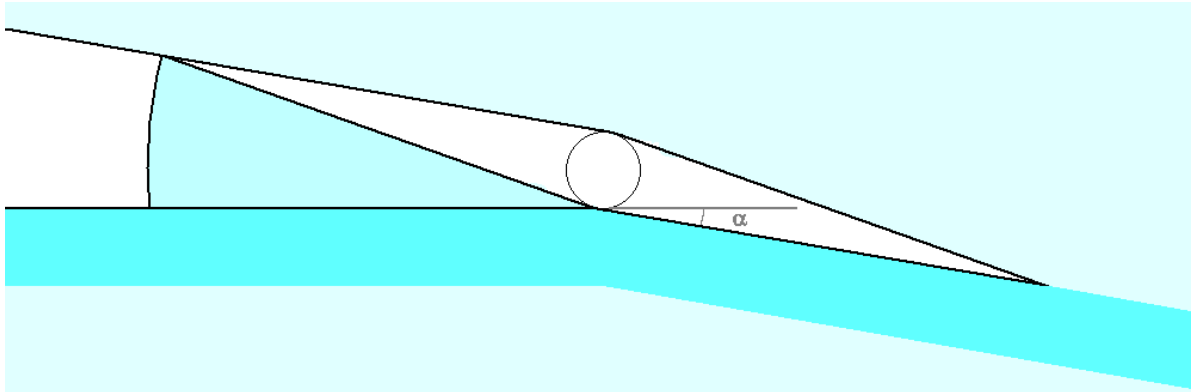


Al posto dell'insieme cilindro-pistone delle figure precedenti, che occupa un volume considerevole esterno all'ala, nel piede di sostegno, scegliamo un sistema attuatore che può estendersi linearmente lungo il bordo dell'ala nell'area interessata dal cerchio, così da avere una superficie del pistone molto più estesa del sistema precedente (pistone circolare e cilindro) rimanendo totalmente contenuta nel volume dell'ala, senza richiedere modifiche al profilo, come nella figura seguente che rappresenta la parte terminale (posteriore) del profilo alare:



Per questo scegliamo una camera trapezoidale al posto del cilindro, a monte dell'alettone, il quale si protende dentro di essa con un cuneo (1) solidale e specularmente identico nella forma all'alettone stesso (2). Questo cuneo fa le veci del pistone del sistema precedente, lasciando due camere triangolari il cui volume varia al variare della rotazione del gruppo alettone-cuneo attorno al tubo (3) che fa da cerniera. L'identità di forma tra cuneo ed alettone semplifica i calcoli (hanno la stessa superficie), e la forma triangolare del cuneo si adatta perfettamente alla camera trapezoidale, tanto che le due semicamere, inferiore e

superiore, possono annullare il loro volume agli estremi della rotazione. Naturalmente accorciando o allungando il cuneo (e la camera trapezoidale) si può aumentare o diminuire la corsa dell'alettone, al prezzo di un po' di calcoli aggiuntivi. Analizziamo la situazione dove l'alettone è deflesso verso il basso di un angolo α :



in questa immagine la deflessione è la massima, quella che annulla il volume della camera superiore, solo per illustrare l'ampiezza del movimento possibile con questa configurazione. Detto angolo può quindi variare tra un massimo e un minimo di valore uguale, ma di segno opposto. Dobbiamo calcolare la pressione sul lato inferiore dell'alettone dovuta alla deflessione dello strato d'acqua il cui spessore dipende dall'angolo α e la cui entità dipende ancora dallo stesso angolo, quindi questa pressione avrà un andamento proporzionale al quadrato dell'angolo α . Questo fenomeno è abbastanza intuitivo dato che la resistenza indotta da questa pressione è nulla per α nullo ed aumenta sia per α positivo che negativo. Dette V la velocità di avanzamento, W la larghezza e L la lunghezza dell'alettone nel senso del moto, lo spessore Q dello strato d'acqua interessato alla deflessione sarà:

$$Q = L \cdot \sin \alpha$$

Naturalmente lo strato a contatto con la superficie alare segue il cambiamento di direzione (deflessione) con assoluta precisione, mentre allontanandosi da questa superficie lo spostamento si riduce, ma noi facciamo l'ipotesi semplificativa che la somma degli spostamenti integrata dalla distanza zero all'infinito sia equivalente a Q , cioè se alla distanza Q lo spostamento è la metà, l'acqua che si trova oltre questa distanza ancora si muove, sempre meno, ma comunque a sufficienza per compensare la diminuzione di spostamento nello spazio tra zero e Q , quindi il volume S dello strato d'acqua interessato dalla deflessione (più scuro nelle figura) ogni secondo è:

$$S = V \cdot W \cdot Q$$

$$S = V \cdot W \cdot L \cdot \sin \alpha$$

mentre la velocità V_v verticale raggiunta da questo volume d'acqua è:

$$V_v = V \cdot \sin \alpha$$

data la densità ρ dell'acqua, la massa interessata ogni secondo è:

$$dM/dt = \rho \cdot S$$

cioè

$$dM/dt = \rho \cdot V \cdot W \cdot L \cdot \sin \alpha$$

Applicando il teorema della costanza dell'impulso (o della quantità di moto) si ha:

$$F \cdot t = M \cdot V_V$$

$$F = M \cdot V_V / t$$

derivando rispetto al tempo:

$$F = V_V \cdot dM/dt$$

$$F = V_V \cdot \rho \cdot V \cdot W \cdot L \cdot \sin \alpha$$

sostituendo V_V si ottiene:

$$F = V \cdot \sin \alpha \cdot \rho \cdot V \cdot W \cdot L \cdot \sin \alpha \quad F = V^2 \cdot \rho \cdot W \cdot L \cdot \sin^2 \alpha$$

in buon accordo con le previsioni perché F è proporzionale al quadrato di $\sin \alpha$. Dividendo questa forza per la superficie dell'alettone ($W \cdot L$) si ricava la pressione P :

$$P = V^2 \cdot \rho \cdot \sin^2 \alpha$$

A questo punto dovremmo calcolare la depressione che si manifesta sul lato superiore dell'alettone, ma per analogia diciamo che, in assenza di cavitazione, sia equivalente alla pressione sul lato inferiore, quindi introduciamo un fattore di valore attorno a 2:

$$P = 2 \cdot V^2 \cdot \rho \cdot \sin^2 \alpha$$

Si tratta di una stima approssimata, che attribuisce alle due frazioni il rapporto 50/50, diversamente all'ala completa dove il rapporto tra le due facce è 30/70, considerando però che l'ala ha un profilo asimmetrico mentre l'alettone è simmetrico. Facendo un calcolo analogo per la faccia superiore, e ammettendo che lo strato d'acqua interessato dal cambio di direzione sia $L \cdot \sin \alpha$ si otterranno valori analoghi o leggermente minori, dato che la velocità verticale iniziale non è nulla e quindi $L \cdot \sin \alpha$ diventerebbe $L \cdot (\sin 2\alpha - \sin \alpha)$, ed il termine fra parentesi apparirebbe alla fine al quadrato.

Abbiamo scelto di utilizzare come pistone nella camera trapezoidale un cuneo di forma uguale all'alettone e quindi la differenza di pressione fra la camera inferiore (maggiore) e quella superiore (minore) sarà uguale alla pressione che abbiamo appena calcolato, evitando di calcolare i momenti delle forze rispetto all'asse (3), e sfruttando il vantaggio di avere superfici uguali.

Ricordando che nella lezione precedente avevamo calcolato la pressione massima nel misuratore di quota come:

$$P = \rho V^2 / 2$$

e uguagliando le due pressioni (caso del rivelatore di quota completamente immerso) si ha:

$$P_1 = 2 \cdot V^2 \cdot \rho \cdot \sin^2 \alpha \quad P_2 = \rho V^2 / 2$$

$$2 \cdot V^2 \cdot \rho \cdot \sin^2 \alpha = \rho V^2 / 2$$

eliminando ρV^2 si ottiene il possibile (e anche massimo) valore di α :

$$2 \cdot \sin^2 \alpha = 1/2 \quad \sin^2 \alpha = 1/4 \quad \sin \alpha = 1/2 \quad \alpha = 30^\circ$$

quindi si dimostra che la pressione ricavabile dal nostro rivelatore di quota è ampiamente sufficiente per deflettere gli alettoni fino a 30° e quindi al di là delle limitazioni meccaniche di movimento dell'alettone stesso. Bisogna notare anche che l'eliminazione del fattore ρV^2 rende tutto il meccanismo indipendente dalla velocità, cosa molto intuitiva, dato che a basse velocità basta poca forza per muovere gli alettoni, e ad alta velocità le pressioni prodotte dal

rilevatore di quota aumentano considerevolmente, come anche la resistenza sull'alettone deflesso. Infatti la pressione prodotta dal misuratore di quota e quella prodotta sull'alettone sono ambedue proporzionali al quadrato della velocità, e quindi proporzionali anche tra loro, indipendentemente dalla velocità.

Un cenno sulla configurazione adottata. La potenza del sistema per muovere gli alettoni è, a parità di pressioni, proporzionale al volume del cilindro o della camera trapezoidale. Ne consegue che il cilindro non è la forma che può occupare il maggior volume all'interno di una struttura alare, che è appiattita, dove invece la forma di una camera trapezoidale si adatta perfettamente. Quindi, a meno di non trasferire il cilindro nello scafo del natante, con conseguenti problemi di trasmissione del moto agli alettoni molto lontani, occupare le strutture alari o di sostegno con dei cilindri ne avrebbe richiesti tanti accostati e di considerevole lunghezza rispetto al diametro, con pistoni così piccoli e con corsa così lunga, che i relativi leveraggi per trasmetterne il moto agli alettoni sarebbero stati di complessità incredibile. C'è da notare che l'alettone in questa configurazione ha una mobilità minore, con angoli di massima deflessione in alto e in basso comparabili all'angolo geometrico dell'alettone stesso, pochi gradi, meno di 5°. Ciò ci obbliga ad aumentare la superficie dell'alettone fino a che tutto il meccanismo occupi la metà posteriore dell'ala, con una conseguente corda dell'alettone pari al 25 % della corda alare.

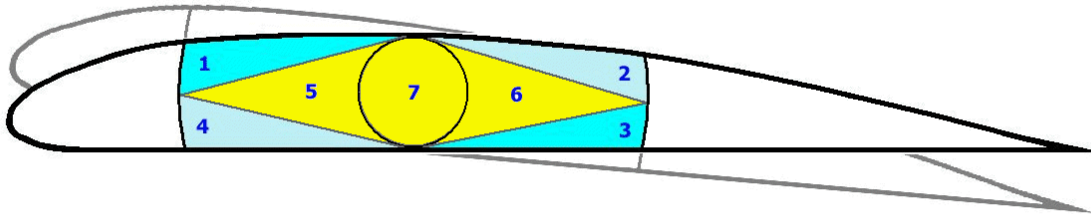
13/1/14 - Lezione 14

Utilizzare un alettone per cambiare la portanza è una soluzione pratica ed anche molto usata, ma altera la forma del profilo alare, diminuendone l'efficienza, che per le grandi angolazioni dell'alettone stesso può scendere alla metà. Considerando una efficienza di 22 per il profilo Clark Y che abbiamo scelto ci possiamo aspettare un valore dell'efficienza di $8 \div 12$ in situazioni critiche come il decollo, dove dobbiamo utilizzare la massima portanza. Ciò è dovuto essenzialmente alla presenza dell'angolo netto in corrispondenza della cerniera dell'alettone che obbliga il fluido ad un brusco cambio di direzione. Sugli aerei questo problema viene attenuato frazionando i flap in modo da avere due o tre angoli di ampiezza minore.

Per aumentare la portanza si può anche aumentare l'incidenza di tutta l'ala, perdendo sì un po' di efficienza, come si vede dalle curve caratteristiche del profilo esposte nella Lezione 6, specialmente alle basse incidenze, mentre alle alte incidenze questa diminuisce più lentamente, fino a scendere a 12 a 12° e ad 8 a 18° che sono incidenze molto elevate. La seconda (18°) è l'incidenza di portanza massima, utile al decollo. È chiaro che non è possibile raggiungere la portanza massima con gli alettoni o flap non frazionati, e nemmeno facendo assumere al battello una inclinazione di $18 - 0.5 = 17,5^\circ$ (essendo 0.5° l'incidenza di massima efficienza e quindi l'angolo di montaggio o di calettamento dell'ala), oppure con una combinazione dei due sistemi: aumento dell'incidenza dell'ala, e aumento dell'angolo di assetto di tutta l'imbarcazione.

La soluzione è quindi di rinunciare all'ala fissa, e di renderla mobile attorno ad un asse centrale (situato circa al 40% della corda, luogo del centro di pressione all'incidenza di massima efficienza). Come possiamo far muovere tutta l'ala attorno a questo asse centrale

orizzontale? Certamente non con i pistoni che abbiamo messo nei primi disegni, le forze in gioco ora sono molto più alte. Abbiamo bisogno di attuatori di grande superficie, come i cunei nelle camere trapezoidali, e di questi meccanismi ne possiamo usare addirittura due, occupando così la maggior parte del volume interno dell'ala (più della metà), come nella figura seguente:



dove i cunei 5 e 6 ed il tubo 7 sono fissi, e fanno da sostegno all'ala stessa, le camere 1 e 3 sono comunicanti tra loro e con la pressione variabile del misuratore di quota, infine le camere 2 e 4 sono comunicanti tra loro e con la sorgente di pressione di riferimento, così se aumenta la quota (l'ala tende a emergere), la pressione nelle camere 1 e 3 diminuisce mentre nelle camere 2 e 4 non cambia, facendo diminuire l'incidenza, quando invece diminuisce la quota (l'ala sprofonda), le camere 1 e 3 hanno pressione maggiore sempre rispetto alle camere 2 e 4, che aumenta l'incidenza (verso la posizione in grigio nella figura). La libertà di movimento che offre questa configurazione è tale che le posizioni estreme possono differire di un angolo maggiore di 20°.

La posizione del tubo 7 come abbiamo detto deve essere circa al 40% della corda alare, dalla parte anteriore di questa corda, perché in condizioni di crociera questa posizione coincide con il centro di pressione (il punto di applicazione del vettore 'portanza'), quindi c'è equilibrio dei momenti e l'ala non tende a ruotare. Inoltre questa è la zona di maggior spessore dell'ala, che ci permette maggiori volumi delle camere.

Alle basse velocità, e anche nella condizione di decollo, il centro di pressione si avvicina al bordo d'attacco (bordo alare anteriore), spostandosi circa al 30% della corda. Ciò produce un momento che aiuta ad aumentare l'incidenza aiutando lo sforzo necessario a ruotare l'ala. Questo potrebbe rendere instabile la posizione dell'ala in decollo mandandola alla massima deflessione verso l'alto (che noi comunque sceglieremo vicina all'incidenza di massima portanza, ma comunque il volume della camere trapezoidali ed il ridotto diametro dei condotti darà il giusto smorzamento a tutto il sistema perché questo movimento duri alcuni secondi. Una volta concluso il decollo la quota continua a salire (l'ala si avvicina alla superficie), la pressione nelle camere 1 e 3 diminuisce, e la pressione di riferimento costante nelle camere 2 e 4 deve vincere il momento dovuto al centro di pressione avanzato, ma ce la può fare senza problemi perché il centro di pressione stesso arretra man mano che l'incidenza diminuisce riducendo il momento che ne contrasta lo spostamento.

Alle alte velocità il centro di pressione si allontana verso il bordo d'uscita (bordo alare posteriore), producendo un momento che aiuta l'ala a ruotare verso le basse incidenze,

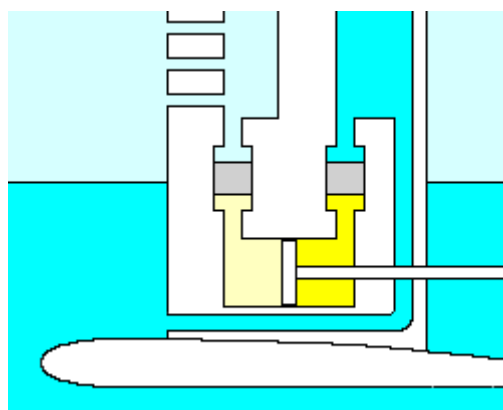
facendo quindi immergere l'ala più del dovuto, ed in conseguenza aumentando la pressione alle camere 1 e 3 che contrasta questa tendenza. Anche in questo caso ci può essere instabilità, provocando una oscillazione della quota, ma di nuovo il rapporto tra il diametro dei condotti ed il volume delle camere trapezoidali rallenta o addirittura immobilizza il movimento dell'ala generando lo smorzamento sufficiente ad impedire il fenomeno. Avremo cura di evitare che le eventuali oscillazioni di quota dovute a questa instabilità siano di periodo diverso rispetto al periodo del naturale beccheggio del sistema ali/massa dello scafo per evitare fenomeni di risonanza. L'instabilità ora descritta può essere attenuata usando anche gli alettoni, che con la loro deflessione aggiungono resistenza nella zona posteriore, verso il bordo di uscita, e quindi tendono a mantenere il centro di pressione più arretrato, vicino al perno di rotazione dell'ala, aumentando la stabilità.

L'uso della doppia combinazione: ala rotante + alettone aumenta la potenza del servomeccanismo, cosa che è utile in decollo, quando le incidenze e la portanza devono essere massime.

23/11/7 - Lezione 15

Naturalmente lasciar entrare l'acqua salata dentro un sistema idraulico richiede che i condotti e i cilindri siano di materiali adatti, quali l'acciaio inox, o anche le materie plastiche. C'è anche il pericolo di formazione di incrostazioni, che potrebbero ostacolare il movimento delle parti mobili (il pistone per esempio), questo problema potrebbe essere risolto non lasciando mai ristagnare l'acqua. In più c'è da considerare l'eventualità che i condotti siano otturati da corpi estranei, e per evitare ciò si applica il principio della tromba, o del megafono, che non si intasano mai, cioè il punto più stretto deve essere all'imboccatura. In tal modo un corpo estraneo, se riesce ad entrare, viene sicuramente espulso dalla corrente, che mantiene quindi liberi i condotti. Può accadere che un pezzo di vela o un sacchetto di plastica si avvolgano sul braccio di sostegno in corrispondenza dei fori d'entrata, ma in questo caso è facile liberarli con un rampino. La probabilità che si verifichi un tale inconveniente in mare aperto è infinitesima, molto minore che forare una gomma in auto. Se invece si viaggia in prossimità di una costa popolata le condizioni sono diverse, ma in questo caso si deve navigare a bassa velocità (in dislocamento) senza usare le ali.

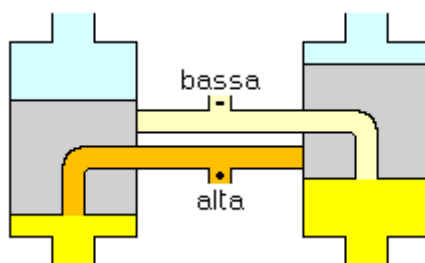
Ma la soluzione migliore è di isolare il sistema pistone-cilindro dall'acqua, inserendo dei pistoni-isolatori al di là dei quali c'è olio in un circuito chiuso. Se accettiamo una moderata complicazione del sistema idraulico possiamo aggiungere questa parte (facoltativa) come nella figura seguente:



I due pistoni grigi sono liberi di muoversi con la pressione dell'acqua che agisce sulla faccia superiore e spingono comunicando la stessa pressione all'olio con la faccia inferiore. Questo sistema è intuitivo ma ha due difetti:

- 1) il volume dei due cilindri di isolamento deve essere uguale o maggiore del volume del cilindro che contiene il pistone attuatore, moltiplicando almeno per tre il volume totale del sistema;
- 2) una piccola perdita di olio nella sezione del pistone attuatore a lungo andare farebbe scendere i due pistoni grigi a fondo corsa, immobilizzando il dispositivo.

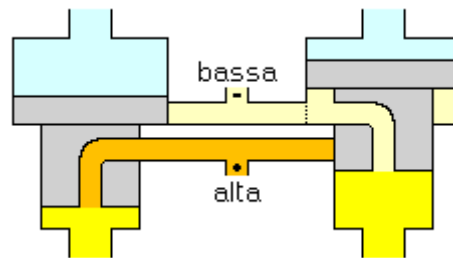
La soluzione di questo problema è di trasformare i due pistoni isolatori in servo-meccanismi che controllano il flusso dell'olio in alta pressione prodotta da una pompa. La configurazione è quella della figura seguente:



dove un condotto interno al pistone mette in comunicazione l'olio con un circuito ad alta pressione quando il pistone scende (la pressione dell'acqua aumenta), anche di una piccola frazione della corsa, e dall'altra parte con un circuito di recupero a bassa pressione quando questo sale (la pressione dell'acqua diminuisce), sempre con uno spostamento minimo, realizzando in questo modo un ripetitore di pressione automatico. Questa soluzione offre il vantaggio che il volume delle camere contenenti i servo-pistoni è minimo, e conserva l'isolamento e la protezione della porzione più delicata del meccanismo (il sistema pistone-attuatore-cilindro) che era la caratteristica che volevamo ottenere all'inizio.

L'olio può essere messo in pressione con una piccola pompa azionata da un'elica passiva posta vicino al meccanismo, nell'ala sommersa. Si può anche ridurre il volume del sistema cilindro-pistone attuatore aumentando la pressione dell'olio con dei servo-pistoni di

diametro differente: maggiore nella camera d'acqua e minore nella camera ad olio come nella figura seguente:

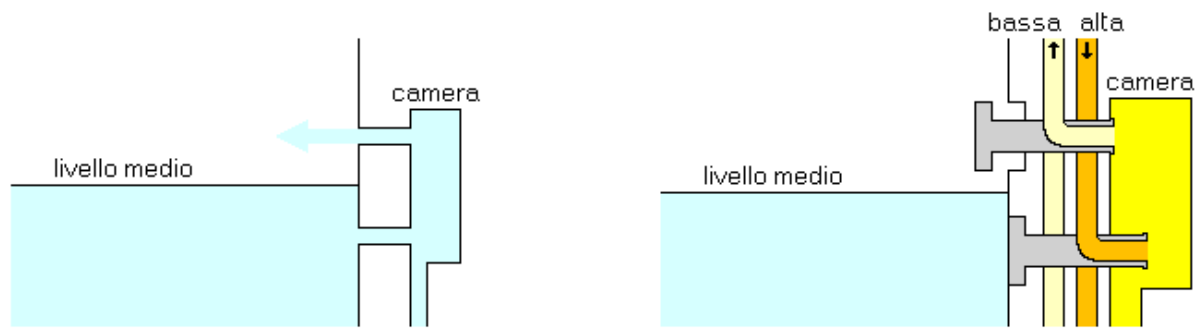


Il pistone qui è fatto a forma di 'chiodo' dove la camera di diametro maggiore ha una pressione minore, e quella a diametro minore ha una pressione superiore. Con un rapporto 2:1 tra i diametri abbiamo una proporzione inversa di 1:4 tra le pressioni, riducendo nella stessa proporzione tutti i volumi del meccanismo. La camera anulare che si forma quando il servo-pistone sale deve essere a pressione nulla, quindi in comunicazione con il ritorno della pompa dell'olio, indicato come 'bassa pressione' nella figura, altrimenti non sarebbe possibile muovere il pistone.

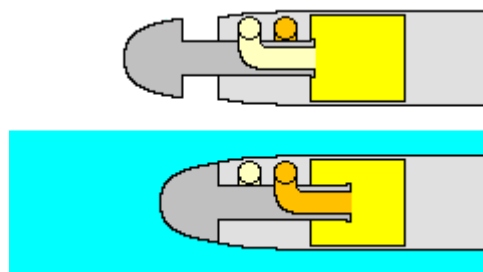
24/1/14 - Lezione 16

Se vogliamo una protezione maggiore, con isolamento completo del sistema idraulico dall'acqua, e sostituirla completamente con l'olio, passiamo ad un'altra configurazione. Se si vuole evitare il contatto dell'acqua di mare con l'interno di questo sistema idro-meccanico possiamo sostituire i condotti di entrata e di uscita (i nostri sensori) con dei pulsanti, azionati dalla pressione di stagnazione (dovuta alla velocità di avanzamento), che controllano il circuito separato di olio pressurizzato da una pompa meccanica. Il concetto è molto semplice: invece di usare la pressione dell'acqua per alimentare le camere si interpone un pulsante, che è un piccolo pistone, che, quando è spinto indietro, mette la camera di compensazione in comunicazione con il condotto di olio in pressione, e quando è emerso, e quindi in posizione avanzata (a causa della pressione della stessa camera di compensazione), mette questa camera in comunicazione con il circuito di ritorno dell'olio a pressione nulla. Questa è una funzione analoga a quella dei due servo-pistoni visti prima nella configurazione più semplice. Se la pressione di alimentazione dell'olio è analoga a quella di stagnazione nell'acqua, si ha una sostituzione dei flussi d'acqua, entranti e uscenti dalla camera, con dei flussi d'olio a circuito chiuso, la cui purezza è facilmente controllabile.

Nella figura che segue si vede la trasformazione del sensore a due fori (tre livelli) nel servo-sensore idraulico: il colore arancio indica il circuito ad alta pressione, il giallo chiaro il circuito di ritorno a bassa pressione, in realtà è a pressione nulla o addirittura in depressione a causa della pompa che da quella parte aspira l'olio. La camera di compensazione assume una pressione intermedia (colore giallo).



I pistoni in grigio sono mobili, scorrono in una cavità cilindrica che sbocca nella camera di compensazione. La pressione di questa camera tende a spingere in fuori i pistoni che sono liberi, ma non è sufficiente per spingere fuori quelli immersi, anche perché la pressione dinamica dovuta al moto si esercita su una superficie maggiore, la testa del pistone che ha un diametro maggiore del gambo. Infatti il pistone è fatto come un chiodo, ha una testa più grande della cavità cilindrica dove è inserito. Ciò è necessario perché altrimenti la pressione dinamica lo spingerebbe all'interno della camera di compensazione lasciando entrare l'acqua. Per la stessa ragione è necessario un anello di ritenzione all'altra estremità del pistone, altrimenti la pressione della camera lo spingerebbe fuori, se è emerso, lasciando uscire l'olio. La testa esterna del pistone ha nel piano orizzontale un profilo identico al profilo del piede di sostegno, che ha una forma alare, per diminuire la resistenza all'avanzamento, come si vede nella figura seguente che mostra la posizione del pistone emerso (in alto) e di quello immerso (in basso) in una sezione orizzontale (vista dall'alto).



I colori arancio, giallo e giallo chiaro rappresentano le diverse pressioni dell'olio, dalla più alta alla più bassa, mentre il colore celeste rappresenta l'acqua quando il pistone è immerso (immagine inferiore). In grigio scuro sono i pistoni mobili, ed in grigio chiaro il corpo del piede di sostegno dell'ala. Nella posizione arretrata la testa dei pistoni immersi completa questo profilo per non provocare resistenza aggiuntiva. I pistoni liberi non partecipano alla resistenza perché sono fuori dall'acqua (immagine superiore), quindi la loro posizione avanzata, che non corrisponde più al profilo alare del piede di sostegno, non disturba. Questo meccanismo è di una complessità maggiore di quello visto prima, perché invece di due soli servo-pistoni ripetitori-isolatori, ne ha 10 o più, tanti quanti erano i condotti della camera di misura anteriore che vanno a sostituire. Per la camera posteriore, quella di

riferimento, ne servirebbero altri due, ma dato che sono, quello inferiore, sempre compresso perché immerso, e l'altro, quello superiore, sempre libero perché emerso, è inutile avere due pistoni che non si muovono mai, basta semplicemente mettere in comunicazione questa camera di compensazione posteriore (quella di riferimento) con la mandata e con il ritorno della pompa. Questa camera si stabilizzerà allora ad una pressione intermedia, come richiesto.

Abbiamo detto che il pistone è fatto a forma di chiodo, con una superficie più grande esposta al flusso d'acqua, ed una più piccola che comprime l'olio. Il rapporto tra queste due aree ci dà anche il rapporto tra le pressioni dei due fluidi. Infatti le due pressioni saranno inversamente proporzionali alle dette superfici, quindi ai quadrati dei diametri. Per esempio per un rapporto tra i diametri di 2:1 ci sarà un rapporto di pressioni di 1:4 (inversamente proporzionale alle superfici, quindi al quadrato dei diametri). Questa è una caratteristica analoga a quella dei servo-pistoni del sistema semplificato che abbiamo visto prima, che riduce le dimensioni del sistema ad alta pressione in olio, contrariamente a quello che sembra nelle due figure precedenti, dove la maggior complicazione del sistema ad olio richiede un disegno più grande.

Questo circuito a causa della sua complessità è quindi anch'esso facoltativo, il suo costo è infatti giustificato solo per le imbarcazioni più grandi.

Quanto esposto in questo progetto è materia di una domanda di brevetto (N. di deposito: 102015000076015 del 24/11/2015).

Aggiornato il 16/5/2013, il 18/7/2013, il 23/1/2014 e il 30/4/2015.