

Monografie di Costruzioni Aeronautiche

Gli ipersostentatori

I sistemi di alta portanza: come l'ala impara ad adattarsi

Prof. Ing. Biagio Raucci

ITIS «E. Majorana»

Monografie di Costruzioni Aeronautiche



Di che cosa parleremo

Dove stiamo andando

Queste slide accompagnano la monografia *Gli ipersostentatori* della Serie Raucci: stessa strada, passo più veloce. Per lo studio completo (dimostrazioni, tabelle estese, commenti) resta il testo.

1. Perché esistono gli ipersostentatori
2. I dispositivi del bordo di uscita
3. I dispositivi del bordo di attacco
4. Posizionamento in apertura e superfici mobili
5. Valutare i numeri: il metodo semi-empirico
6. I sistemi attivi

Gli esercizi svolti passo passo — sei, con i numeri alla mano — sono nella monografia: qui teniamo il filo del discorso.

Parte 1

Perché esistono gli ipersostentatori

1

Due vite per lo stesso velivolo

Un velivolo da trasporto moderno vive due vite completamente diverse:

- in **crociera** vola a 850 km/h a undicimila metri di quota;
- pochi minuti prima di toccare la pista, *lo stesso velivolo* si sostiene sotto i 250 km/h.

La stessa ala deve servire bene entrambe le condizioni — e le due condizioni chiedono cose **opposte**.

Definizione

I **dispositivi di ipersostentazione** (*high-lift devices*) sono organi, fissi o mobili, che modificano temporaneamente la geometria dell'ala per aumentarne la capacità portante alle basse velocità: una *geometria variabile*.

Il conflitto, scritto in una riga

In volo livellato la portanza uguaglia il peso:

L'equilibrio del volo livellato

$$L = W = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L$$

Fissato il peso W (e la quota), il prodotto $V^2 C_L$ è sostanzialmente costante: *velocità alta* $\Rightarrow C_L$ *piccolo*; *velocità bassa* $\Rightarrow C_L$ *grande*.

Da qui nascono due famiglie di requisiti in conflitto: vediamole una accanto all'altra.

Requisiti in conflitto

Crociera — alta velocità

- superficie S piccola, cioè alto carico alare W/S : un'ala piccola pesa meno e resiste meno;
- profili a piccola curvatura;
- bassa resistenza aerodinamica;
- portanza generata con *bassi* C_L .

Decollo e atterraggio — bassa velocità

- alto $C_{L_{\max}}$ e ampia superficie alare;
- velocità di stallo la più bassa possibile;
- resistenza *bassa* al decollo (serve accelerare) ma *alta* in atterraggio (serve decelerare);
- assetti a cabrare limitati, per la visibilità del pilota.

Nei velivoli da combattimento entra un terzo attore, la *manovrabilità*: ha dispositivi dedicati, le LEX.

La posta in gioco: la velocità di stallo

Il limite di sostentamento si ha al C_L massimo; invertendo:

Velocità di stallo

$$V_s = \sqrt{\frac{2W}{\rho S C_{L\max}}}$$

V_s va come $1/\sqrt{C_{L\max}}$: raddoppiare il $C_{L\max}$ abbassa la velocità di stallo del 29 % circa.

Da ricordare

V_s fissa le velocità delle fasi lente ($V_{app} = 1,3 V_s$, $V_{LOF} = 1,1 V_s$): guadagnare $C_{L\max}$ è guadagnare pista.

Attenzione ai limiti del modello

Attenzione

$V_s = \sqrt{2W/(\rho S C_{L\max})}$ è un modello di *equilibrio quasi-statico*: vale per volo rettilineo, uniforme, con fattore di carico unitario. In virata o in richiamata la velocità di stallo cresce con $\sqrt{n}$. E stiamo trattando il $C_{L\max}$ come una proprietà nota: tutto il lavoro che segue serve proprio a capire *da dove viene* quel valore.

Classificazione dei sistemi di ipersostentazione

Sistemi passivi

Nessuna energia dal propulsore.

- **bordo di uscita** (TE): aumentano la curvatura e, se estendibili, la superficie;
- **bordo di attacco** (LE): prevengono la separazione al naso.

Sistemi attivi

Richiesti da STOL e VTOL: usano flussi dal motore.

- soffiamento sui flap, interno o esterno;
- soffiamento sul dorso (USB);
- getto orientabile.

Divisione dei compiti

I TE servono a *ottenere* il $C_{L_{\max}}$ richiesto; i LE a *garantire il margine* rispetto allo stallo.

Parte 2

I dispositivi del bordo di uscita

2

La galleria dei flap: i più semplici

Plain flap — flap semplice

- porzione posteriore incernierata che ruota in basso: lo stesso schema di alettoni e spoiler;
- il più semplice in assoluto, ma sensibile alla *tenuta della cerniera*;
- tipico dei piccoli velivoli (Cessna 172) o delle ali sottili;
- deflessioni: $\sim 20^\circ$ al decollo, fino a 60° all'atterraggio.

Split flap — flap a intradosso

- ruota solo un pannello del *ventre*: il dorso resta fisso;
- insensibile alla tenuta della cerniera. . .
- . . . ma *alta resistenza*: tra pannello e dorso si forma una scia turbolenta;
- oggi non più usato: lo si incontra sui velivoli storici.

La galleria dei flap: la fessura e l'estrazione

Slotted flap — con fessura

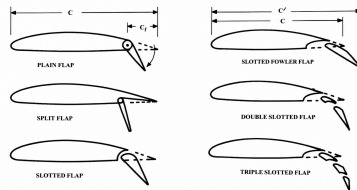
- ruotando apre uno *slot*: aria in pressione dal ventre viene guidata sul dorso del flap;
- lo strato limite, *energizzato*, resta attaccato fino a deflessioni ben maggiori;
- esempio: Cessna Citation, 20° decollo / 40° atterraggio.

Fowler flap — estraibile

- il salto di qualità: il flap è *prima estratto* all'indietro, *poi ruotato*;
- l'estrazione aumenta la superficie, la rotazione la curvatura: due effetti che si sommano;
- in decollo si usa l'estrazione *senza rotazione*: superficie in più, resistenza quasi invariata.

La galleria dei flap: doppie e triple fessure

- **Double e triple slotted flap:** ogni fessura aggiuntiva rienergizza il flusso e consente deflessioni totali maggiori prima della separazione — a prezzo di peso e complessità;
- il triplo slot (celebre sul B737 classico) *non è più usato* nei progetti recenti: la tendenza moderna (B777, A320) è tornare a fessure singole o doppie, ottimizzate con la CFD;
- elementi ausiliari reali: il **vane** (profilino deflettore che precede il flap, come nell'MD-80) e il **tab** (elemento aggiuntivo al retro del flap, come nel B777).



Le sezioni tipiche dei dispositivi TE.

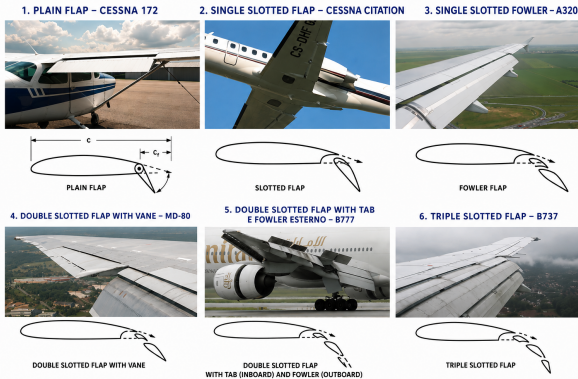
Chi monta che cosa

Dispositivo	Applicazioni tipiche	δ_f decollo	δ_f atterraggio
Plain flap	Cessna 172, aviazione leggera	$\sim 20^\circ$	fino a 60°
Single slotted	Cessna Citation	20°	40°
Single slotted Fowler	A320, A300, A340, B767, B777 (est.)	15°	40°
Double slotted (vane)	A310 (int.), MD-80, MD-11	20°	50°
Double slotted (tab)	A321, B757, B767 (int.), B777 (int.)	20°	50°
Triple slotted	B727, B737, B747	20°	40°

Nota

La regolarità: *al decollo deflessioni parziali, in atterraggio piene.* E nelle voci a doppia/tripla fessura la *slat* è deflessa in coppia: LE e TE lavorano insieme.

Gli esempi reali



Cessna 172 (plain); Citation (single slotted); A320 (Fowler); MD-80 (vane); B777 (tab); B737 (triple).

Due numeri nel taschino del progettista

Corda del flap

$$\frac{c_f}{c} \simeq 0,30$$

La corda del flap vale tipicamente il 30 % della corda della sezione.

Regola dell'80%

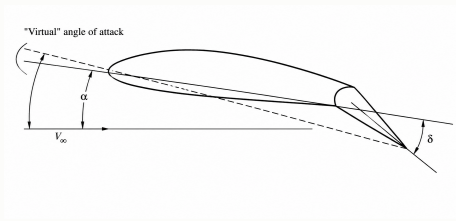
$$C_{L\max}^{TO} \simeq 0,80 C_{L\max}^{LAND}$$

Al decollo i flap non sono deflessi del tutto: l'eccesso di resistenza penalizzerebbe l'accelerazione.

In atterraggio, invece, deflessione massima: lì l'eccesso di resistenza non è un problema — anzi, aiuta a frenare.

Perché il flap funziona: i tre meccanismi fisici

1. **angolo di attacco virtuale aumentato:** la deflessione ruota la congiungente dei bordi; a parità di assetto il profilo “vede” la corrente con incidenza efficace maggiore;
2. **curvatura totale aumentata:** il profilo flappato è più curvo e a parità di incidenza porta di più (α_{0L} si sposta verso valori più negativi);
3. **superficie aumentata (Fowler):** più metri quadrati, più portanza *riferita alla superficie originaria*.



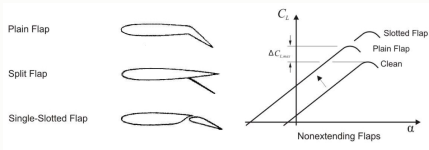
La deflessione δ ruota la congiungente dei bordi e aumenta l'angolo di attacco “virtuale” rispetto alla corda originaria.

Effetto dei dispositivi TE sulla curva di portanza

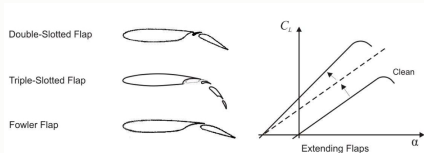
I dispositivi del bordo di uscita:

1. **aumentano la portanza a dato angolo di attacco** (la curva trasla in alto: effetto curvatura);
2. **non aumentano l'angolo di stallo — spesso lo riducono**: il profilo flappato, più caricato, separa prima;
3. **aumentano il $C_{L_{\max}}$** , che è lo scopo del gioco.
 - negli *slotted*: lo slot energizza il flusso $\Rightarrow$ a parità di deflessione, $C_{L_{\max}}$ maggiore del plain flap;
 - nei *Fowler*: la pendenza della curva **cresce** del fattore S'/S — motivo contabile prima che aerodinamico: i coefficienti restano riferiti a S , ma la portanza la genera la superficie estesa $S' > S$.

La curva, vista in faccia



Flap non estendibili: la curva trasla in alto, il $C_{L_{max}}$ cresce, l'angolo di stallo cala.



Flap estendibili: la superficie in più aumenta anche la pendenza.

Attenzione

Errore frequente: credere che il flap faccia stallare *più tardi*. È il contrario: fa stallare prima (angolo minore) ma più in alto (C_L maggiore).

Parte 3

I dispositivi del bordo di attacco

3

Il problema, e i due meccanismi

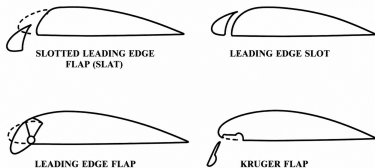
Il flap ha alzato la curva di portanza ma ha *anticipato* lo stallo: ora bisogna proteggere il bordo di attacco, dove il flusso, ad alta incidenza, tende a separarsi. I dispositivi LE agiscono in due modi:

1. **muovendo il bordo di attacco verso il flusso** (punto di ristagno più in alto): il naso “incontra” la corrente con dolcezza e il picco di aspirazione si attenua;
2. **energizzando lo strato limite sul dorso**: attraverso una fessura, aria ad alta pressione dal ventre rinvigorisce lo strato limite, che resiste meglio al gradiente avverso.

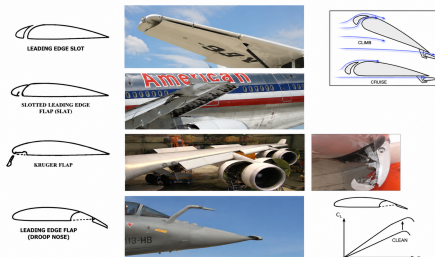
La galleria dei dispositivi LE

- **Leading edge slot (fisso):** fessura fissa vicino al naso, puro meccanismo 2, senza parti mobili. Tipico dei velivoli STOL; a volte richiudibile in crociera.
- **Slat:** elemento mobile che si estende in avanti e in basso aprendo una fessura — combina *entrambi* i meccanismi e aumenta anche curvatura e superficie.
- **Leading edge flap (droop nose):** l'intero naso ruota in basso — meccanismo 1 senza fessura. Diffuso sui caccia con ali sottili.
- **Kruger flap:** pannello incernierato sul ventre del naso, si apre in avanti come una paletta. *Il più comune*, per l'architettura semplicissima: nessuna guida curva, solo una cerniera (B747, tratto interno).

Le sezioni e gli esempi reali



Sezioni LE: slat, slot fisso, droop nose, Kruger.



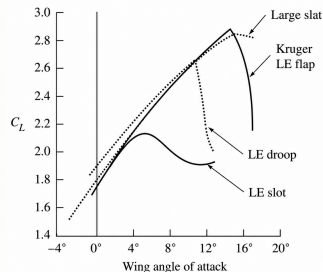
Slot fisso su STOL; slat A300 e Mirage 2000; Kruger del B747; droop nose

La gerarchia dei dispositivi LE

La **slat** è il più efficace: alza il $C_{L_{max}}$ e l'angolo di stallo. È su tutti i liner moderni.

Effetto dei dispositivi LE sulla curva di portanza

1. **estendono la parte lineare** della curva verso $C_{L_{max}}$ e angoli maggiori: è la “protezione” dello stallo;
2. **spostano la curva verso angoli maggiori**: la curvatura cresce, ma prevale la riduzione dell'incidenza locale al naso;
3. **le slat aumentano anche la pendenza**: estendendosi aumentano la superficie, come il Fowler.



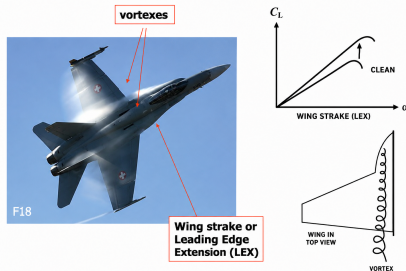
La parte lineare si prolunga; lo stallo si sposta ad angoli e C_L maggiori.

Un parente da manovra: la LEX

Sui caccia (il classico è l'F-18) il bordo di attacco si prolunga verso prua in una superficie sottile e molto a freccia: la **Leading Edge Extension (LEX)**, o *wing strake*. Ad alta incidenza genera *vortici* intensi e stabili che spazzano il dorso, vi tengono attaccato il flusso e producono portanza essi stessi: la curva si prolunga oltre lo stallo dell'ala pulita.

Nota

Efficace sopra i 20° : è un dispositivo di *manovra*.



F-18 ad alta incidenza: la condensazione rende visibili i vortici delle LEX.

Parte 4

Posizionamento in apertura e superfici mobili

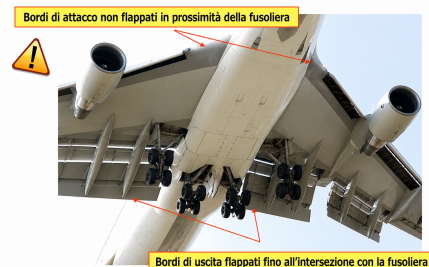


Dove si mettono i dispositivi: la regola dello stallo

Guardando dal basso un quadrigetto in configurazione di atterraggio si nota un'asimmetria istruttiva:

- i **bordi di attacco non sono flappati vicino alla fusoliera**: slat e Kruger partono più esterni;
- i **bordi di uscita sono flappati fino alla fusoliera**.

È un modo di far stallare l'ala alla radice, mai all'estremità: la radice, non protetta al bordo d'attacco, separa per prima; l'estremità, protetta, continua a portare.



Quadrigetto dal basso: LE non flappato alla radice, TE flappato fino alla fusoliera.

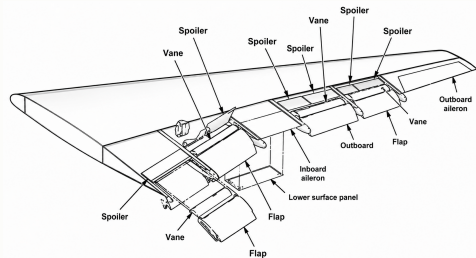
Perché lo stallo alla radice? Tre ottime ragioni

Osservazione — lo stallo va pilotato

1. **gli alettoni stanno all'estremità**: se questa stalla per prima si perde il controllo laterale nel momento peggiore;
2. **la scia della radice stallata investe la coda** e scuote il velivolo (*buffeting*): un preavviso naturale di stallo per il pilota;
3. **lo stallo d'estremità su ala a freccia** sposta il centro di pressione in avanti e tende a cabrare ulteriormente (*pitch-up*): comportamento divergente, da evitare assolutamente.

Il bordo di uscita è affollato

Sul bordo d'uscita di un liner convivono flap (interni ed esterni, con vane), alettoni (interno ed esterno) e spoiler in più sezioni. La disposizione non è casuale: risponde a una logica aerodinamica e aeroelastica che vediamo nelle prossime slide.



Tipica disposizione delle parti mobili sul bordo di uscita (fonte Niu).

Gli alettoni e l'inversione dei comandi

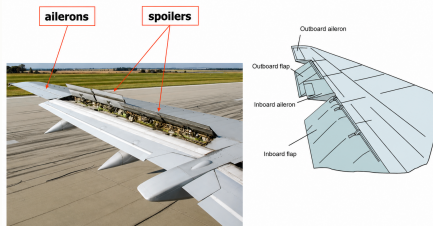
- collocati tipicamente **tra il 50 e il 90% dell'apertura**: vicino all'estremità il braccio rispetto all'asse di rollio è grande, e bastano superfici piccole;
- meccanicamente un alettone è un plain flap (stessa sensibilità alla tenuta della cerniera);
- i subsonici veloci hanno spesso **due coppie**: alettoni *interni* di alta velocità, *esterni* di bassa velocità.

Attenzione — aileron reversal

Ad alta velocità l'incremento di portanza dell'alettone esterno deflesso — applicato dietro l'asse elastico — *torce* l'ala abbassandone il bordo d'attacco; le sezioni possono arrivare a incidenza negativa e il velivolo rolla *dalla parte opposta* a quella comandata. In alcuni velivoli, ad alta velocità, gli alettoni esterni sono addirittura bloccati.

Gli spoiler

- pannelli sul dorso che, alzandosi, “rovinano” (*to spoil*) il flusso e distruggono portanza;
- ad alta velocità gli *interni* lavorano asimmetricamente per il rollio (al posto degli alettoni esterni bloccati);
- funzione principale: **lift dumping** dopo il contatto. Estesi simmetricamente evitano il rimbalzo e scaricano il peso sui carrelli, rendendo efficace la frenata (comando automatico all’inizio della rotazione delle ruote).



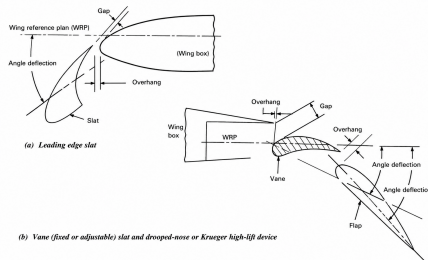
Spoiler (martinetti in vista) e alettoni sul bordo di uscita.

Il cuore fluidodinamico: il progetto dello slot

L'efficienza dei dispositivi a fessura dipende dalla messa a punto dei canali fra le parti: *gap*, *overhang*, deflessione di ciascun elemento. Obiettivo: tenere alti i picchi di pressione sul dorso lasciando passare aria dal ventre. Equilibrio delicato — slot stretto, poca energia; troppo largo, il getto si stacca.

Osservazione

Ben progettato, uno slot dà più portanza e meno resistenza di un plain flap pari deflesso: qui servono galleria e CFD.



Gap, overhang e deflessioni per slat e flap con vane, riferiti al piano di riferimento dell'ala (WRP).

Parte 5

I sistemi attivi di incremento della portanza

5

Quando i passivi non bastano

Quando il $C_{L_{max}}$ richiesto **supera** 3,5 — 4 — limite superiore, di fatto, dei sistemi passivi — occorre cambiare strategia: usare l'energia del propulsore. È il territorio di STOL e VTOL.

- **Vectored thrust:** la spinta è orientata verso il basso da ugelli ruotabili; la portanza viene, in parte o del tutto, direttamente dal getto (Sea Harrier; X-35/F-35B con ventola di sostentamento). Al limite: decollo e atterraggio verticali.
- **Upper Surface Blowing (USB):** motori *sopra* l'ala, gas di scarico sul dorso; per effetto Coandă il getto segue dorso e flap abbassato ed è deviato in basso (YC-14, An-72). Prezzo: flap localmente in acciaio per alte temperature.
- **Externally Blown Flaps (EBF):** motori sotto l'ala, flap a fessure estesi *dentro* il getto: parte del flusso passa le fessure ed è deviata in basso (YC-15 e il suo derivato di serie C-17, che opera da piste corte e semipreparate nonostante la stazza).

I sistemi attivi, in immagini



Vectored thrust (Sea Harrier, X-35); Upper Surface Blowing (YC-14, An-72); Externally Blown Flaps (YC-15, C-17).

Perché il limite sta proprio lì

Approfondimento — perché $C_{L\max} \simeq 3,5 - 4$?

Il massimo carico che un profilo può sostenere è limitato dal picco di aspirazione tollerabile al bordo d'attacco prima della separazione. Moltiplicare fessure ed elementi sposta il limite, ma con rendimenti rapidamente decrescenti — e peso e complessità crescenti: il triplo slot insegna. Oltre quel confine, l'unico modo di aggiungere quantità di moto al flusso è prenderla dal motore: per questo tutti i sistemi oltre il limite sono, per necessità, *attivi*.

Gli esercizi: dove trovarli e in che ordine farli

Dove stiamo andando

Gli esercizi svolti passo passo stanno nella monografia, con tutti i conti sviluppati e commentati. Qui l'elenco, nell'ordine in cui conviene affrontarli: ciascuno riprende i risultati del precedente.

1. la velocità di stallo con e senza ipersostentatori (V_s , V_{app});
2. lo spostamento $\Delta\alpha_{0L}$ di un plain flap deflesso a 40° ;
3. l'incremento ΔC_{Lmax}^{TE} di Fowler su ala a freccia.
4. l'incremento ΔC_{Lmax}^{LE} dovuto alle slat;
5. la curva completa: C_{Lmax} dell'ala flappata e velocità di approccio;
6. la regola dell'80 % e la corsa di decollo.

Tutti i valori numerici della monografia sono verificati con uno script Python allegato alla collana.

Il senso di tutto questo

Il senso di tutto questo

Un'ala efficiente in crociera è, per costruzione, un'ala inadatta alle basse velocità. Gli ipersostentatori le danno una geometria variabile: *i dispositivi TE costruiscono il $C_{L\max}$* (curvatura e, nei Fowler, superficie: la curva sale, lo stallo si anticipa); *i dispositivi LE difendono lo stallo* (la parte lineare si prolunga; la slat regala anche pendenza). La disposizione in apertura governa *dove* l'ala stalla per prima (alla radice, mai all'estremità); alettoni e spoiler convivono coi flap secondo una logica anche aeroelastica. E oltre $C_{L\max} \simeq 3,5 - 4$ si passa ai sistemi attivi.

La prossima volta che vedrete un'ala “smontarsi” in approccio — slat in avanti, Fowler che si sfilano aprendo le fessure, spoiler su al tocco — saprete leggere ogni pezzo: a che cosa serve, quanto vale in punti di C_L e quanti metri di pista fa risparmiare.

Riferimenti

- J. D. Anderson, *Introduction to Flight*, McGraw-Hill — principi di funzionamento ed effetti sulla curva di portanza.
- J. D. Anderson, *Aircraft Performance and Design*, McGraw-Hill — legame con le prestazioni di decollo e atterraggio.
- T. C. Corke, *Design of Aircraft*, Prentice Hall — metodo semi-empirico (figg. 8.10, 8.11, 9.3, 9.4, 9.5, 9.18; tabb. 8.2, 8.3).
- M. C. Y. Niu, *Airframe Structural Design*, Conmilit Press — disposizione delle parti mobili e progetto dei dispositivi a fessura.

Monografie di Costruzioni Aeronautiche ■ la monografia completa è sul portale del corso .