
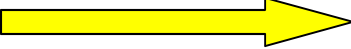




# IL DESIGN AERONAUTICO



# ASPETTI GENERALI

La progettazione aeronautica coinvolge una notevole serie di aspetti molto diversi tra loro e tutti ugualmente importanti:

- et* Aerodinamica  velocità, consumi, forme
- et* Strutture  resistenza, producibilità
- et* Motori  prestazioni, rumore
- et* Sistemi  sicurezza, operatività

Un buon concetto strutturale inizia già nella fase di design preliminare a incorporare tutti questi fattori alla ricerca del



**COMPROMESSO IDEALE**

La responsabilità della ricerca di questo compromesso e dell'estensione delle concessioni da fare ai singoli aspetti del design ricade sul **progettista** che dovrà:

*et* familiarizzare con le specifiche del velivolo che si intende progettare

*et* conoscere a fondo le esigenze del cliente o dei clienti finali

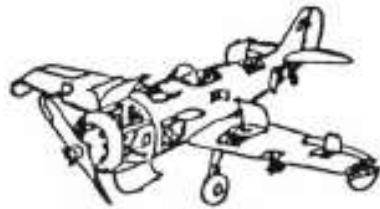
*et* studiare con animo critico le soluzioni adottate da tutti i velivoli della stessa categoria al fine di trarre il massimo dall'esperienza altrui

Il **progettista** così come è stato definito spesso non è una persona fisica ma un team di lavoro che può comprendere anche centinaia di persone

Per una perfetta integrazione tra le diverse funzioni è però necessario che ognuno sia consapevole del proprio ruolo e di quello altrui e si comporti

**“da progettista”**

# IL PROBLEMA DA EVITARE...



SERVICE GROUP



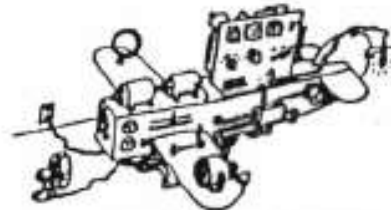
EQUIPMENT GROUP



ARMAMENT GROUP



WING GROUP



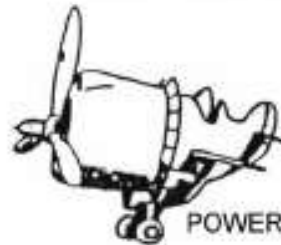
ELECTRICAL GROUP



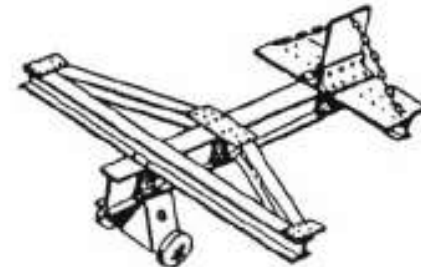
AERODYNAMICS GROUP



EMPENNAGE GROUP



POWER PLANT GROUP



STRESS GROUP

# Gli strumenti informatici

*et* Sistemi CAD (CATIA, CADD5, THINK3...)

*et* Sistemi FEM (NASTRAN, ANSYS, ProE...)

*et* Sistemi CAM

*et* Codici per l'aerodinamica

*et* Software dedicati (compositi, motori, impianti...)

Tutti questi strumenti aumentano la produttività, la creatività e l'integrazione eliminando la parte ripetitiva della progettazione

# LA STORIA E LO SVILUPPO DELL'AERONAUTICA

- 17 dicembre 1903 - PRIMO VOLO

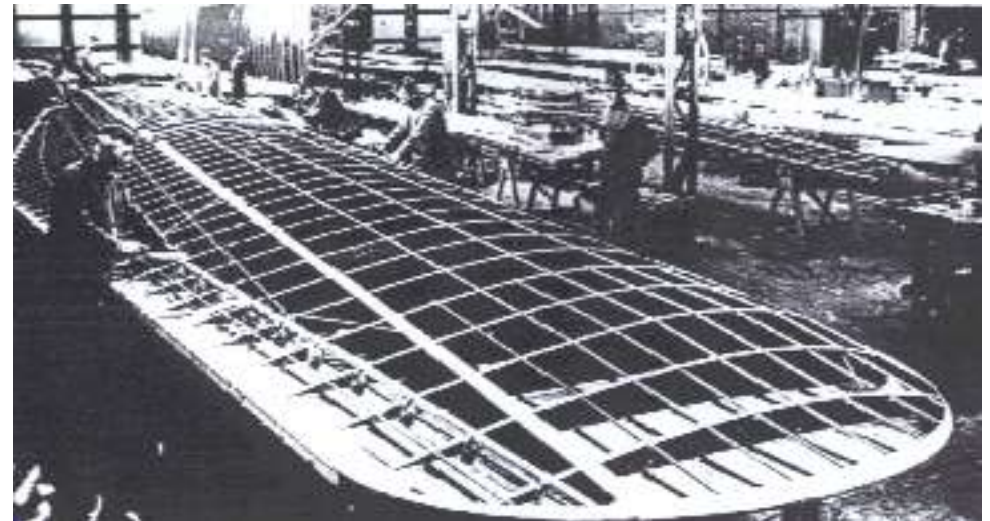


- 1905 - Voisin: la prima fabbrica di aeroplani
- 1909 - primo meeting internazionale dell'aviazione

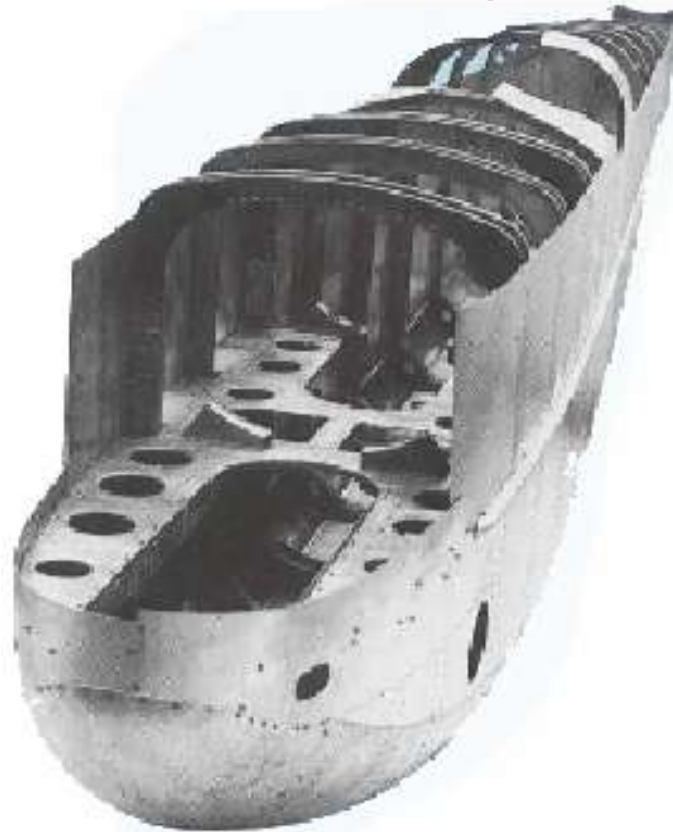




FOKKER F7a



- 1913 - "Heavier than air": Dornier RS I
- 1914-1918: La prima guerra mondiale
- 1920-1930: Full metal concept



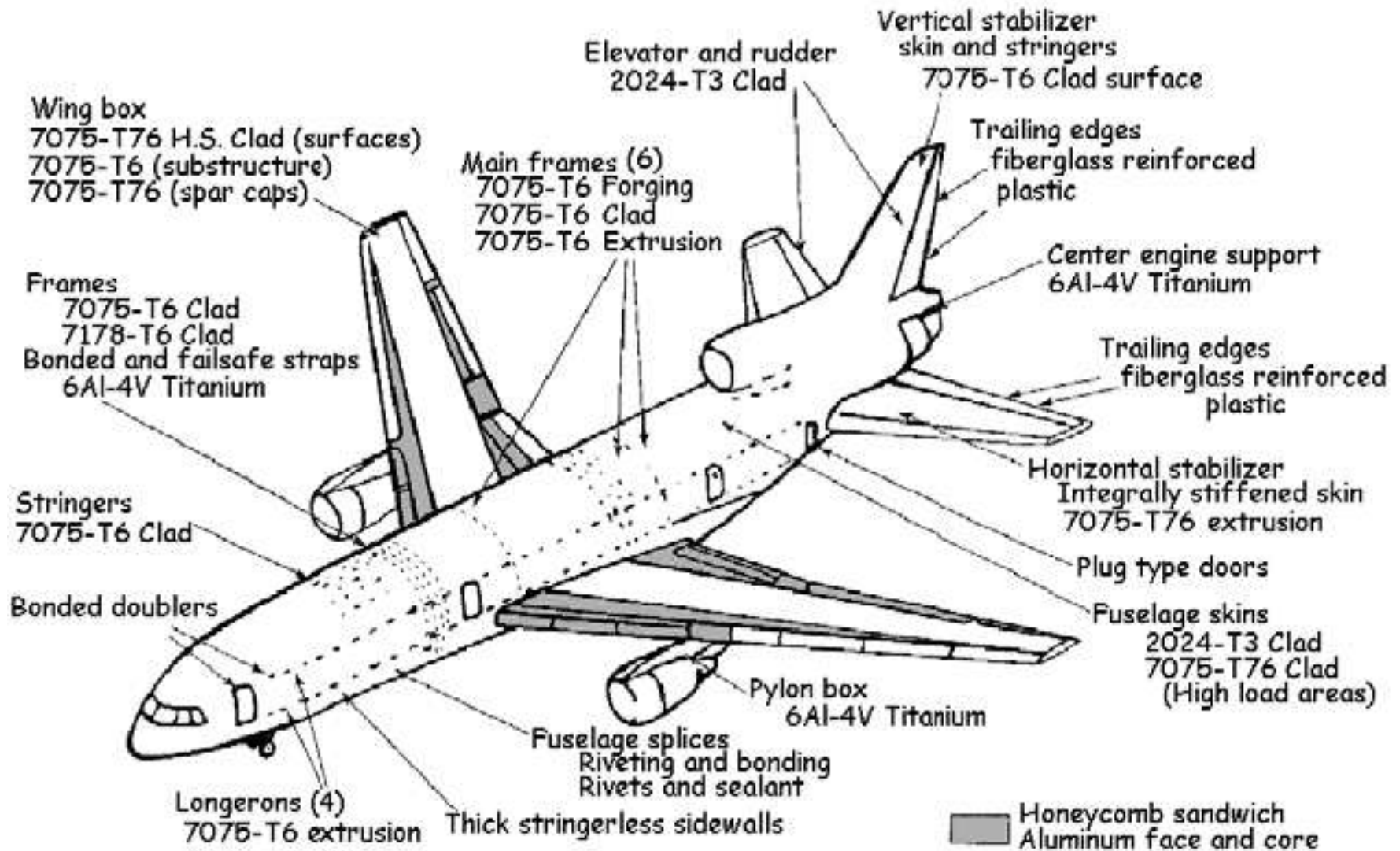
- 1930-1940: Lo sviluppo del trasporto aereo - il DC3

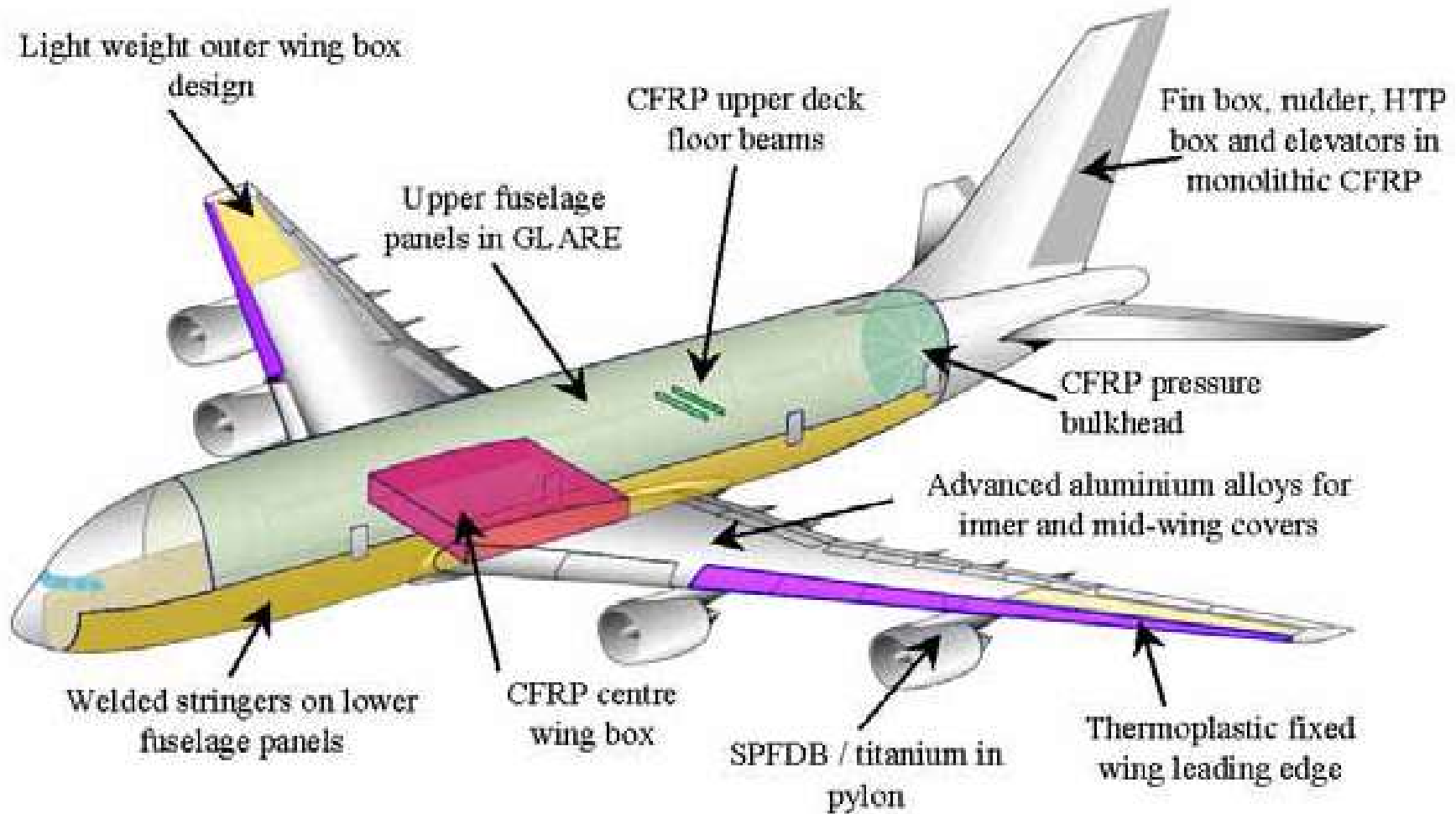


- 1939-1945: La seconda guerra mondiale



- 1945-1955: La riconversione e i primi jet
- 1955-oggi: L'innovazione costante
  - strutture fail safe
  - l'avionica
  - i materiali compositi





# CFRP pressure bulkhead A340



# PANNELLO IN GLARE





# PANNELLO IN GLARE

GLARE demonstrator panel on  
Luftwaffe A310 Multi Role Transporter



First flight 4 October 1999, Hamburg

# LA FILOSOFIA

Quali sono i requisiti strutturali cui deve rispondere un aereo?

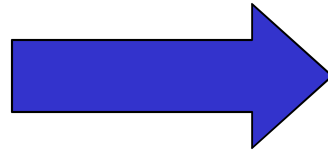
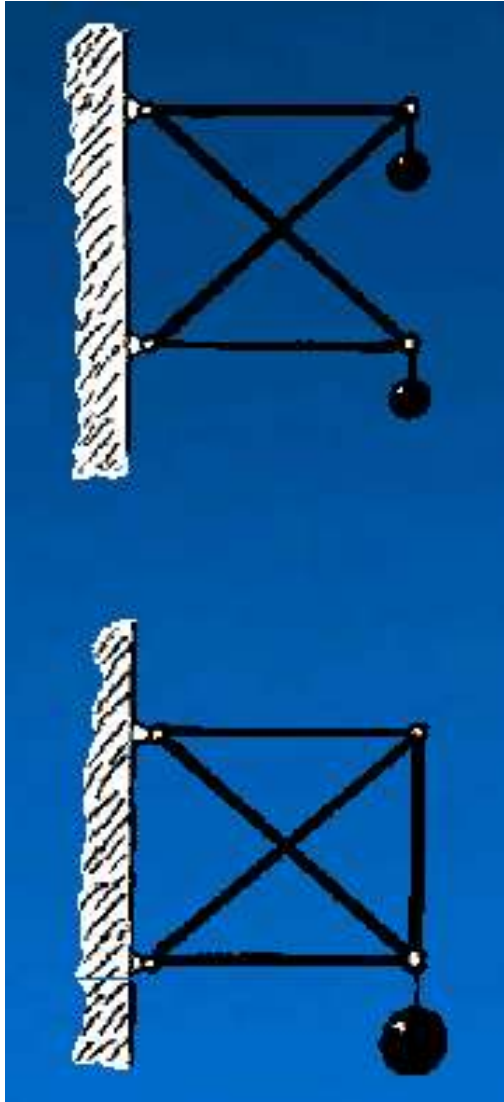
—Deve essere sufficientemente resistente (ma non troppo!) da resistere al massimo carico di servizio

—Deve avere una vita sufficientemente lunga con il più basso PESO e/o COSTO

OVVIO!

MENO OVVIO!

## UN ESEMPIO ELEMENTARE

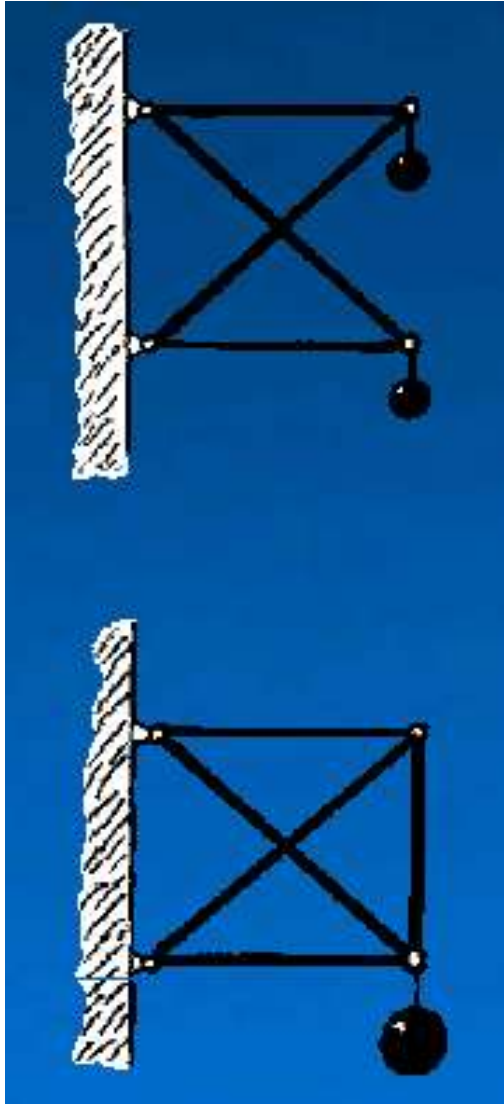


Tutti gli elementi sono sufficienti a reggere il carico agente



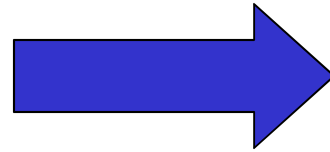
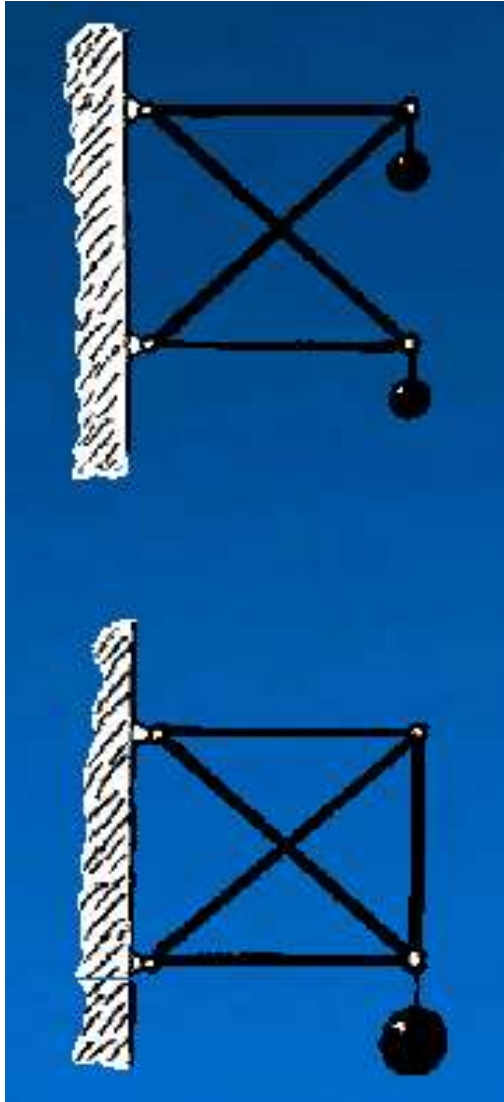
Tutti gli elementi sono più che sufficienti a reggere il carico agente: la struttura è ridondante

## UN ESEMPIO ELEMENTARE

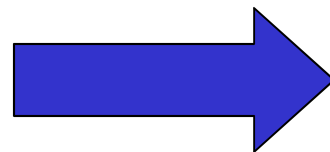


Quale è la più leggera?

## UN ESEMPIO ELEMENTARE



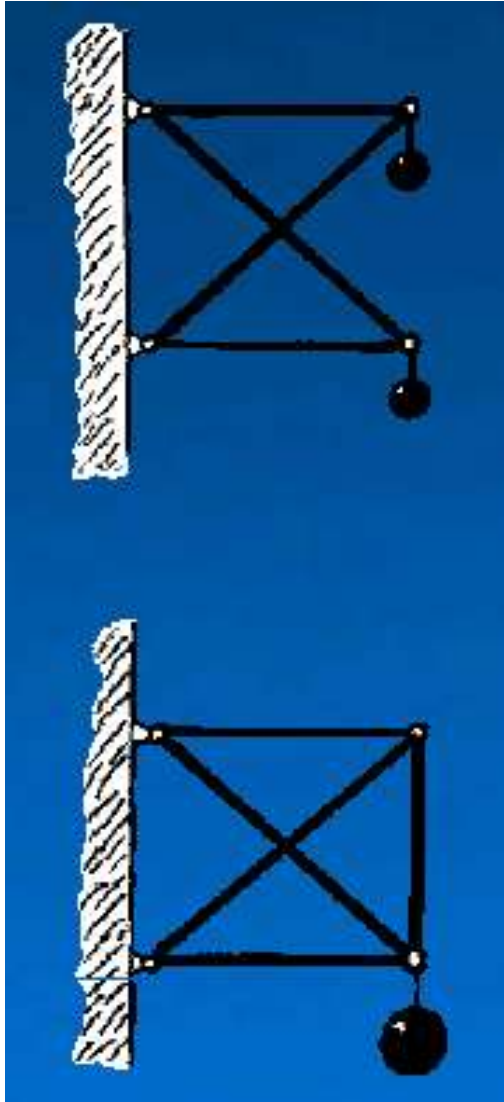
In caso di failure l'intera struttura collassa



In caso di failure la struttura continua a reggere il carico

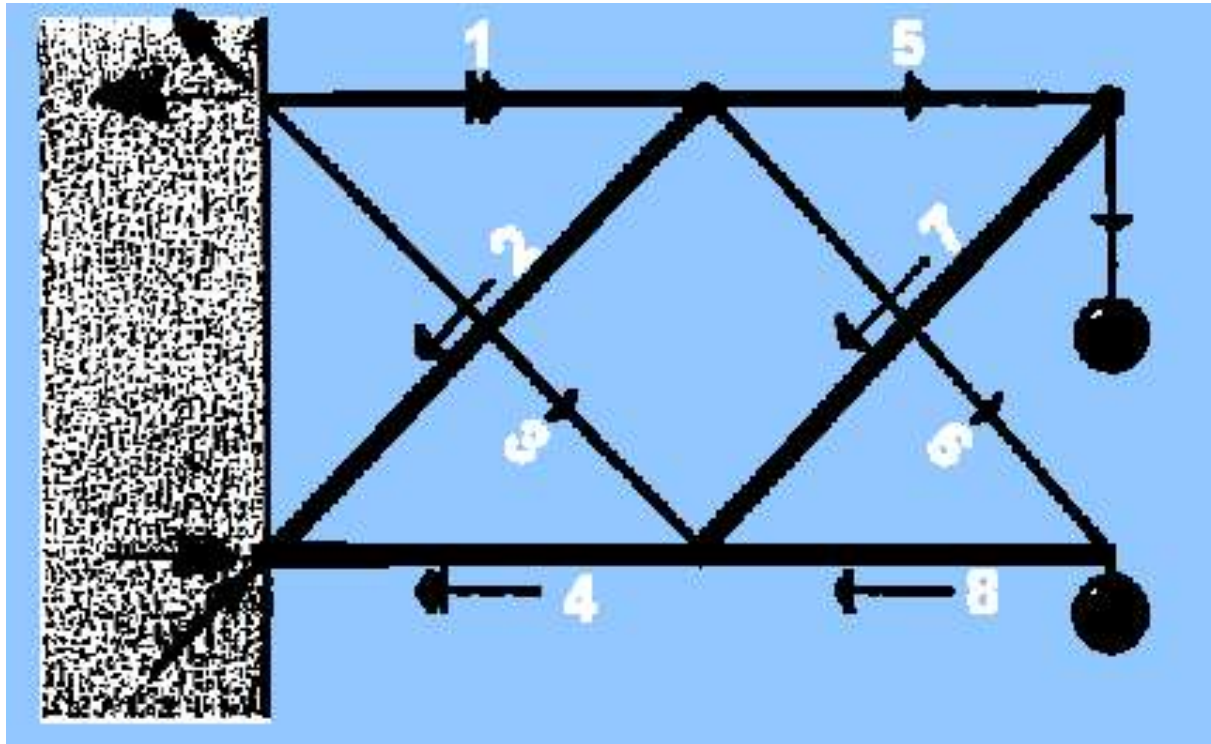
**FAIL-SAFE!**

## UN ESEMPIO ELEMENTARE



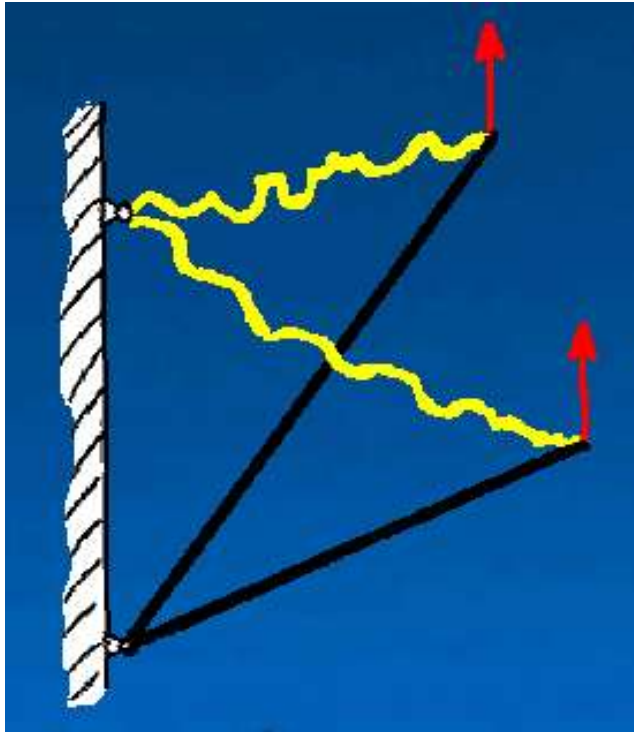
Se vogliamo una struttura fail-safe, quella ridondante sarà più leggera (non siamo costretti al sovradimensionamento)

# IL PROBLEMA DELLA SCHEMATIZZAZIONE



PERCHE' NELLE STRUTTURE REALI NON CI SONO CAVI?

## IL PROBLEMA DELLA SCHEMATIZZAZIONE

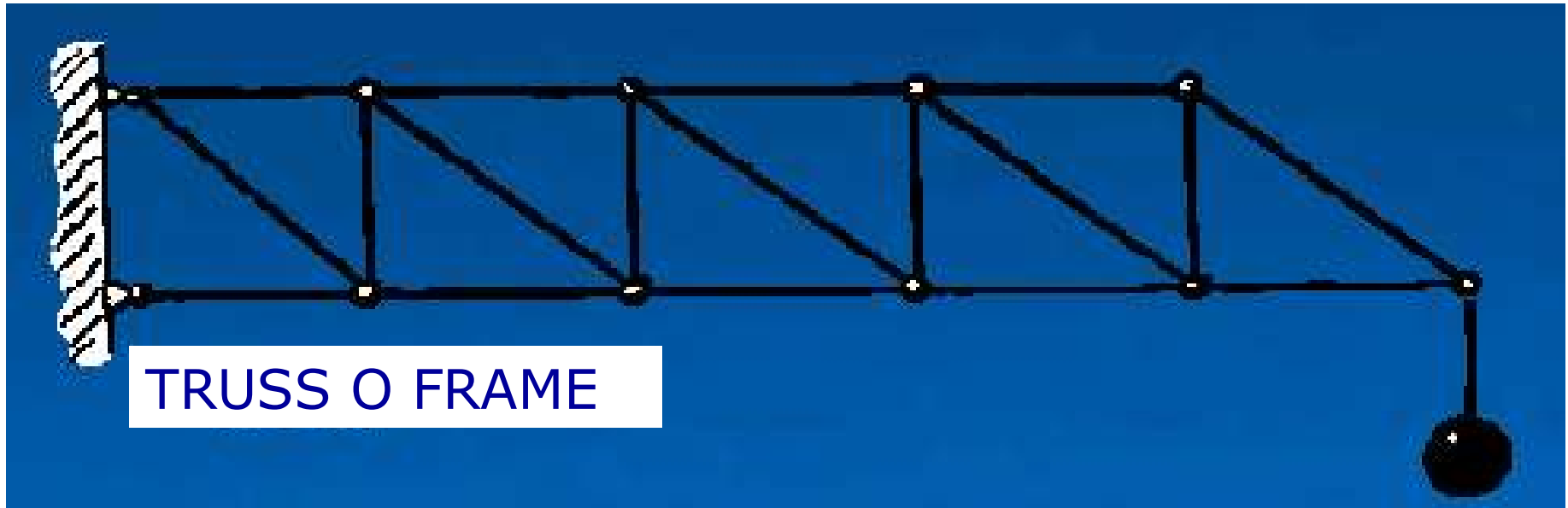


In caso di carico inverso sono instabili!

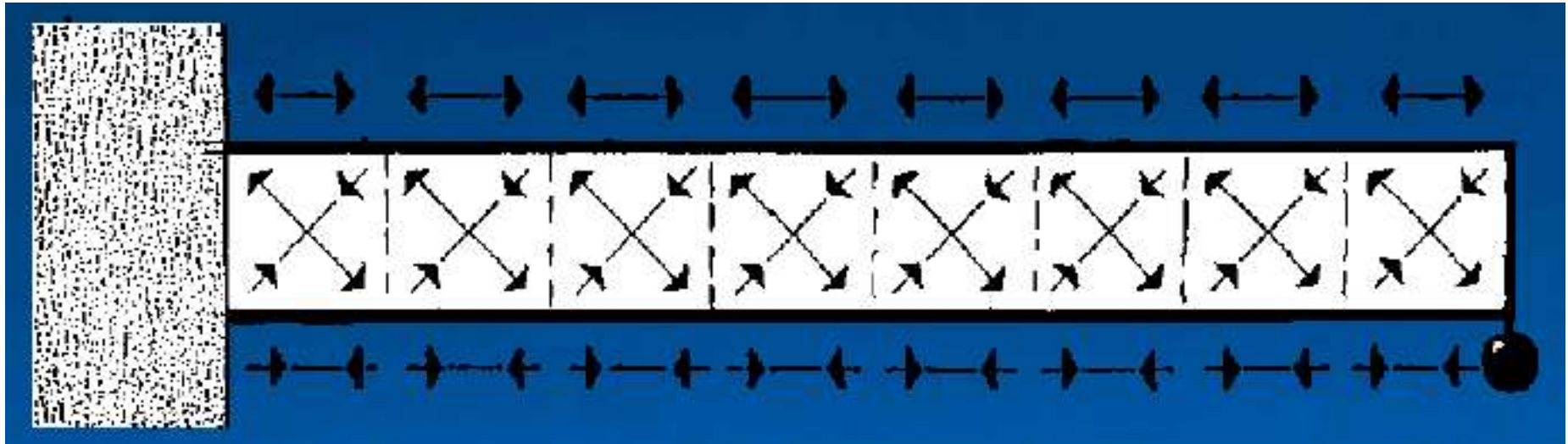
È dunque fondamentale la conoscenza approfondita dei carichi agenti



## LA STRUTTURA AERONAUTICA "IDEALE"



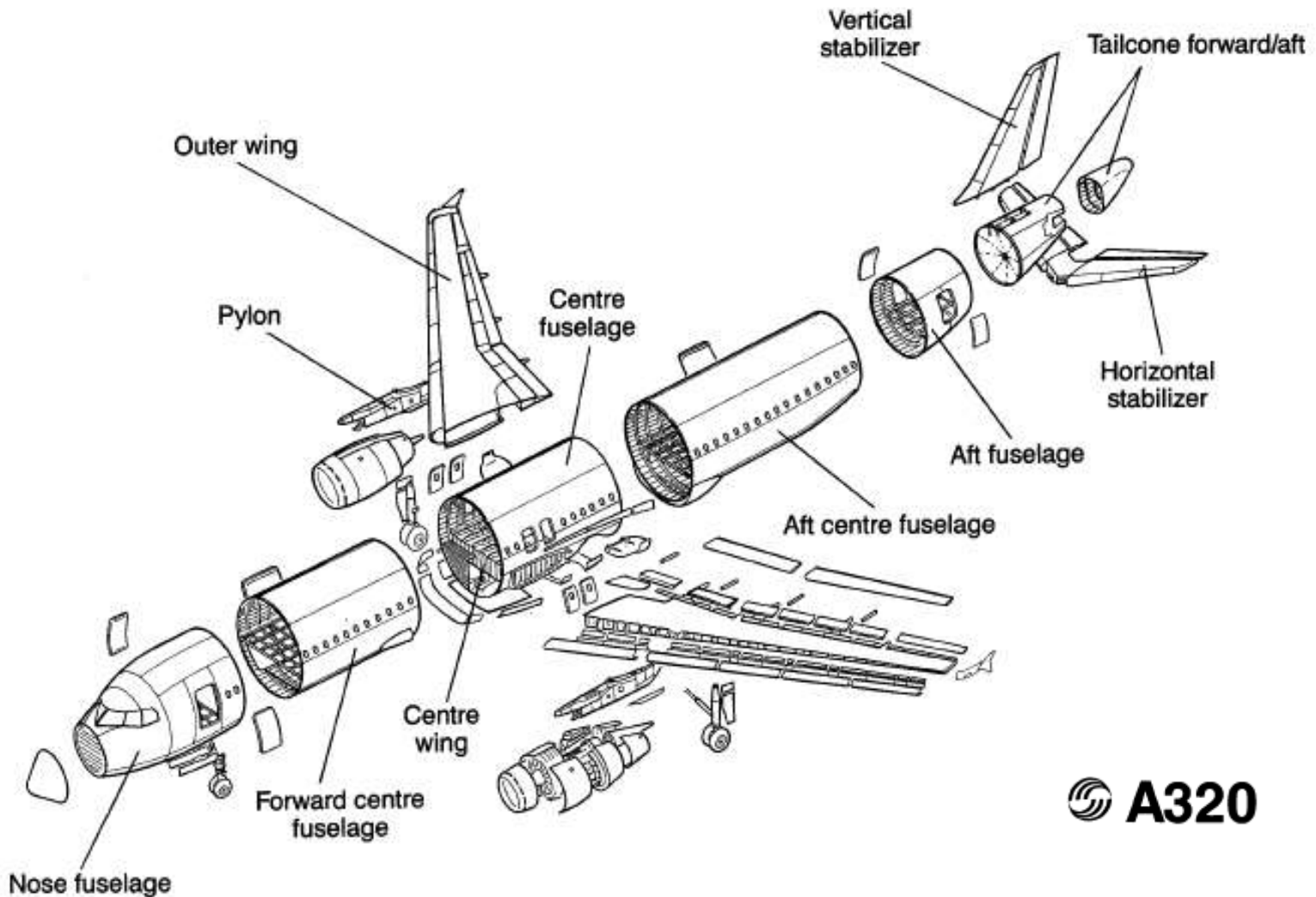
## LA STRUTTURA AERONAUTICA "IDEALE"



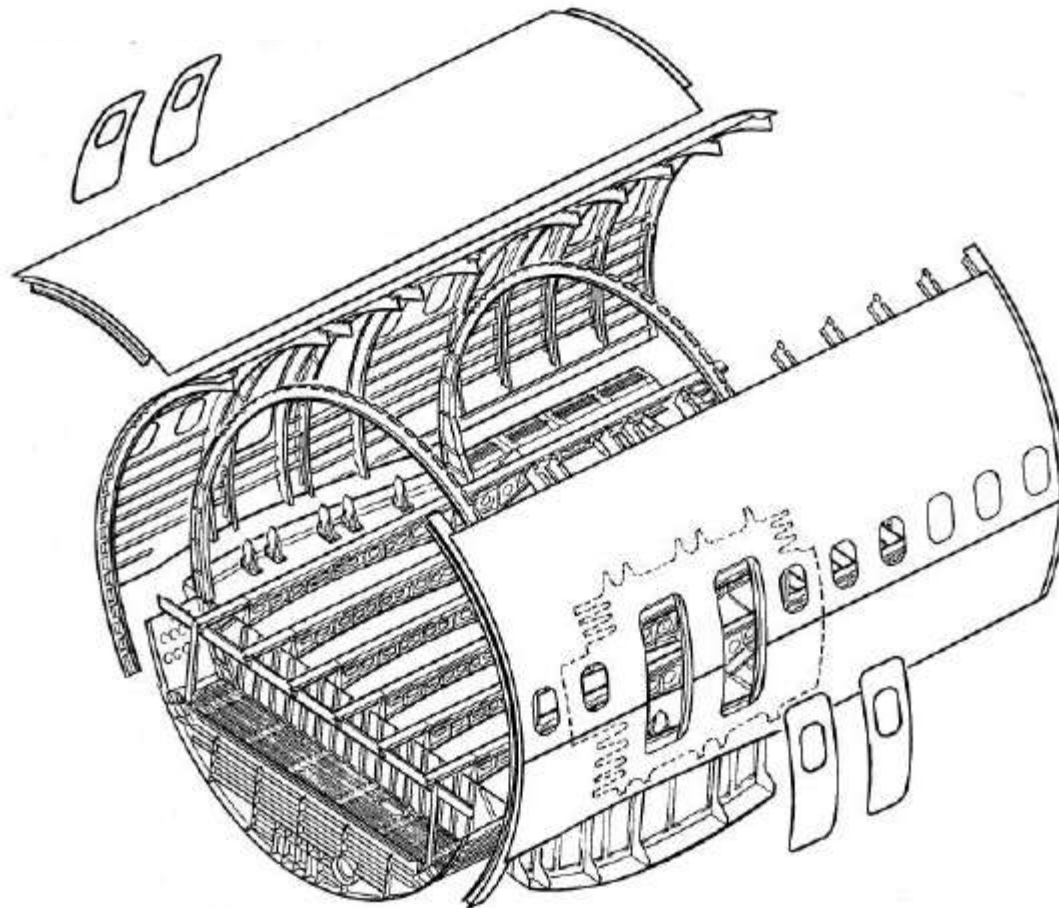
Gli elementi diagonali sono sostituiti da fogli in grado di assorbire le sollecitazioni: il principio dello

**STRESSED-SKIN**

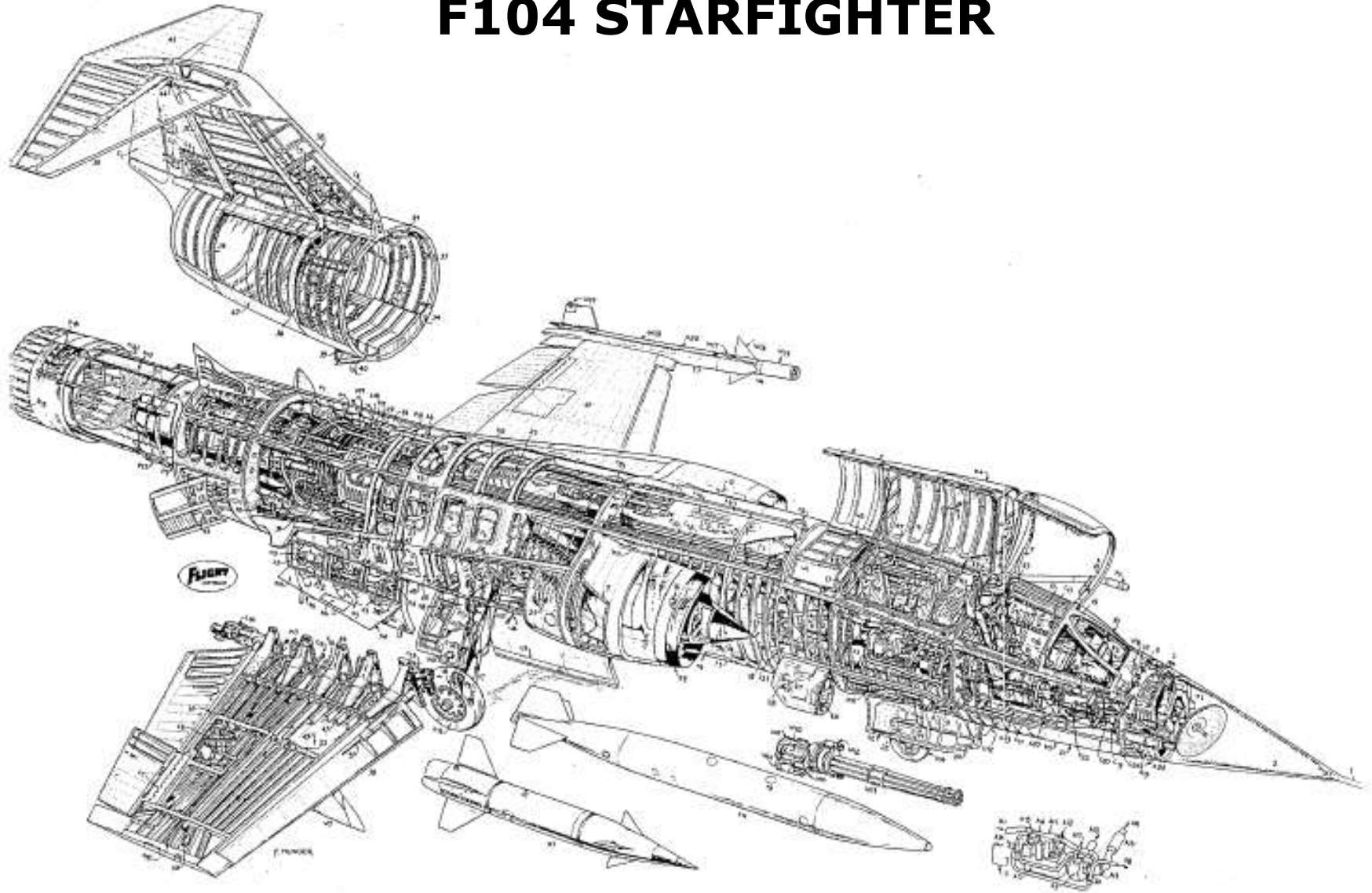
# LE PARTI DI UN VELIVOLO



## **A320 Fuselage**



# F104 STARFIGHTER



## DEFINIZIONI

### COMPONENTI

Fusoliera, ali, impennaggi e tutto ciò che determina la forma esterna di un aereo

### AIRFRAME

Velivolo senza equipaggiamenti: consiste di parti atte a reggere i carichi durante la vita operativa (manovre, decollo/atterraggio, ecc.)

# AIRFRAME

SKIN

Parte relativamente sottile che gioca un ruolo fondamentale nell'assorbimento delle sollecitazioni

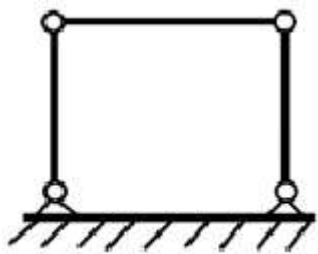
FRAMEWORK  
(SCHELETRO)

Parte della struttura su cui è "avvolto" lo skin:

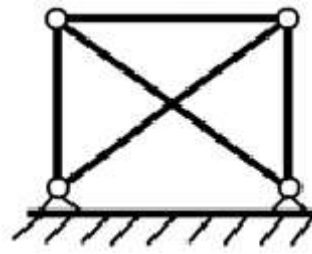
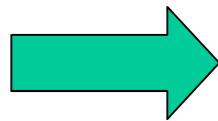
ordinate, centine, ecc.

# SKIN

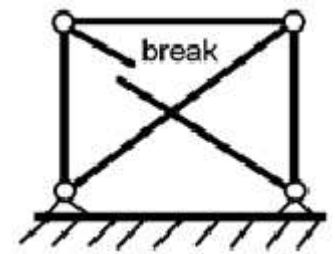
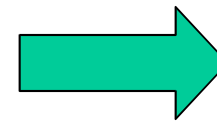
Storicamente lo skin si è sviluppato (grazie all'introduzione dell'alluminio nelle costruzioni aeronautiche) quale naturale evoluzione delle strutture reticolari, rimpiazzando le aste in strutture complesse



Forma  
base

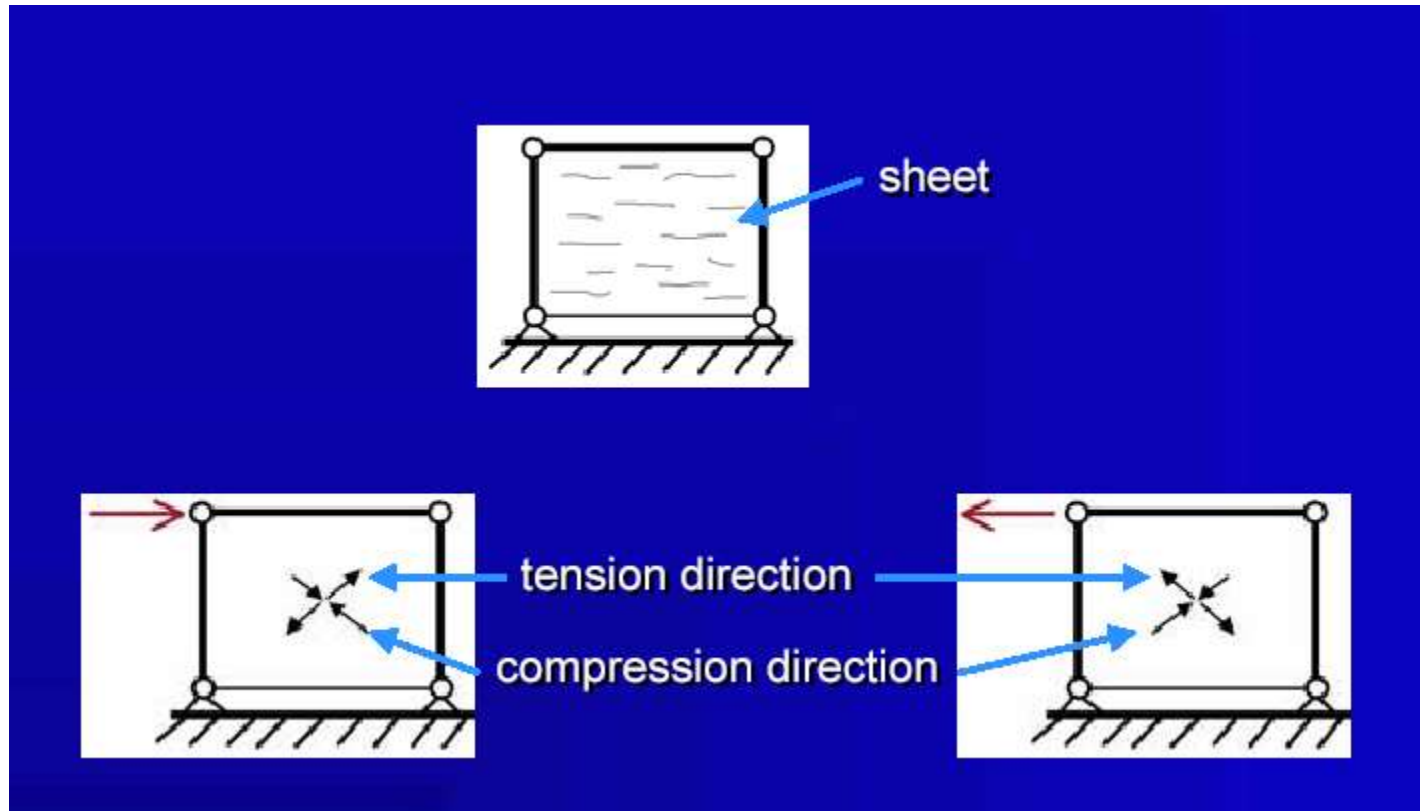


Struttura  
ridondante



FAIL-SAFE  
concept





Struttura più leggera ed efficiente in grado di sopportare carichi molto elevati in tensione e compressione

Quando il carico di compressione supera una certa soglia si generano dei fenomeni di instabilità locale (buckling), ma la struttura non cede riducendo solo la sua capacità di assorbimento

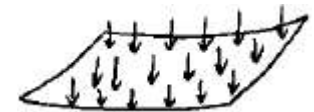


Una struttura di questo tipo può essere quindi definita

**FAIL-SAFE**

In definitiva l'anima di alluminio è in grado di:

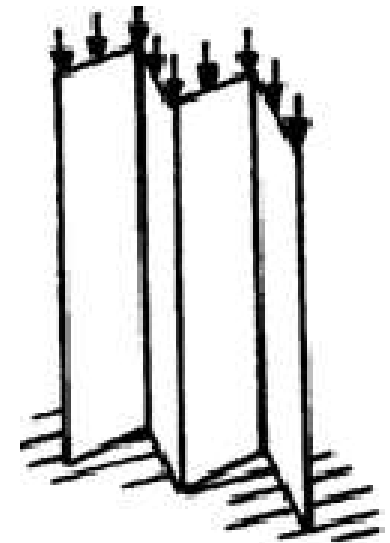
- reggere carichi di trazione
- reggere carichi di compressione
- reggere carichi di taglio
- fungere da separatore/sigillante  
assolvendo anche a compiti aerodinamici



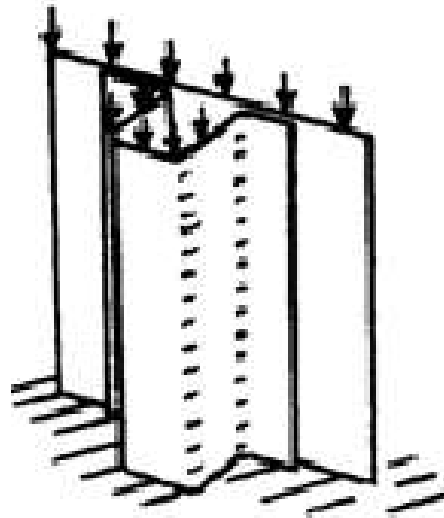
Un foglio di alluminio può resistere a carichi di trazione molto elevati, mentre in compressione è limitato dal fenomeno del buckling



L'esperienza ci insegna che è sufficiente piegare il foglio per aumentare notevolmente la sua capacità di assorbire carichi di compressione

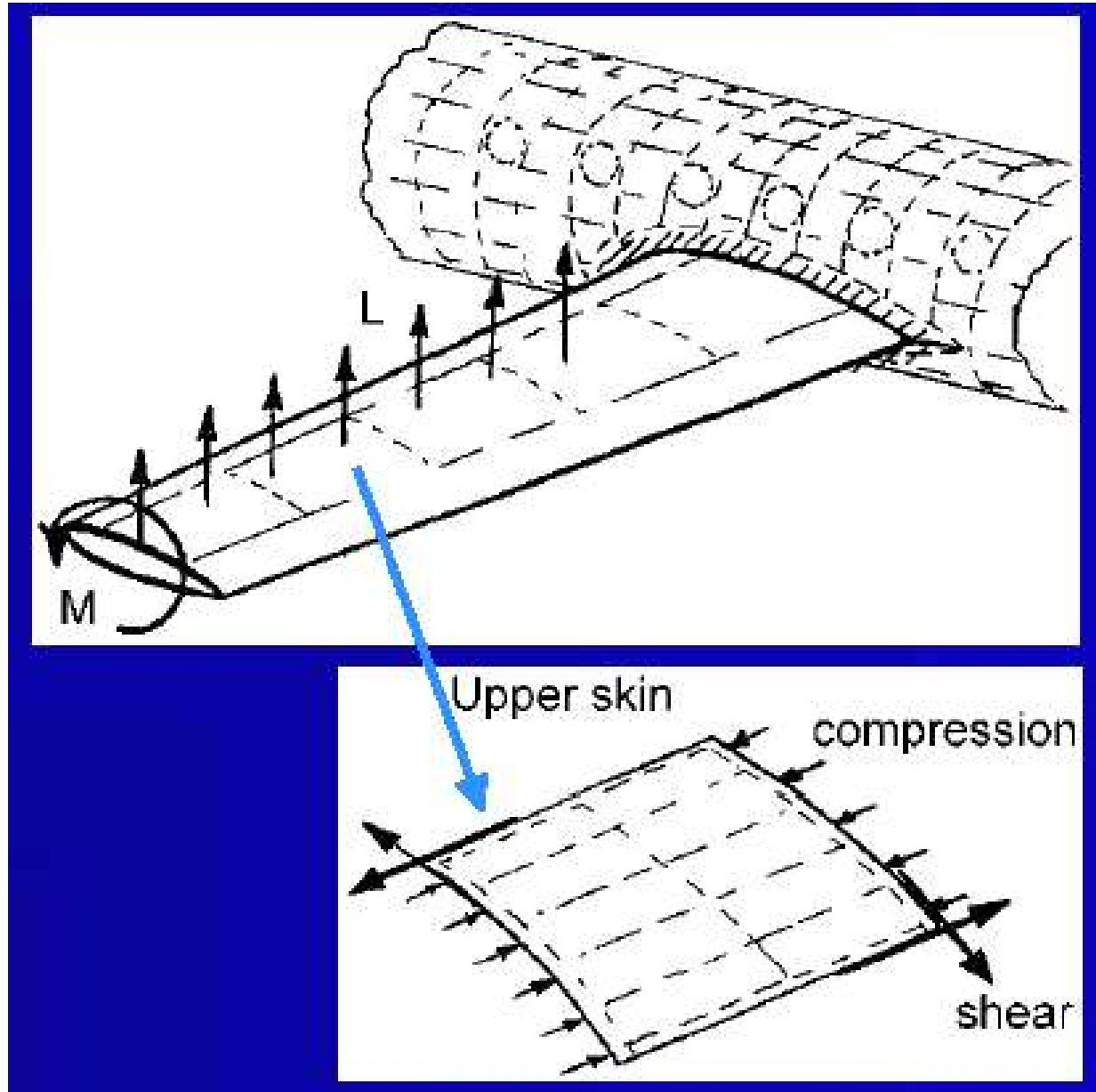


La forma ha quindi una considerevole influenza sulle prestazioni di una struttura che possono però essere migliorate introducendo degli irrigidimenti "ad hoc".

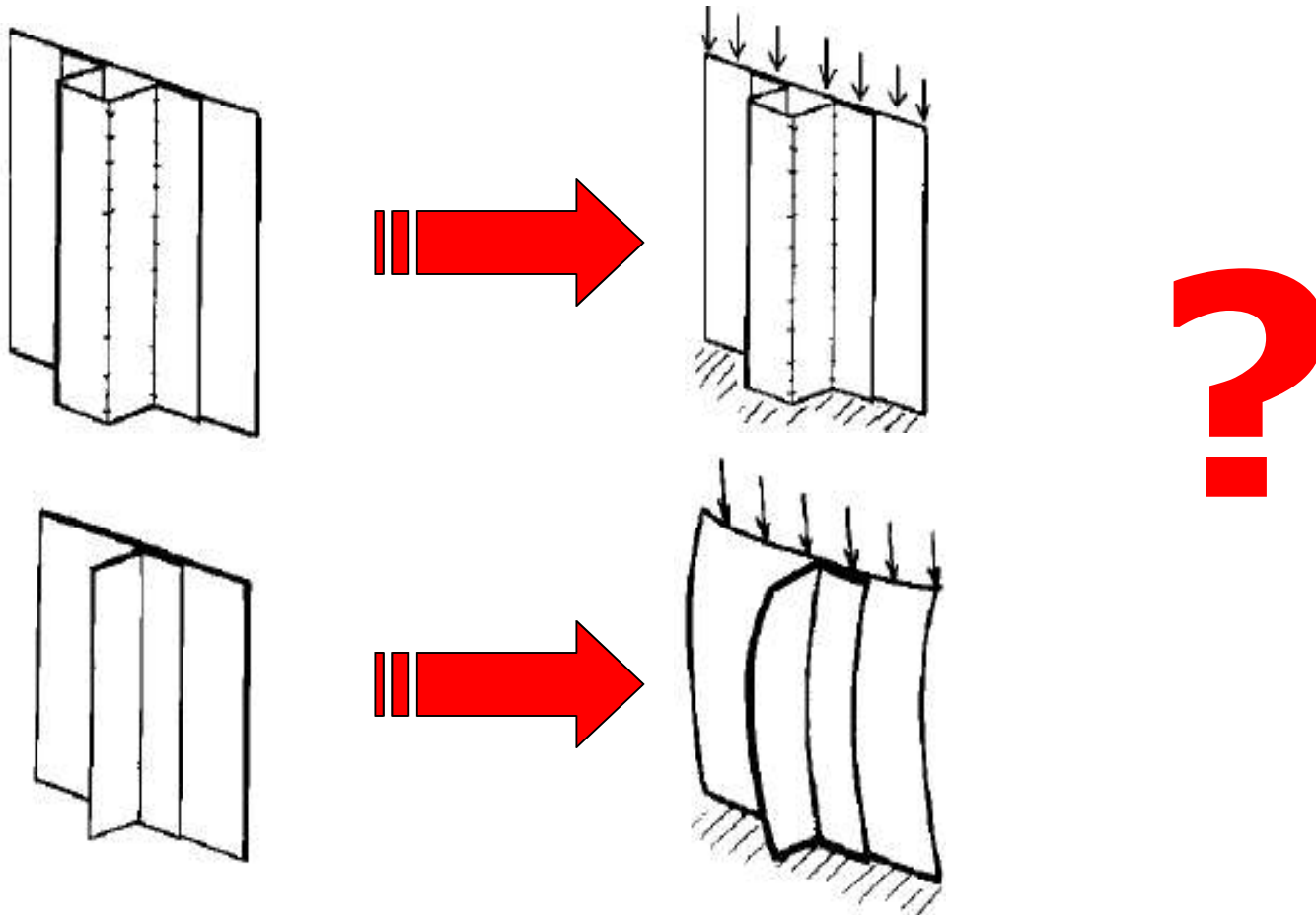


Nasce così il concetto di "STIFFENER"

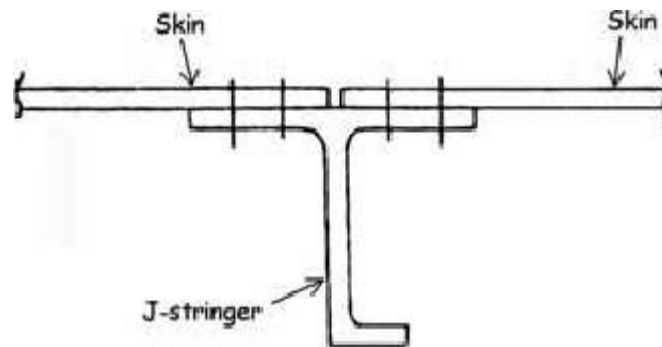
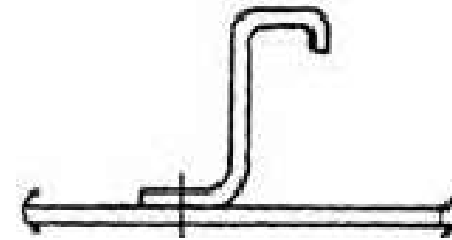
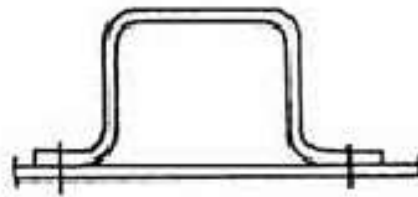
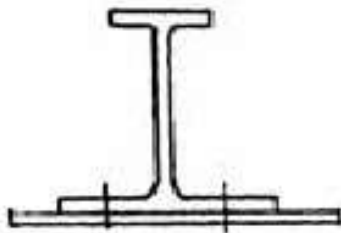
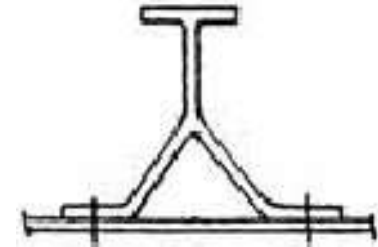
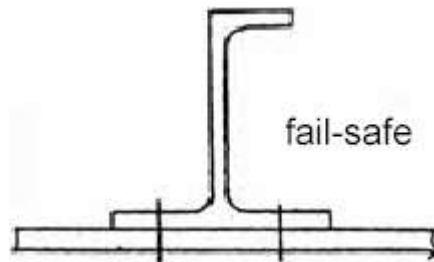
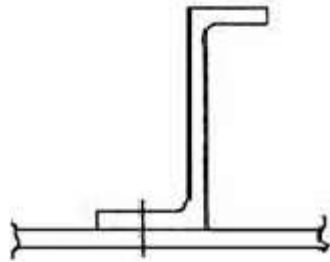
Nella struttura di  
un velivolo  
troviamo  
innumerevoli  
applicazioni di  
irrigidimenti: gli  
**STRINGERS**



Per ogni tipo di applicazione esiste uno stiffener ideale, progettato per tenere in conto il tipo e l'entità della sollecitazione agente, i vincoli geometrici, le tecnologie di produzione da impiegare (materiali in uso, giunzioni), la riparabilità della struttura, etc.

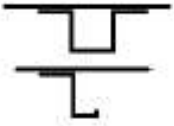
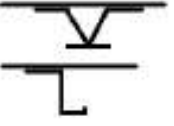
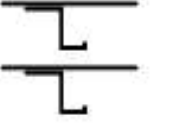
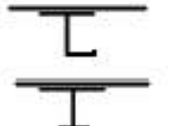
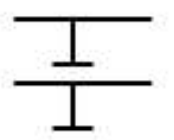


## TIPI DI STRINGER





## ESEMPI DI APPLICAZIONI

Type Aircraft	Skin	Type structure	Material	Shape
F100	upper lower	stringer stringer	7075-T6 2024-T3	
MD-90	upper lower	stringer stringer	7075-T6 2024-T3	
B 747	upper lower	stringer stringer	7075-T6 2024-T3	
A-300	upper lower	stringer stringer	7075-T6 2024-T3	
C-5A	upper lower	integral integral	7075-T6 7075-T6	

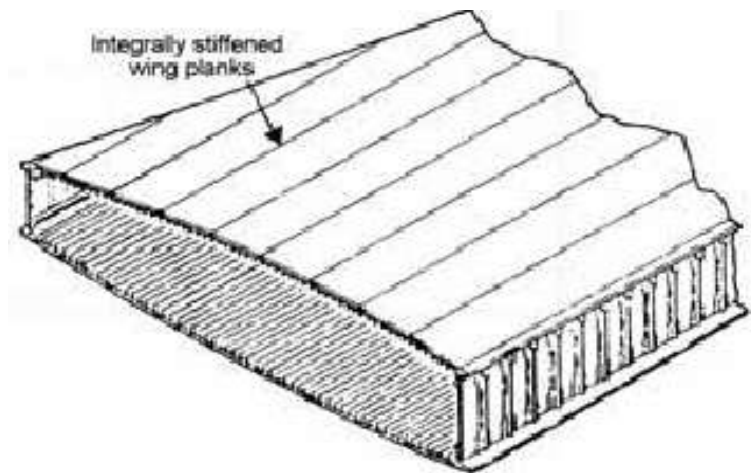
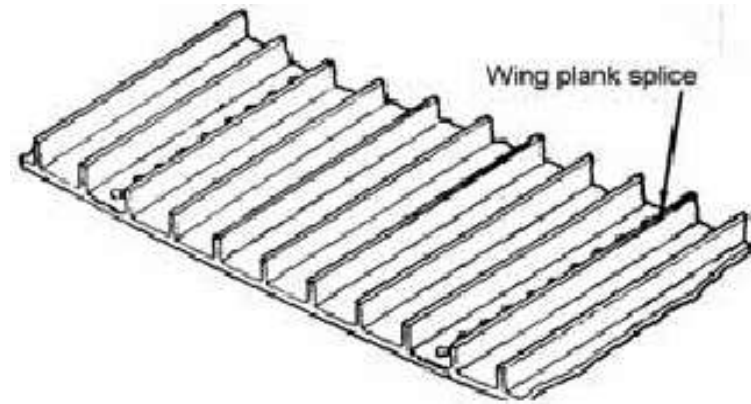


## LE STRUTTURE INTEGRATE

- Basso costo
- Ridotto numero di parti
- Spessore adattabile

**VS**

- Scarti notevoli
- Difficile riparazione
- Resistenza a fatica

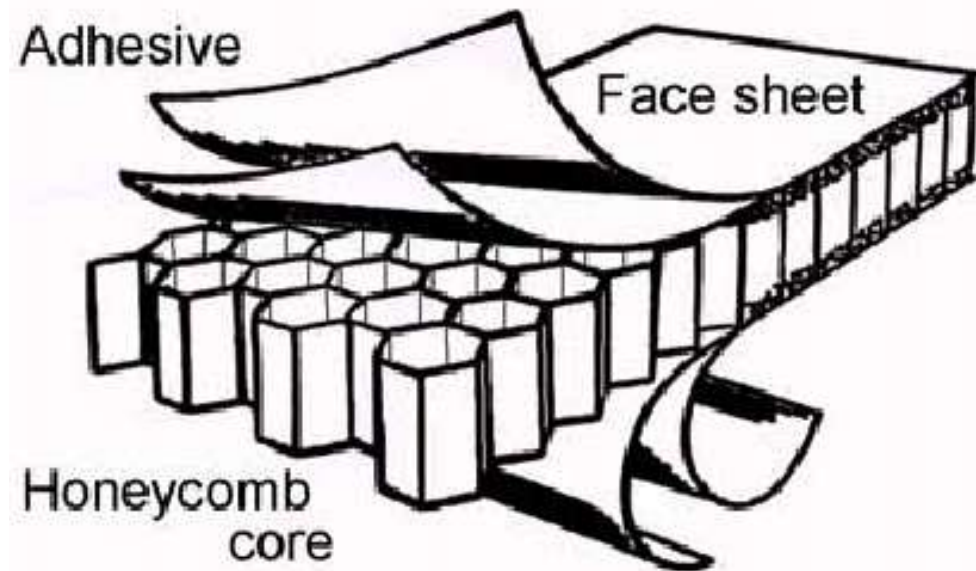


## LE STRUTTURE SANDWICH

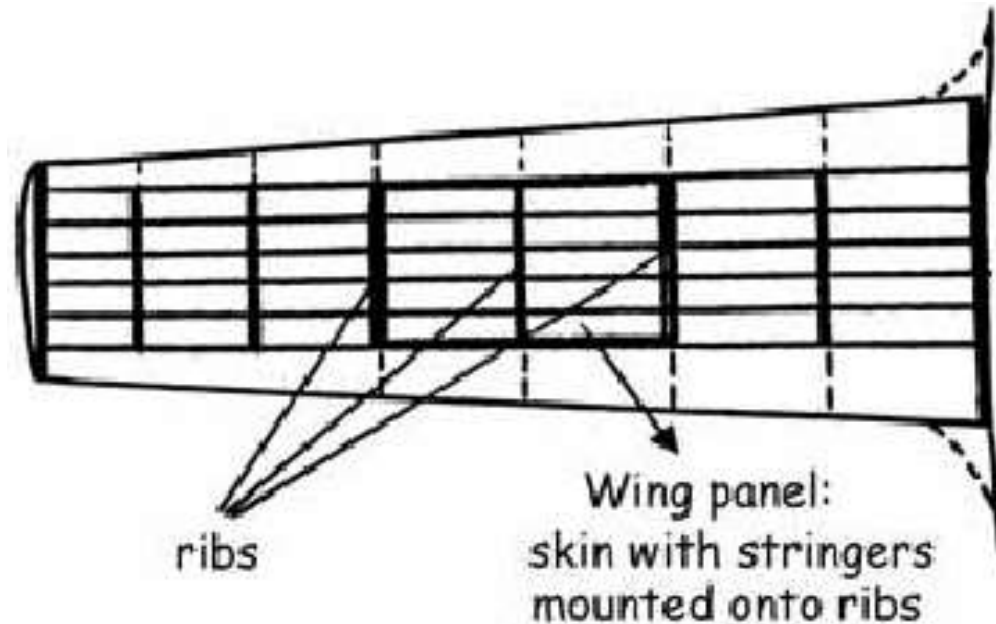
- Assenza di stringers
- Ridotto numero di parti

**VS**

- Costo elevato
- Resistenza alla corrosione



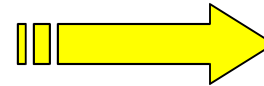
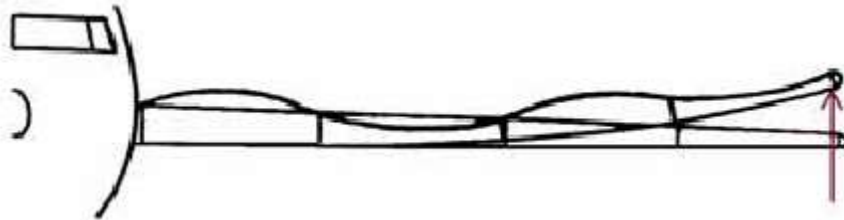
## CENTINE (RIBS)



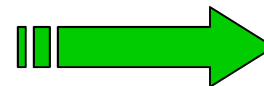
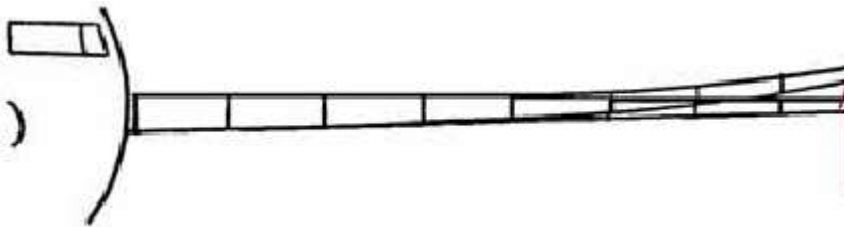
Le centine sono elementi fondamentali dell'ala che contribuiscono a dare all'ala la forma voluta, a reggere i carichi aerodinamici agenti, ad introdurre i carichi concentrati (carrelli, superfici mobili), etc



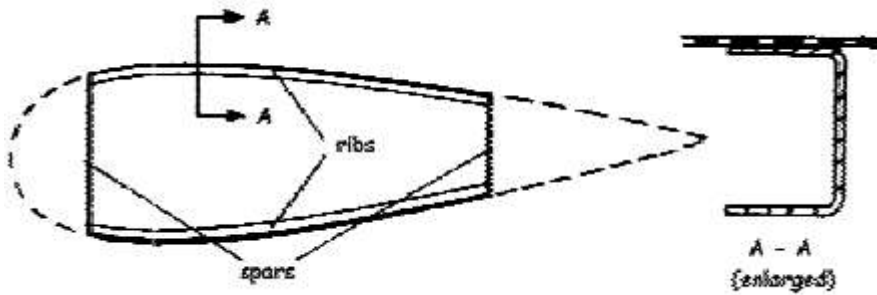
Senza centine



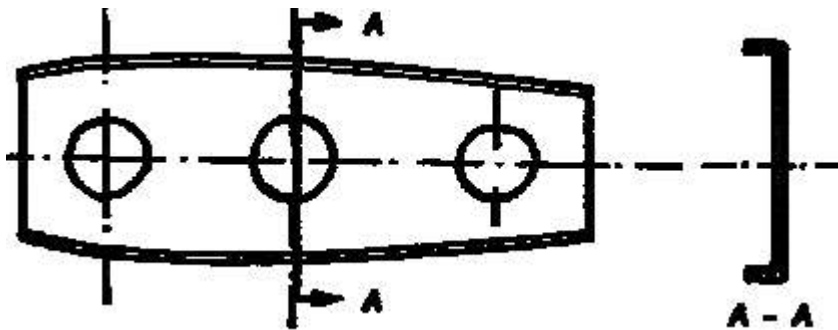
Poche centine



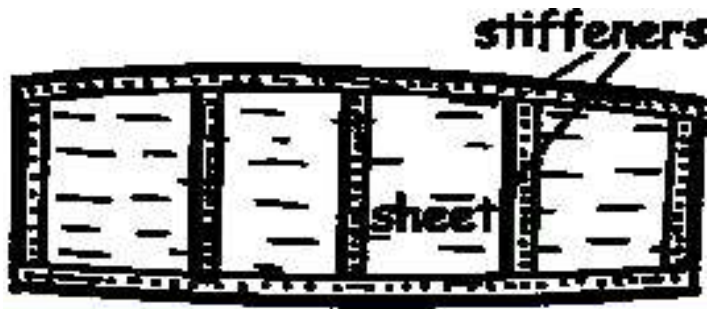
Correttamente progettata



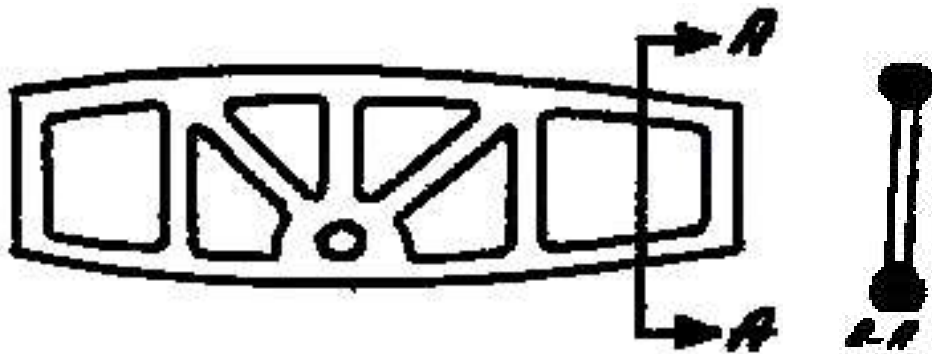
Centina di forma -  
carichi molto bassi



Centina piana formata -  
carichi moderati

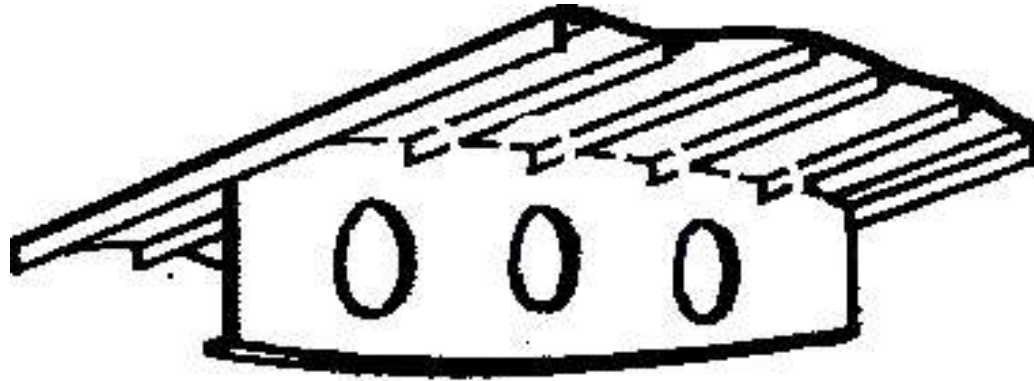


Centina piena built-up  
- sigillatura serbatoi



Centina macchinata -  
carichi elevati

## Le intersezioni centina/stringer

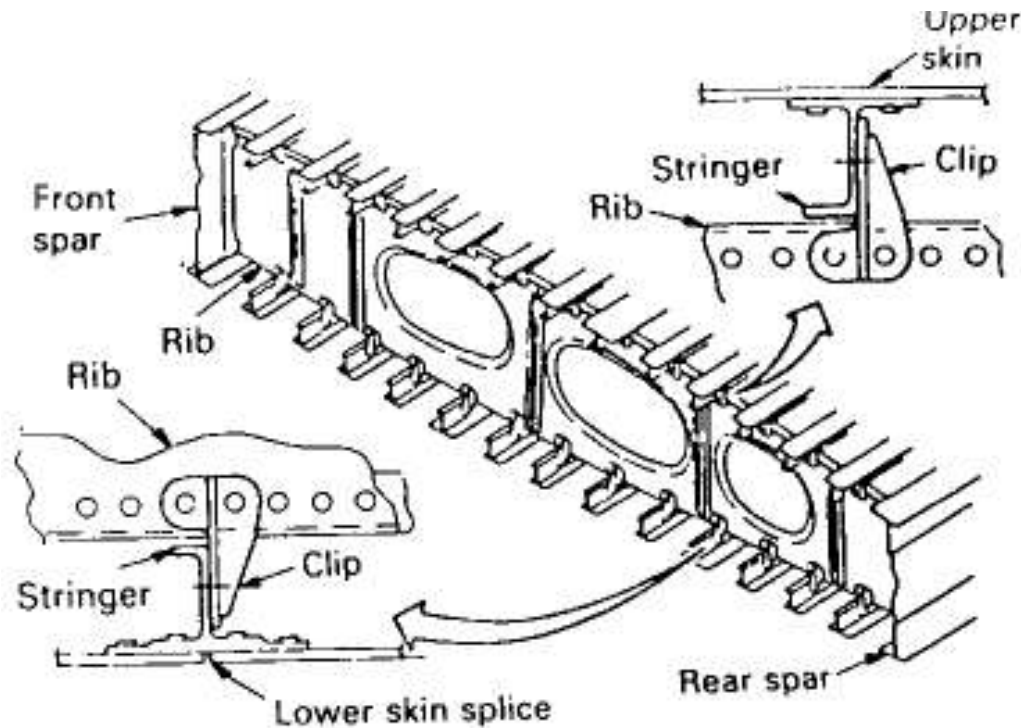


Le soluzioni possibili sono:

- (1) nessuna interruzione
- (2) centina interrotta
- (3) stringer interrotto
- (4) .....



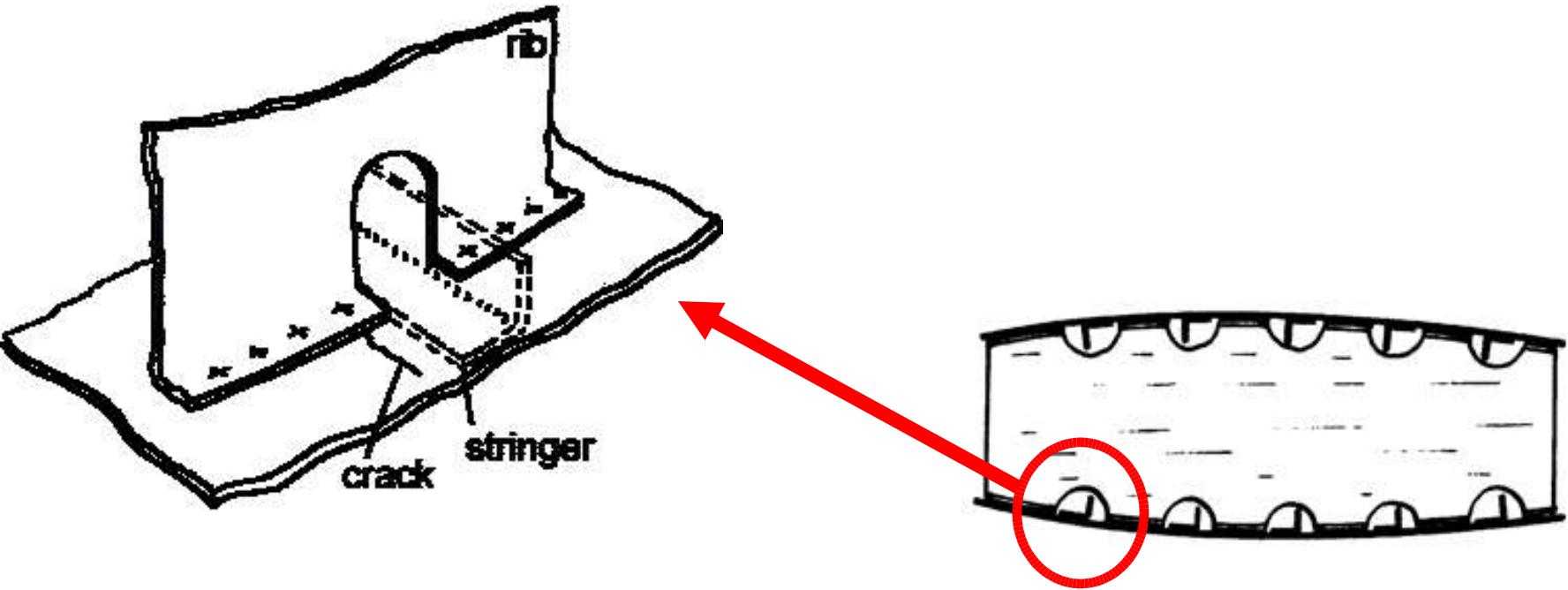
## Soluzione 1 - nessuna interruzione



In questo caso le flange della centina scavalcano gli stringers senza un contatto diretto con lo skin: **cattiva trasmissione degli sforzi di taglio!**

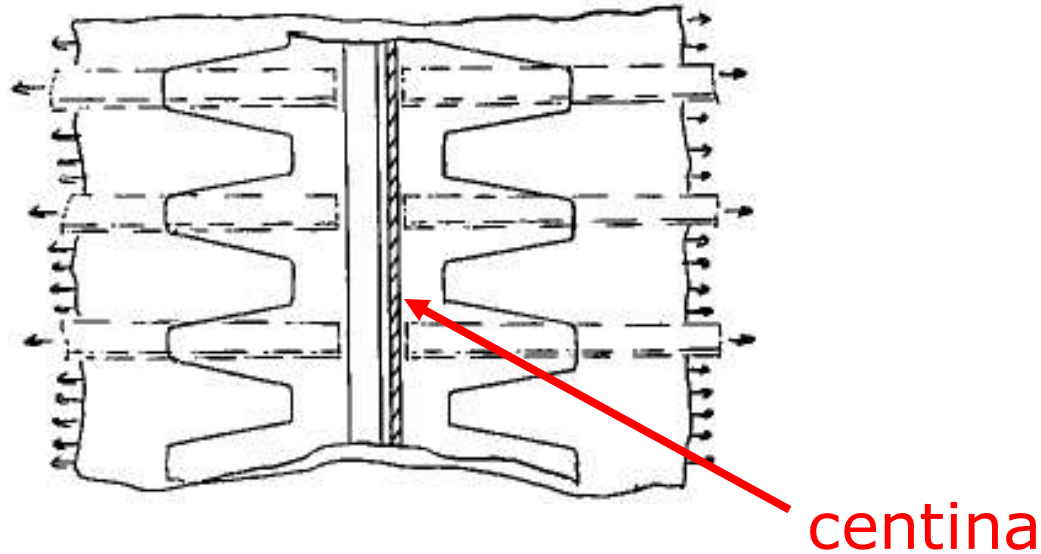
È possibile utilizzare degli angolari per ovviare al problema (shear ties)

## Soluzione 2 - centina interrotta



Lo stringer attraversa la centina appositamente sagomata: indebolimento della centina e concentrazione delle tensioni in prossimità del cut-out

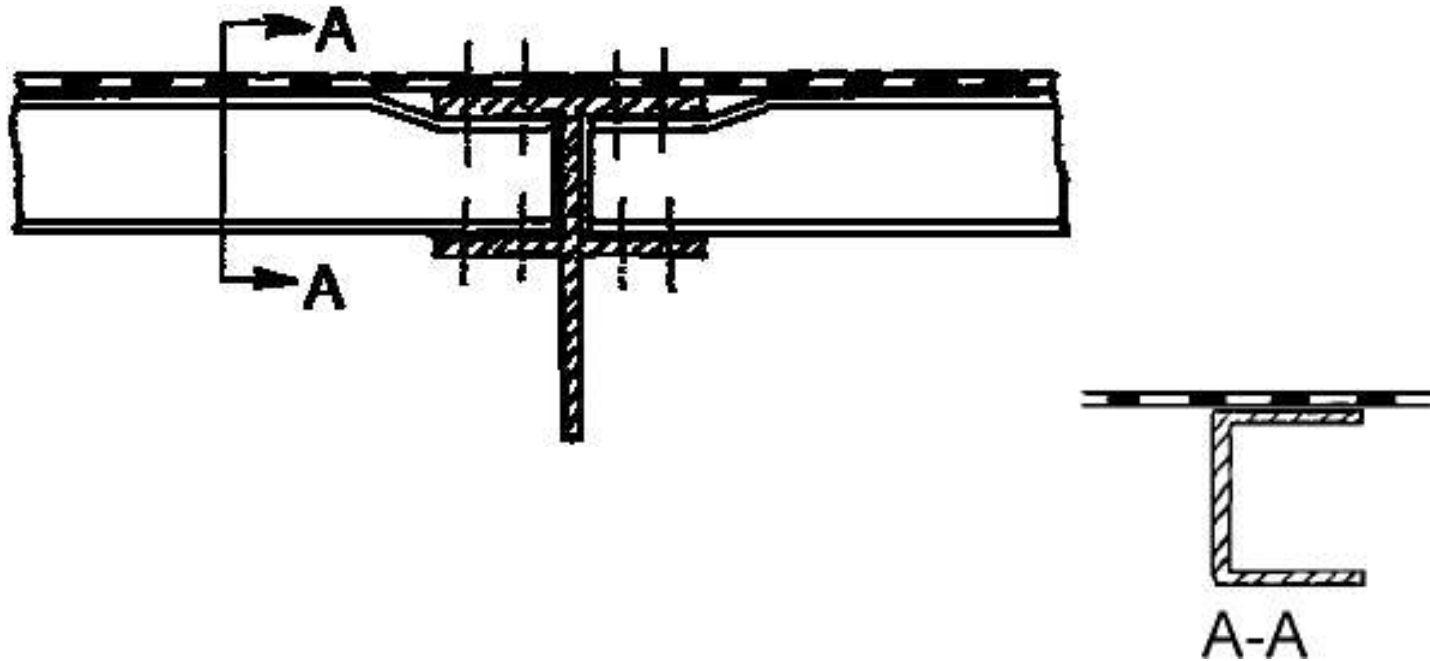
## Soluzione 3 - stringer interrotto



Lo stringer si interrompe all'altezza della centina.

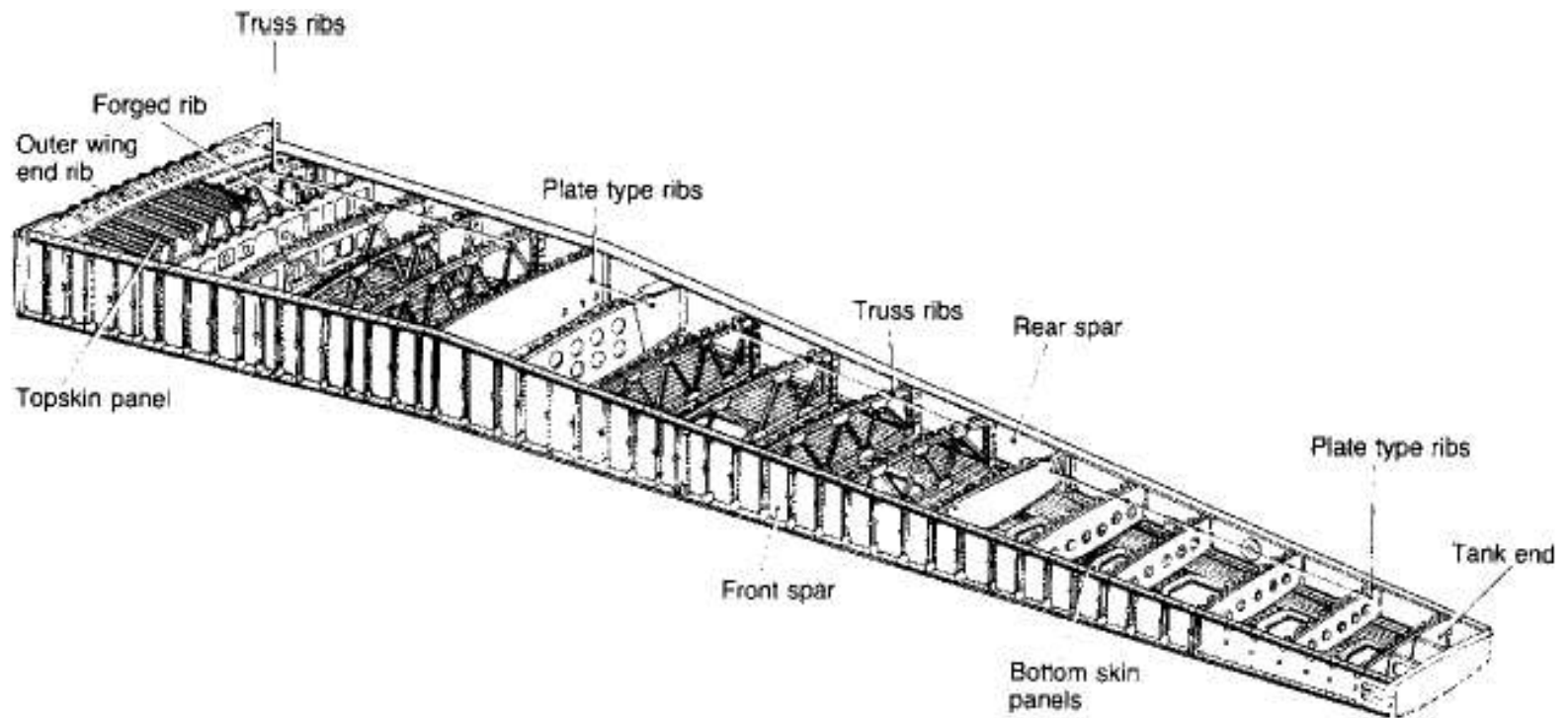
È necessario un rinforzo sullo skin (doubler)

## Soluzione 4 - "smart solution"



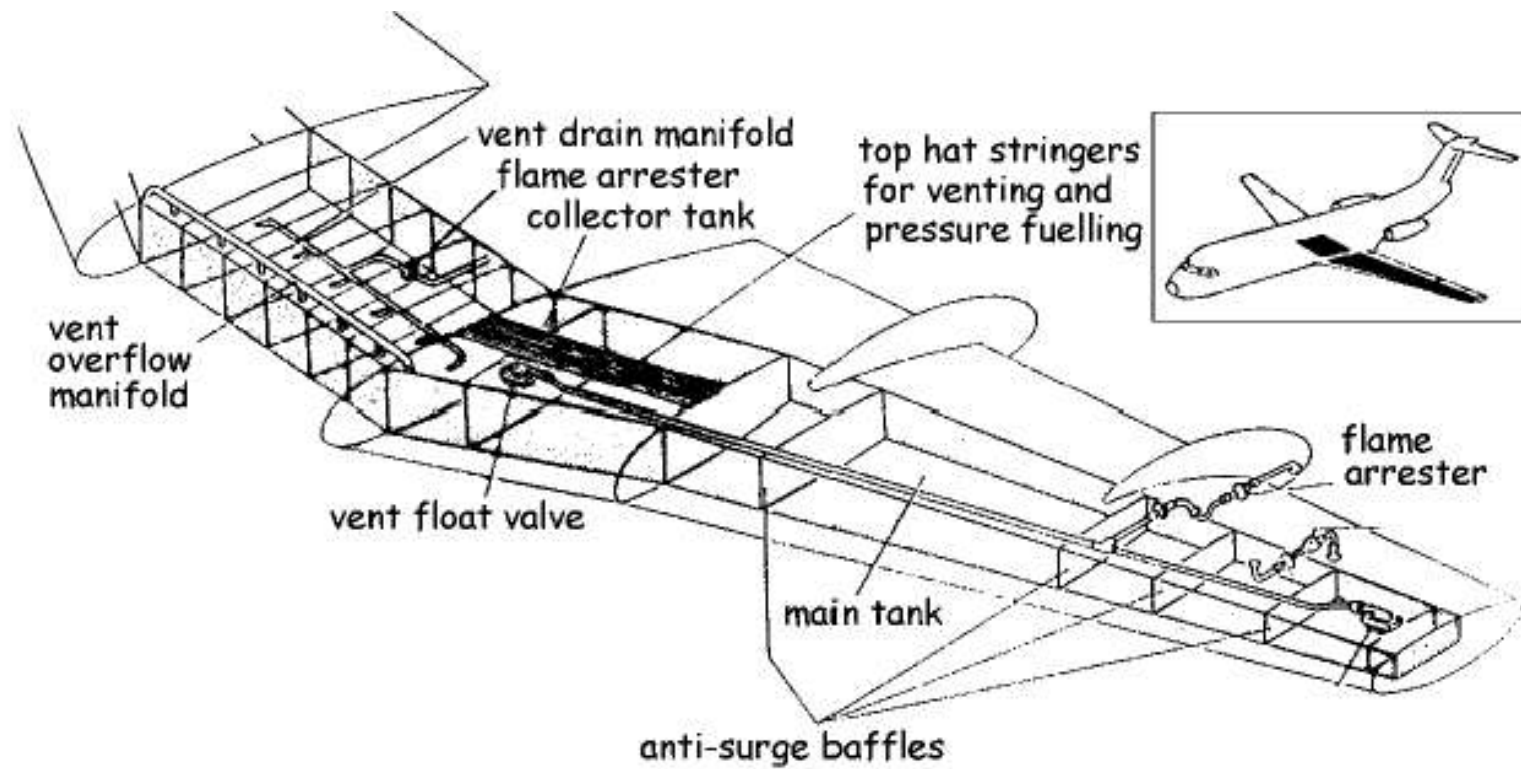
Soluzioni innovative: costo elevato e difficoltà di analisi/certificazione

## ESEMPIO DI APPLICAZIONE MULTIPLA

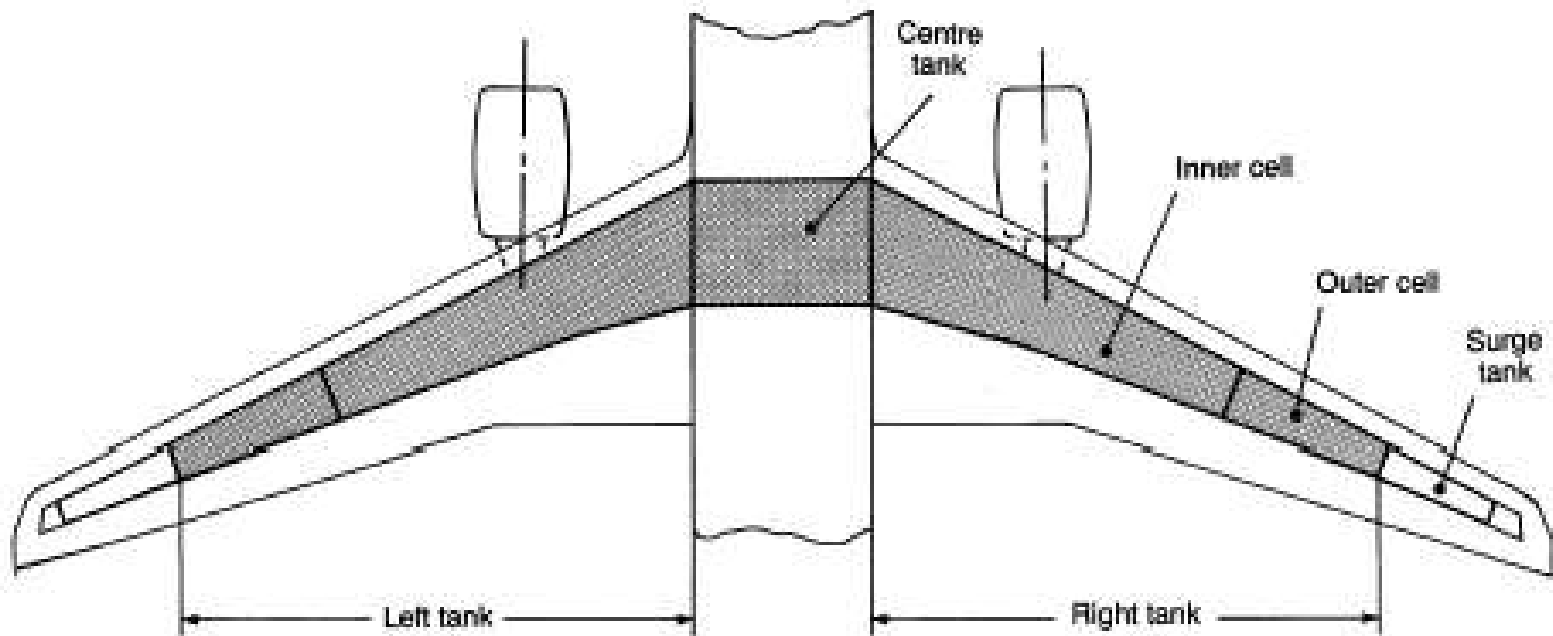


FOKKER 100 OUTER WING

## I SERBATOI ALARI



## I SERBATOI ALARI

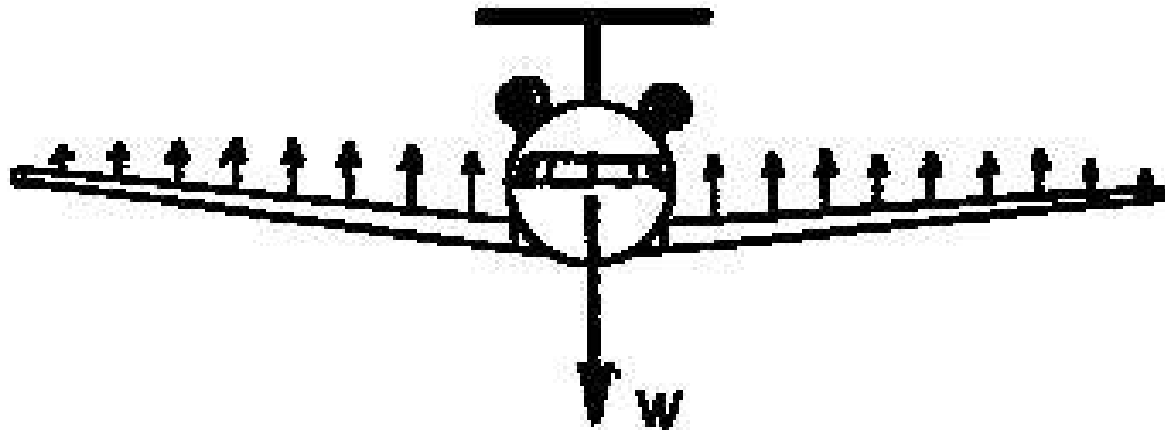


 **A320 Fuel system**

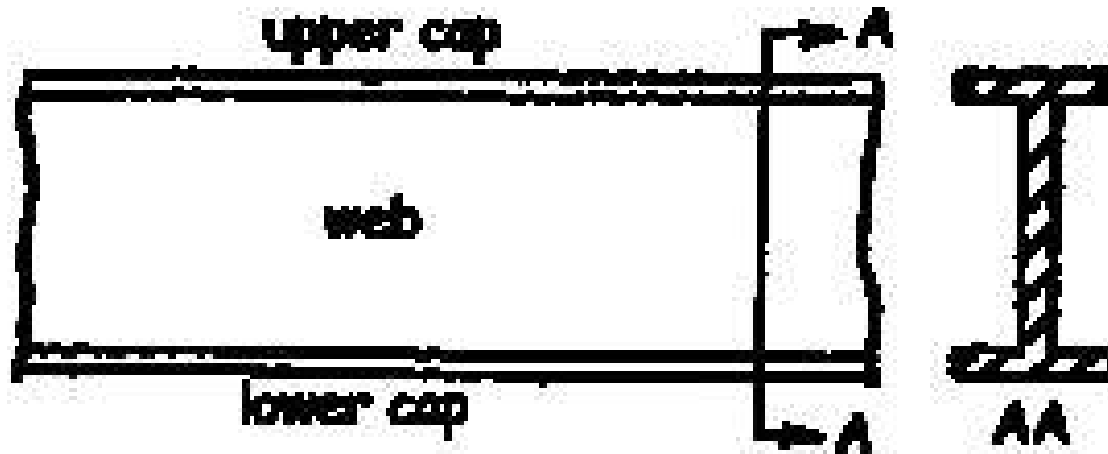
## I LONGHERONI (SPARS)

I pannelli alari (irrigiditi) sono connessi alle centine

Le centine sono a loro volta connesse ai longheroni, che assorbono la maggior parte dei carichi flessionali indotti dalla portanza

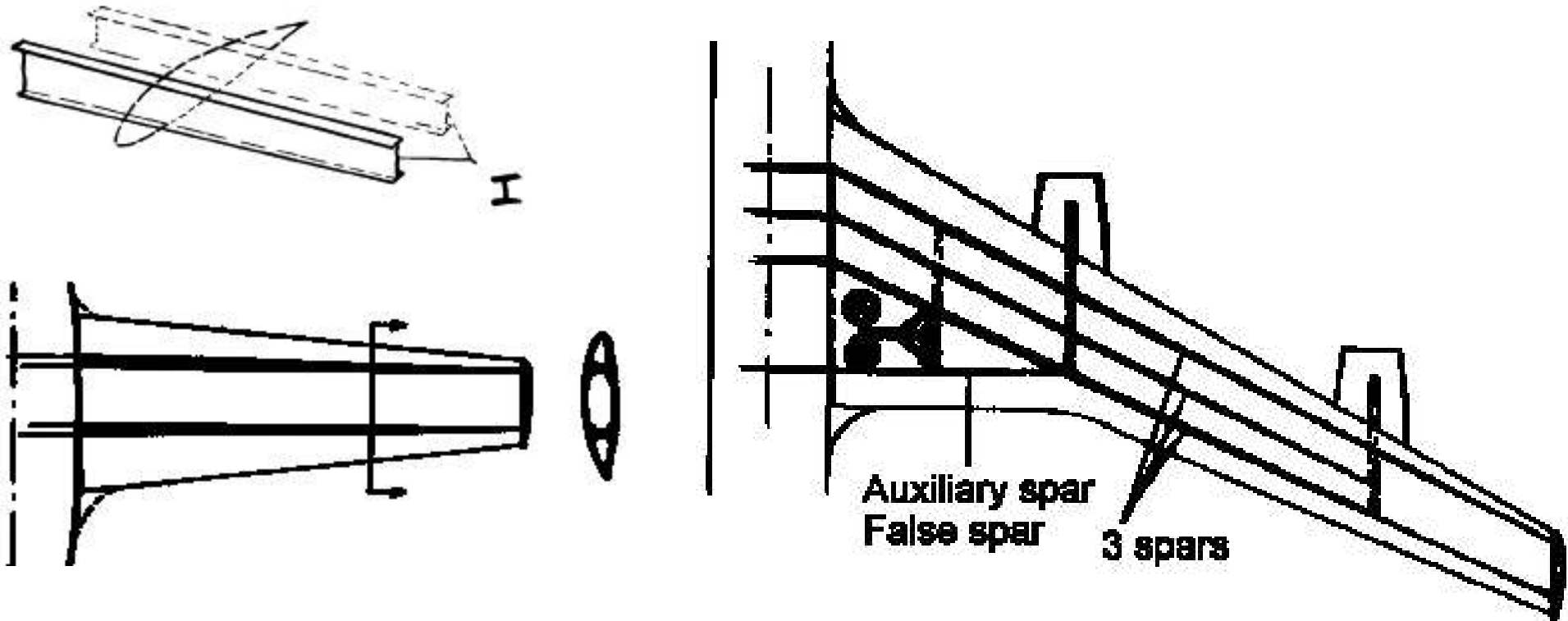




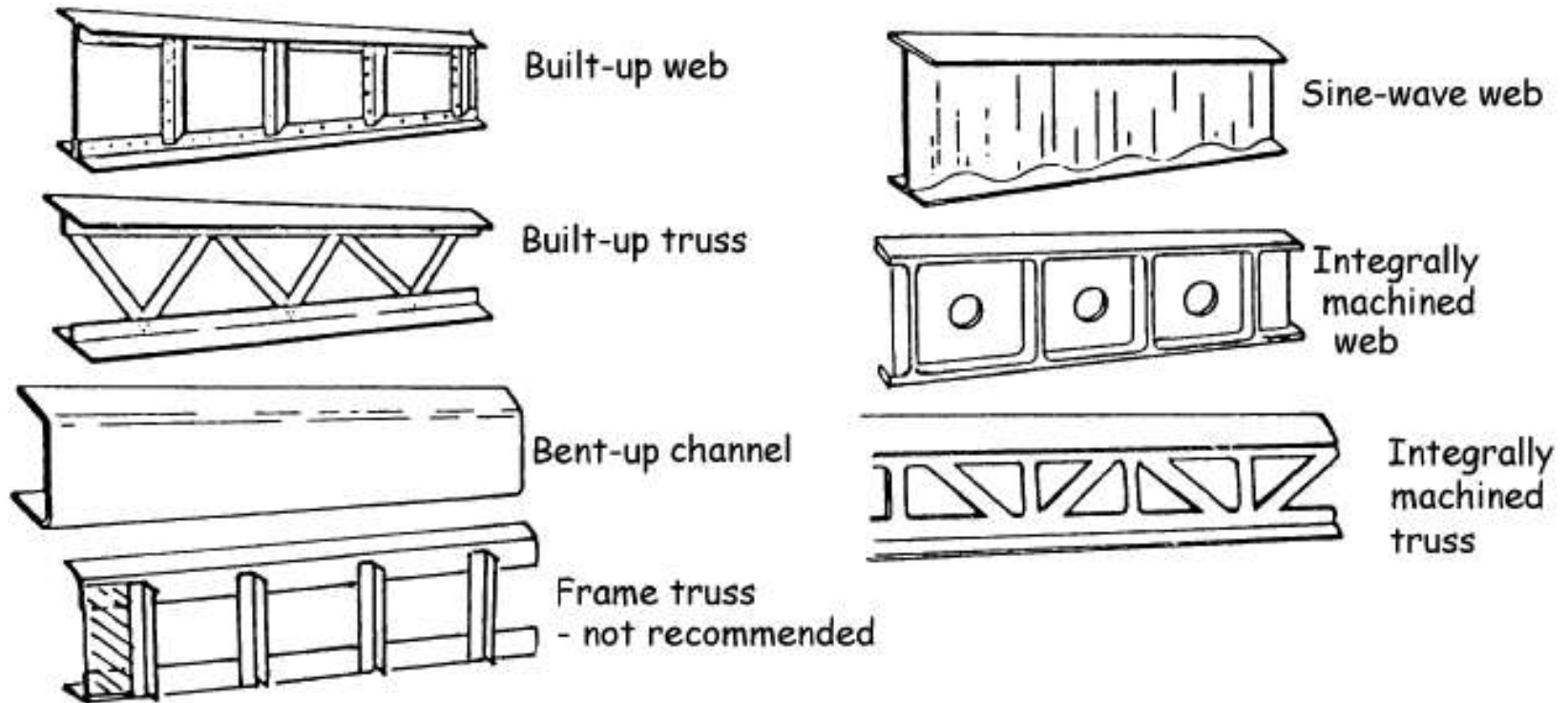


Lo spar è costituito dalle solette (caps) e da un'anima (web) che assolve al compito di assorbire gli sforzi di taglio dovuti alla flessione

Ogni ala ha uno o più longheroni in dipendenza dal tipo di velivolo e dal tipo di design utilizzato

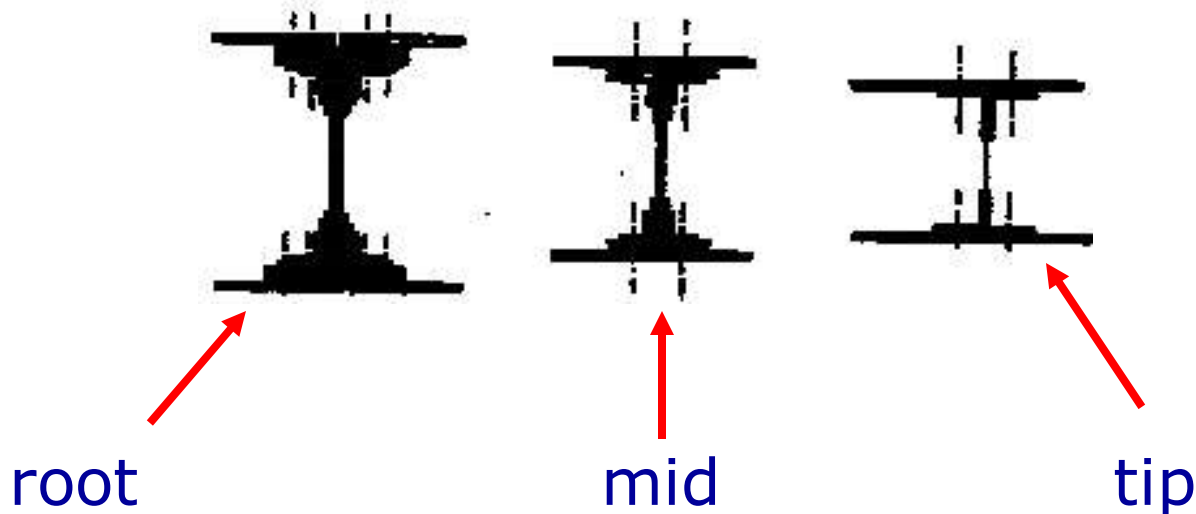


## TIPI DI LONGHERONI

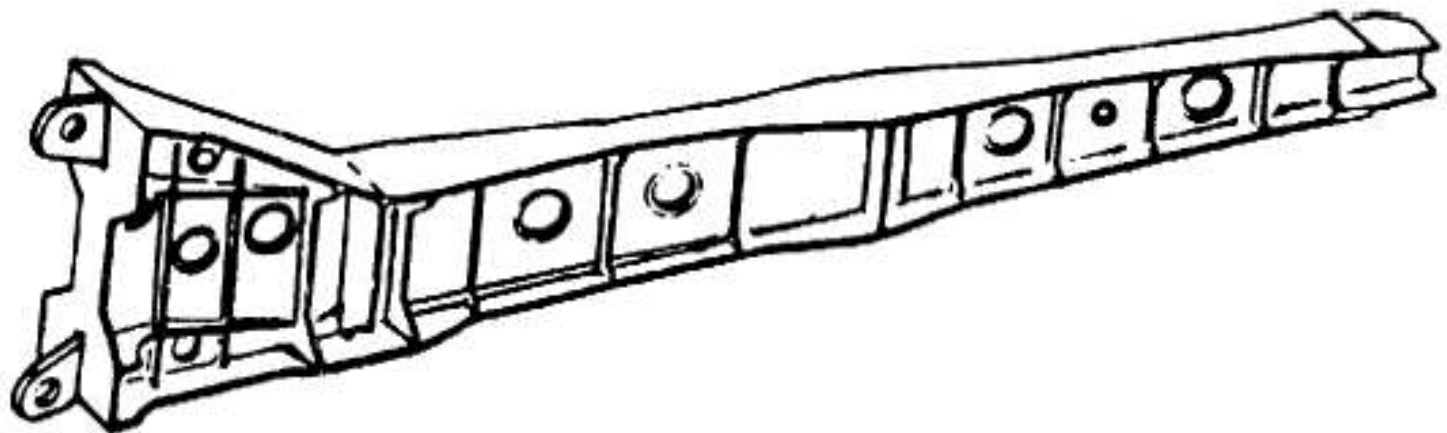
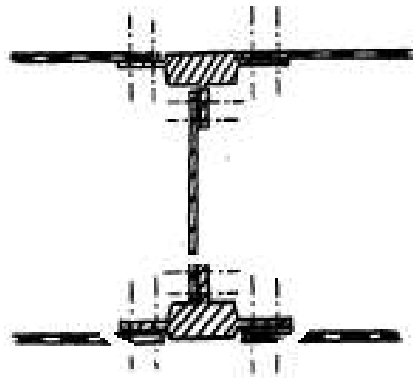


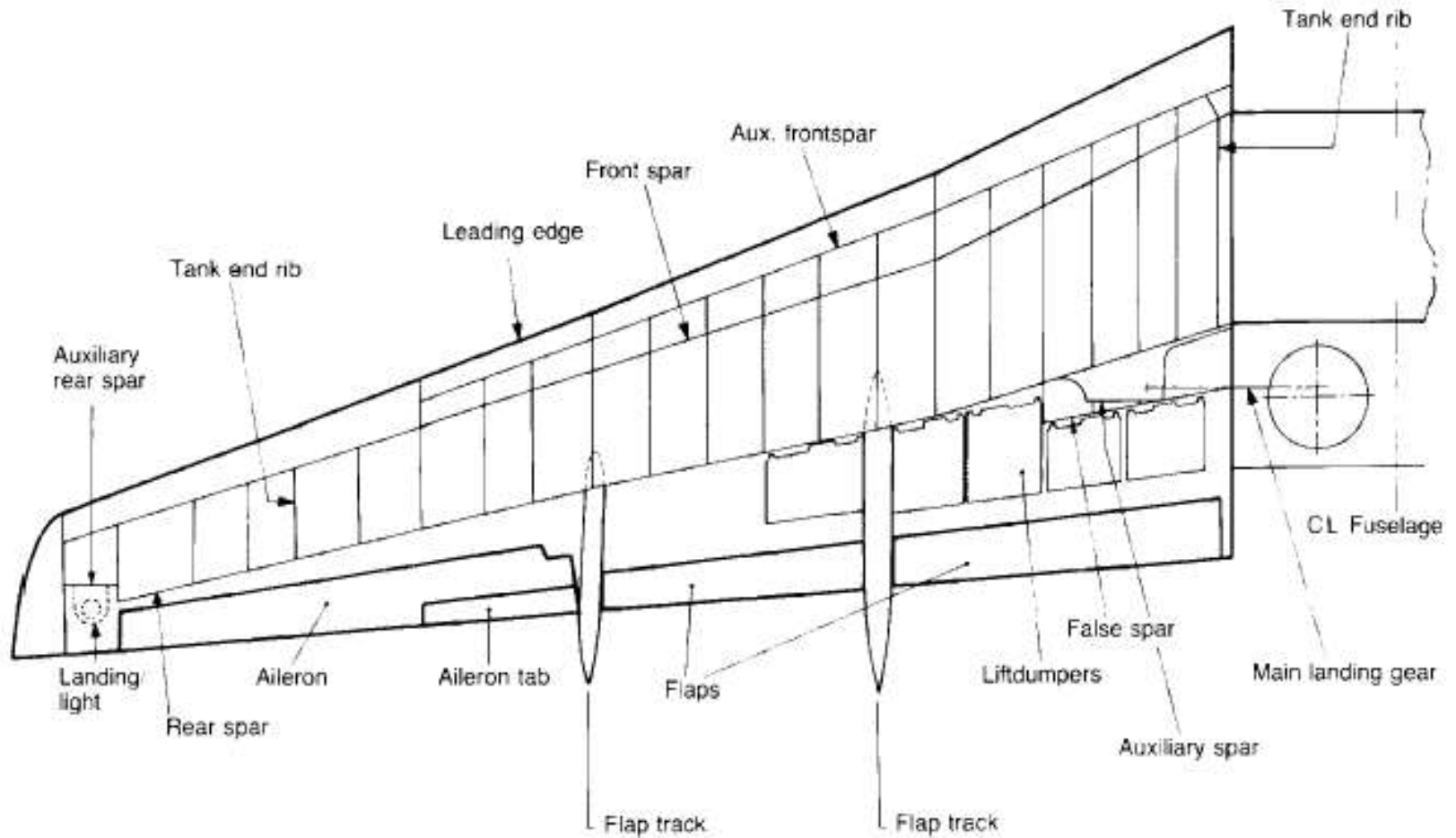
Le soluzioni concettualmente più semplici (piegatura, estrusione) sono spesso rese inapplicabili dal tipo di carico agente, specie sui velivoli di grosse dimensioni.

Il carico è infatti maggiore alla radice dell'ala, dove lo spar dovrà essere quindi dimensionato opportunamente.

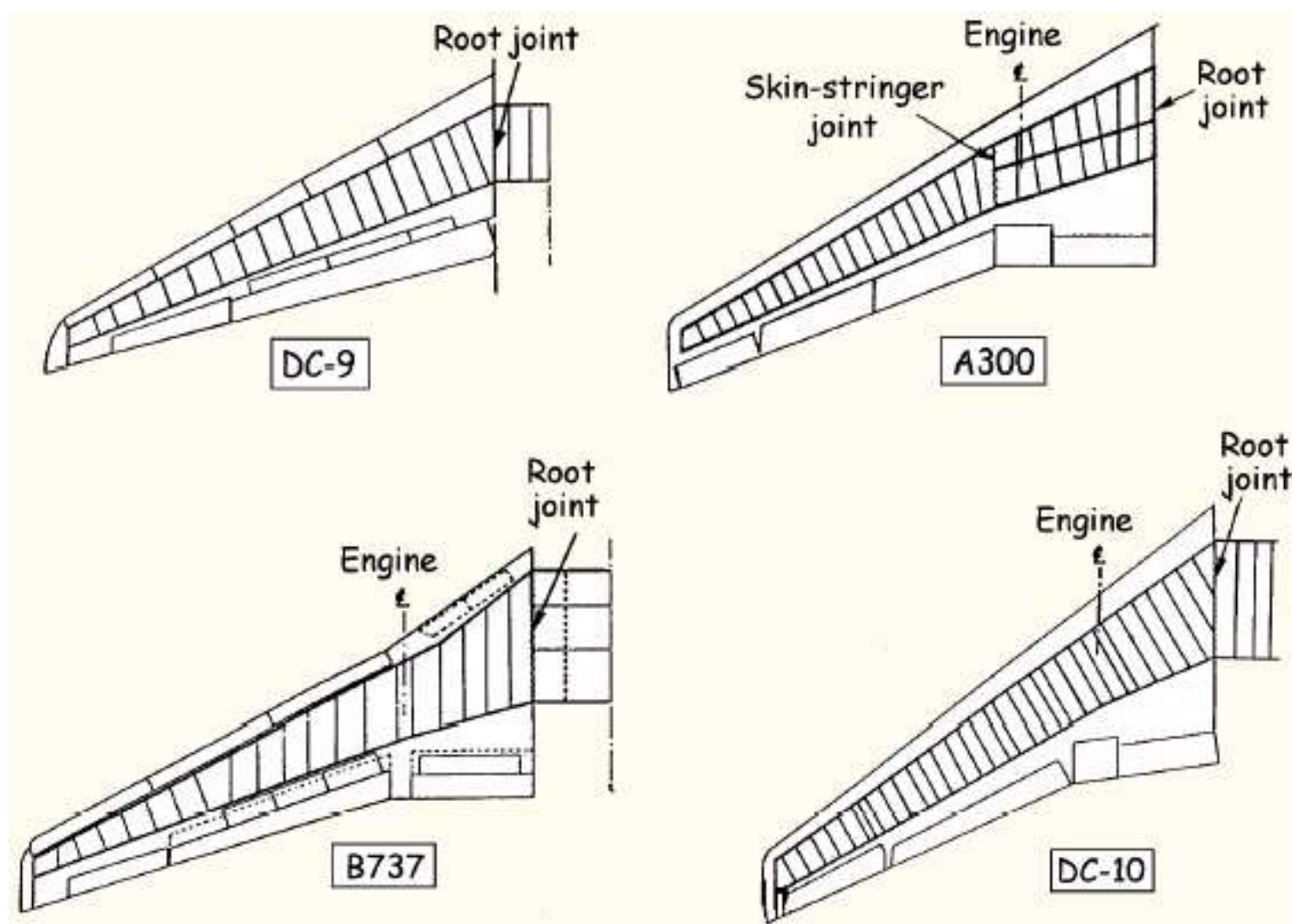


Si privilegiano perciò spesso soluzioni complesse (bonding, riveting, etc.) o costose (spar macchinato)





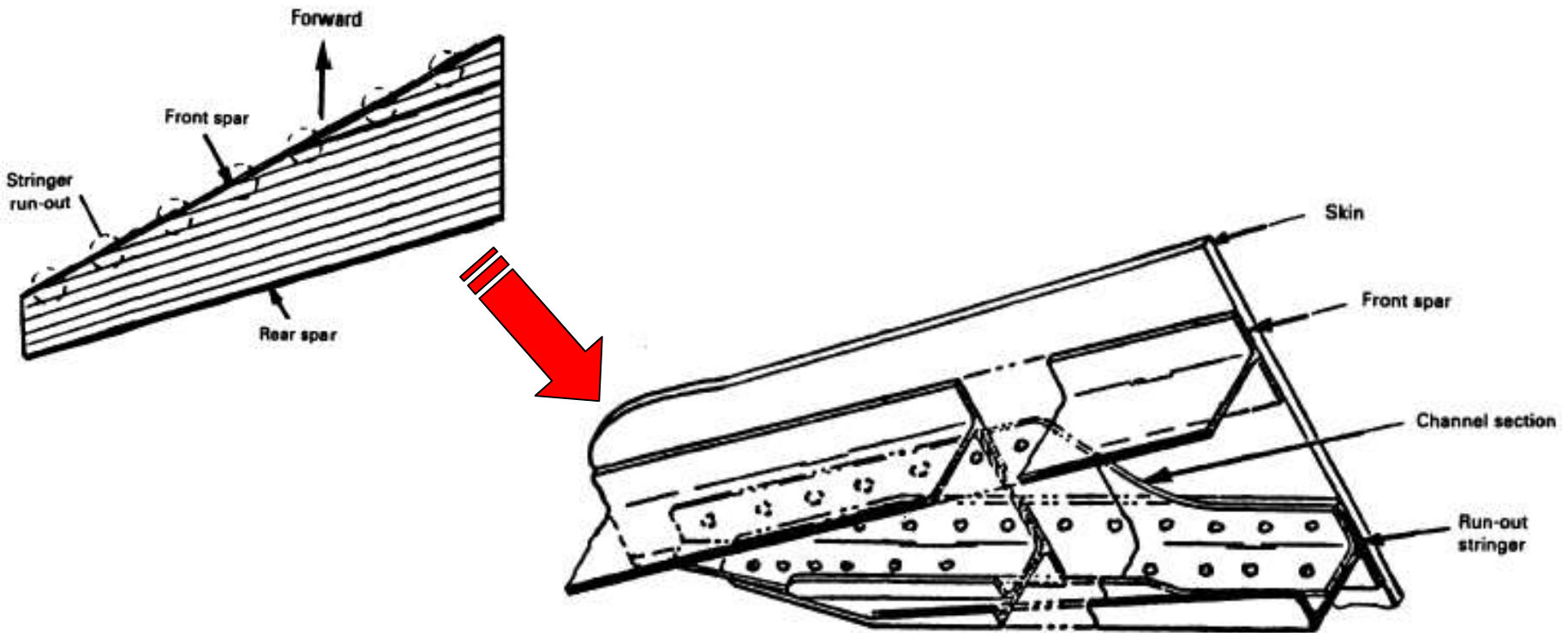
FOKKER 100



I longheroni spesso non sono rettilinei e le centine hanno un'inclinazione variabile rispetto alla C-L.

Questi fattori introducono delle complicazioni nella progettazione della struttura che in genere risulta ben diversa dai casi semplici utilizzati per la schematizzazione.

### Il caso dello "stringer run-out"

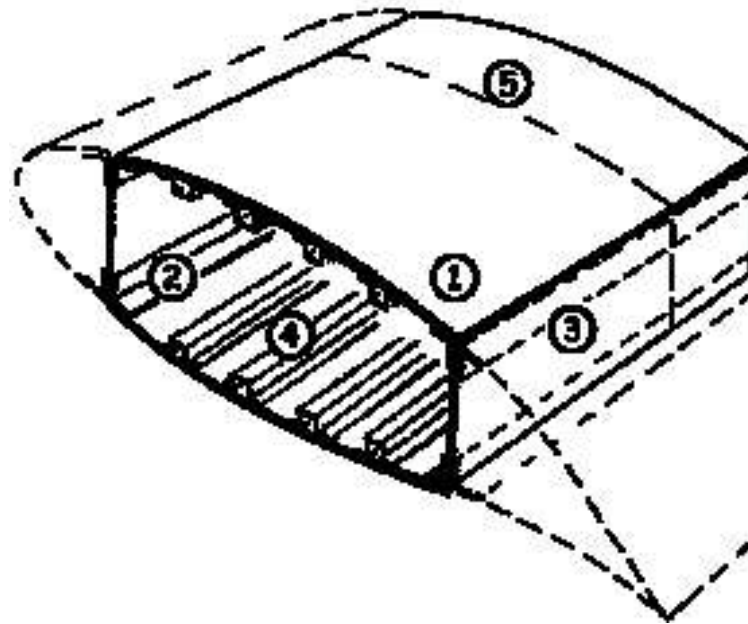




## IL BOX ALARE

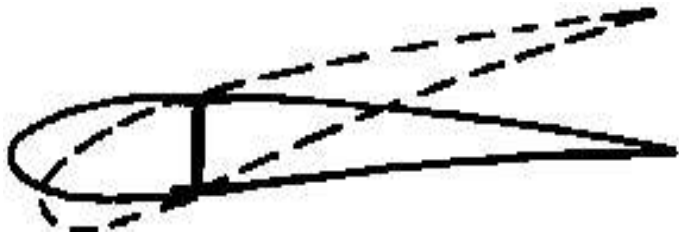
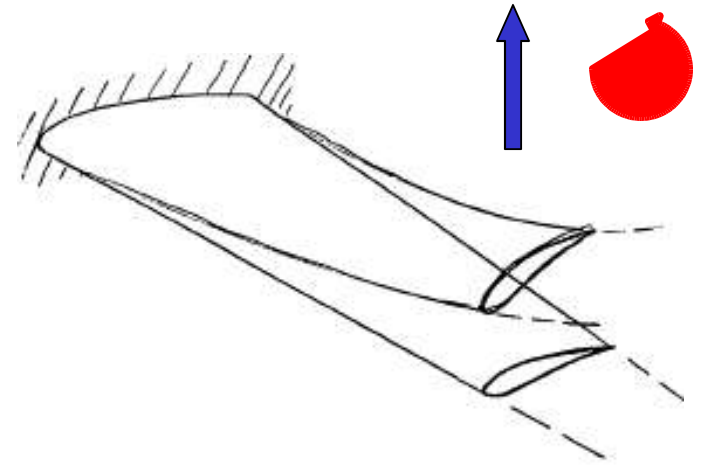
Longheroni, centine, stringers e skin sono gli elementi costitutivi del cassone (box) alare.

- 1 skin
- 2 spar cap
- 3 spar web
- 4 stringers
- 5 centine

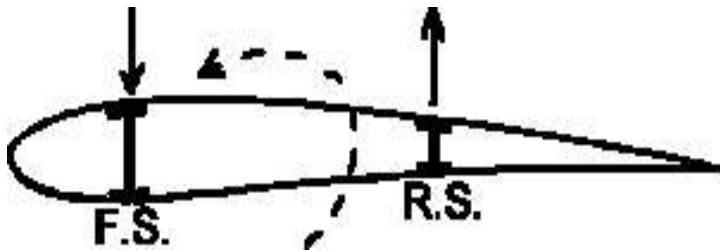


**Qual è la sua funzione?**

Sull'ala agisce, oltre ad una sollecitazione di flessione, anche una torsione dovuta alle forze aerodinamiche

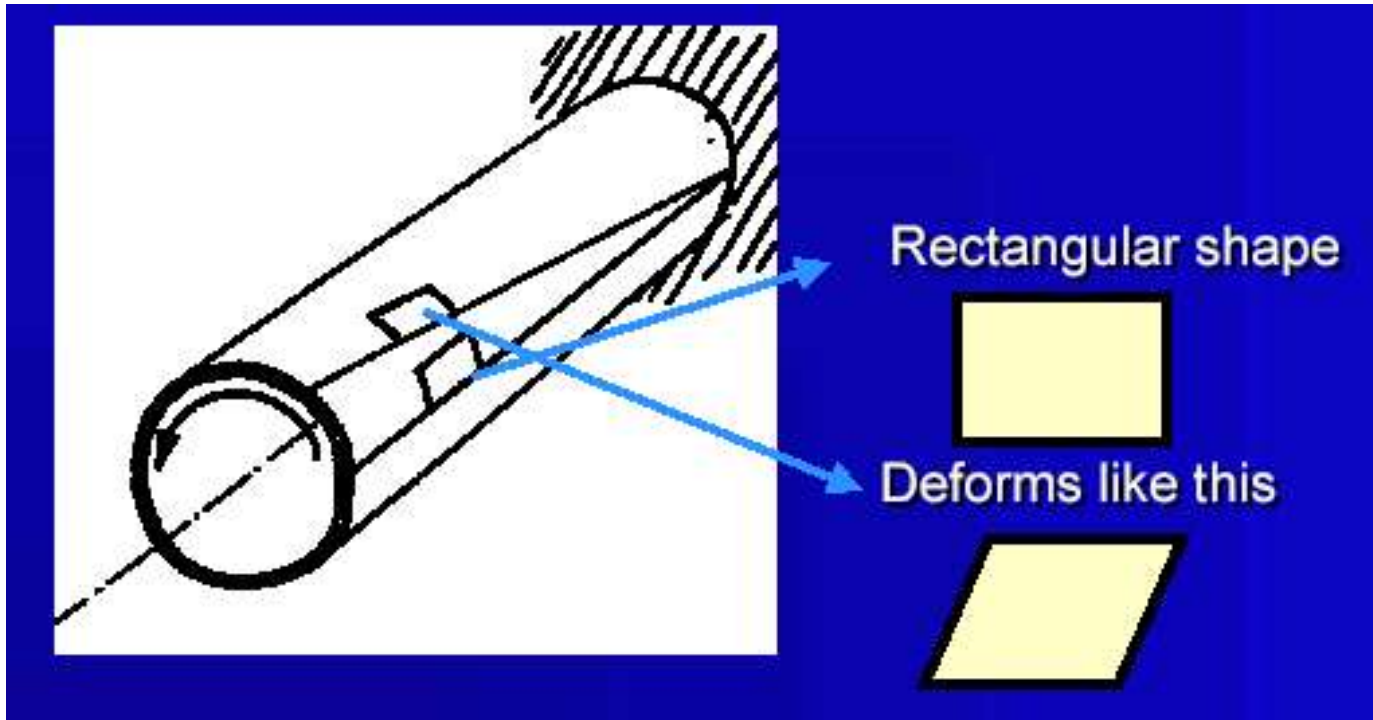


Una struttura monolongherone mal sopporta una tale sollecitazione.



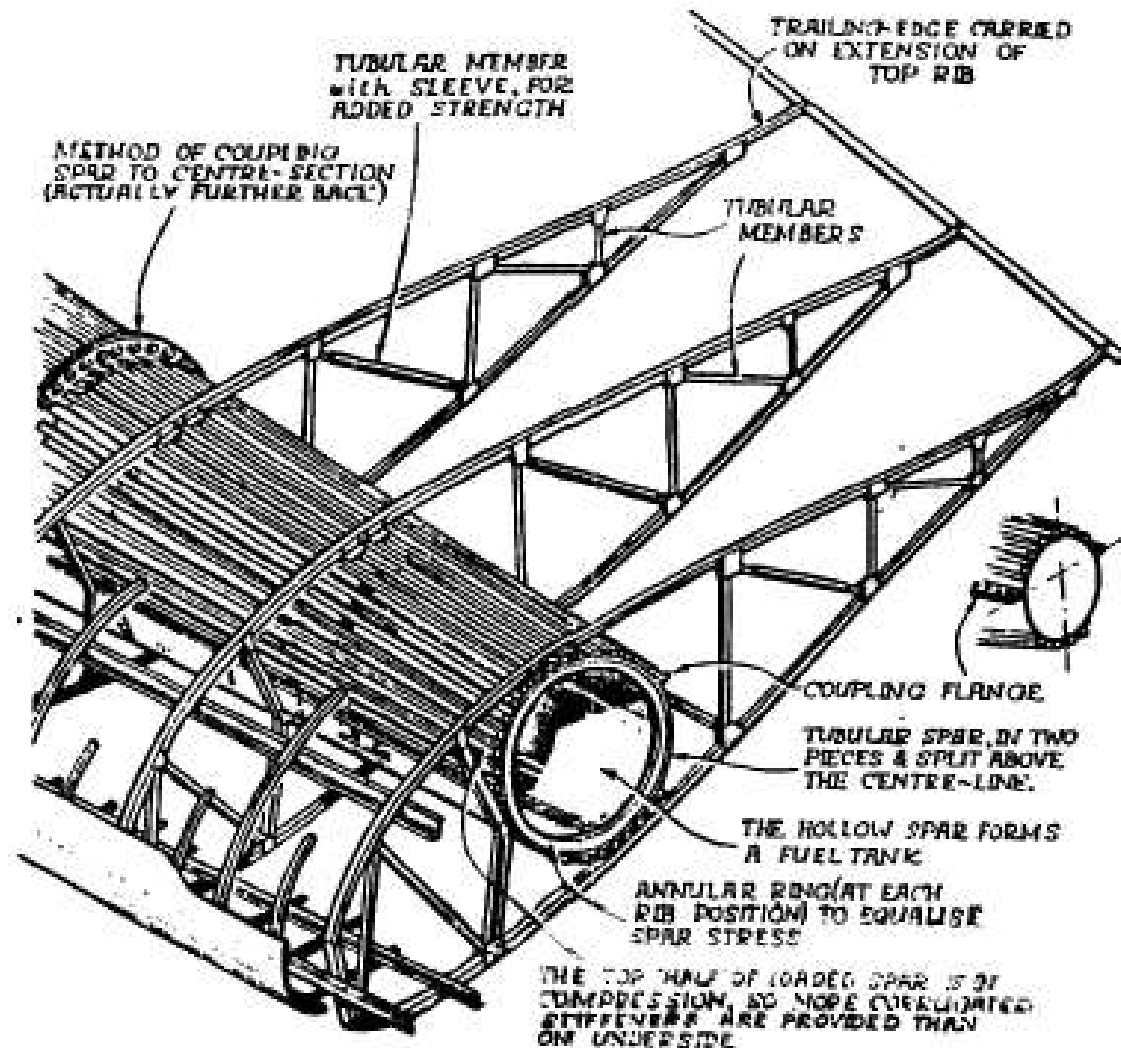
Una struttura bi-longherone reagisce alla torsione attraverso la flessione degli spars.

La struttura più idonea all'assorbimento della torsione è una struttura chiusa che reagisce con una deformazione dei suoi elementi shell



Il box alare riproduce questa geometria attraverso i suoi componenti base

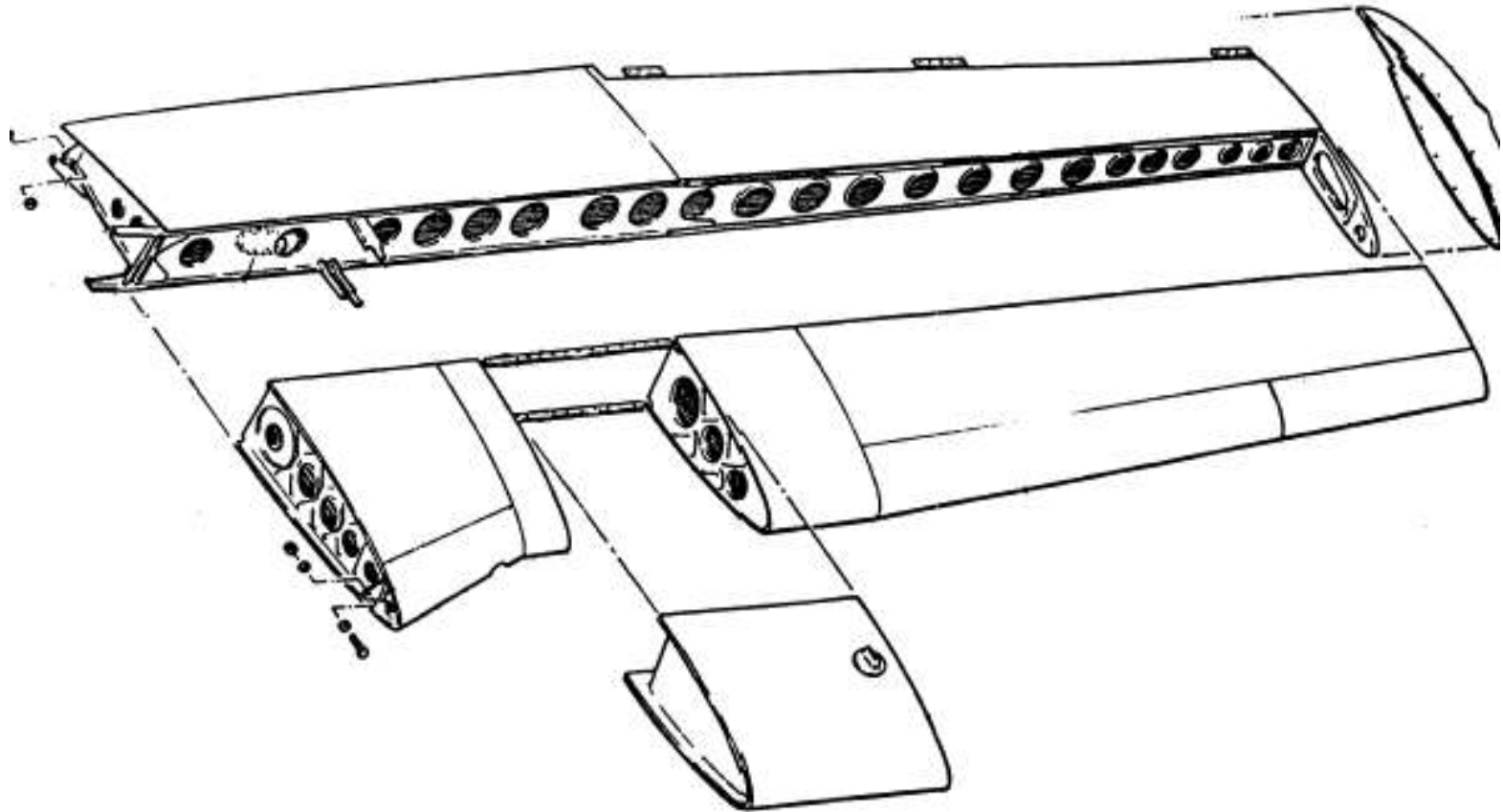
## Blackburn Duncanson: un esempio estremo



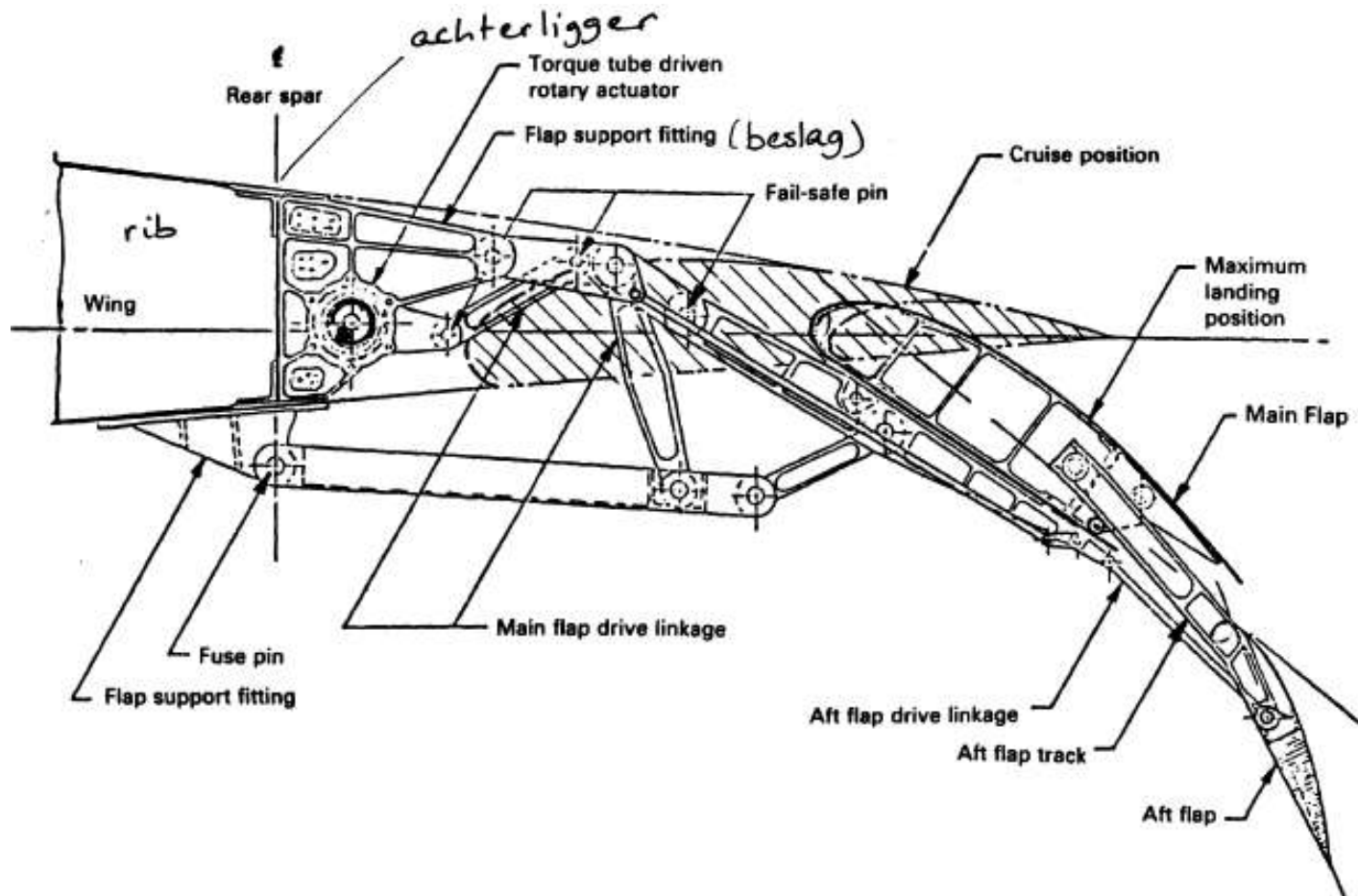
In definitiva il box di torsione ci consente di:

- resistere ad elevati carichi di torsione senza strutture di supporto
- analizzare separatamente torsione e flessione dei longheroni
- risparmiare peso
- avere ali più sottili per una data apertura o ali più lunghe per un dato spessore alla radice

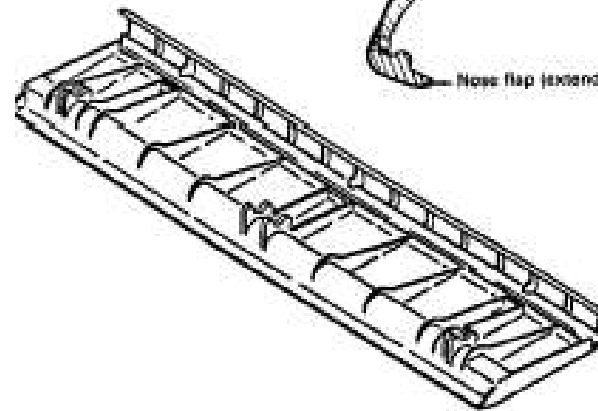
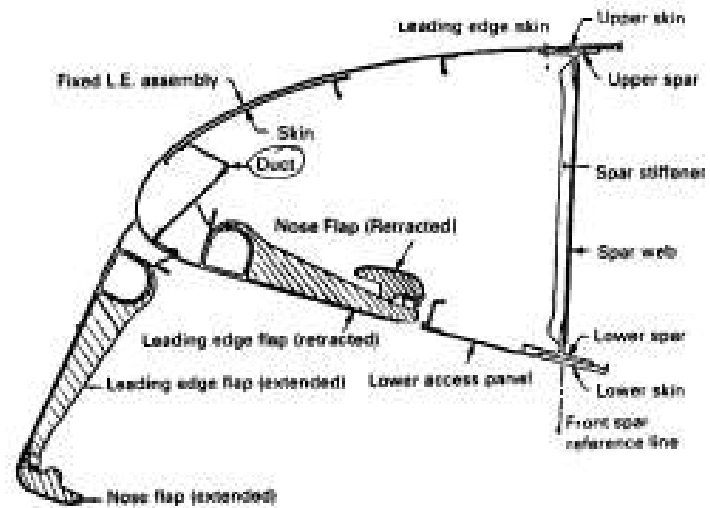
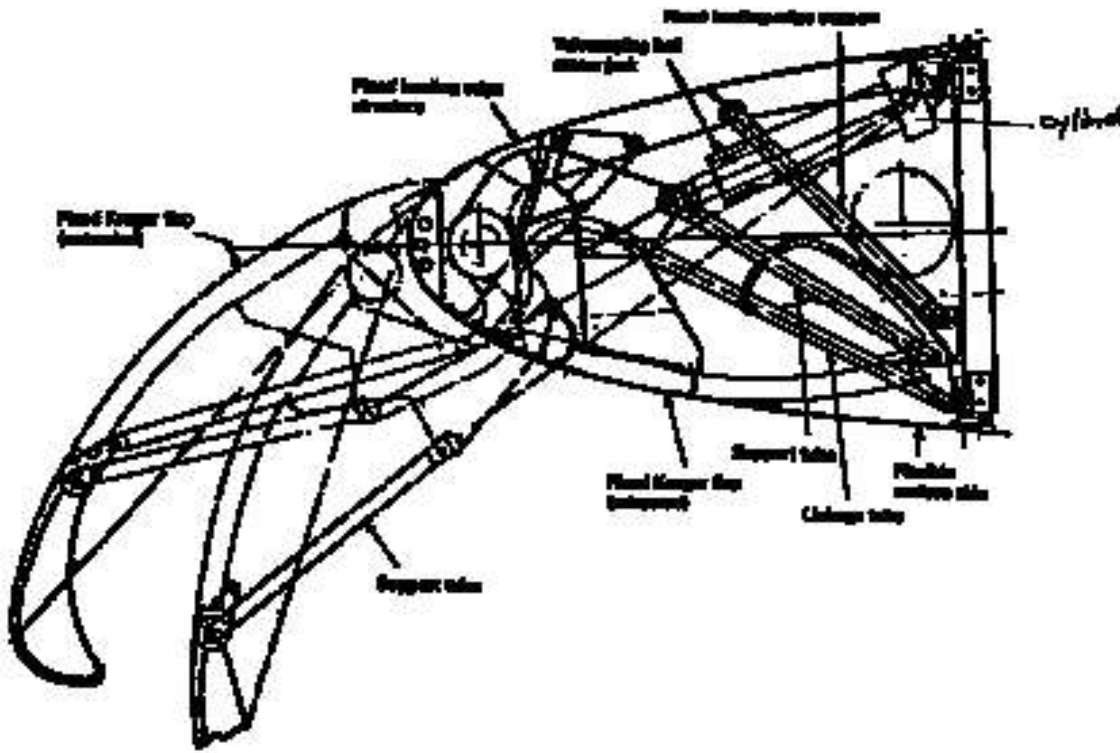
## LE APPLICAZIONI REALI



Al box alare sono connesse diverse strutture (leading e trailing edge, superfici mobili, piloni, carrelli) che complicano notevolmente il design dell'ala.



Struttura dell'inboard flap del BOEING 767

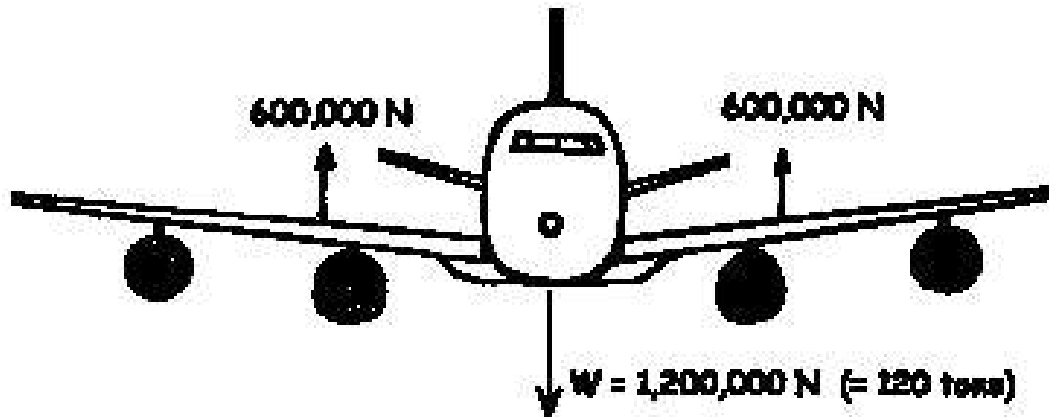


Leading edge flap (slat)



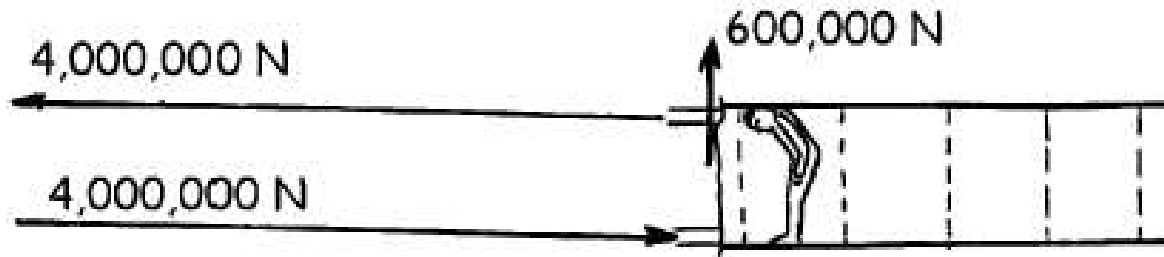
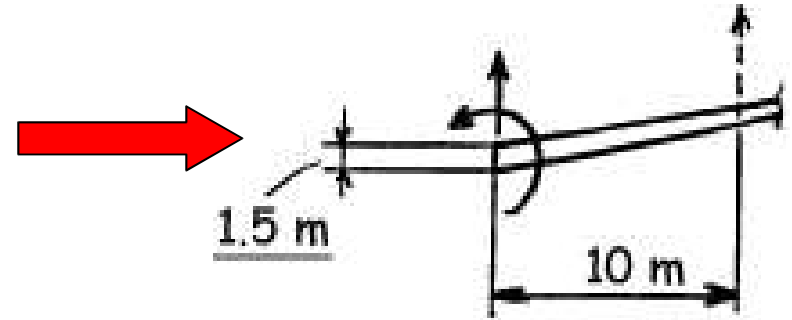
# COME SI CONNETTE IL BOX ALARE ALLA FUSOLIERA?

L'entità delle reazioni ala/fusoliera è notevole; facciamo un esempio:



Il peso di un B747, escluse ali, carburante e motori, è di circa 120 t (1.200.000 N); su ogni semiala agisce dunque un carico pari a 600.000 N

Considerando la geometria del problema, il momento alla radice dell'ala è pari a 6.000.000 Nm.

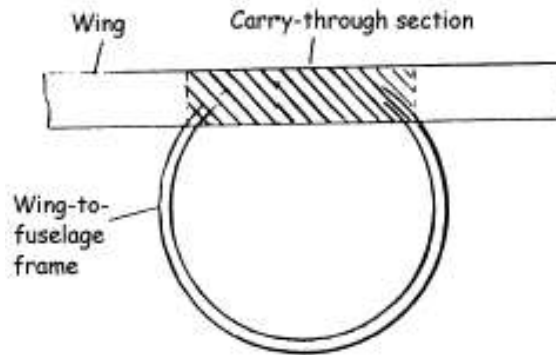


Questo vuol dire che le forze all'attacco ala fusoliera sono pari a  $4 \cdot 10^6$  N (**400.000 Kg!**)

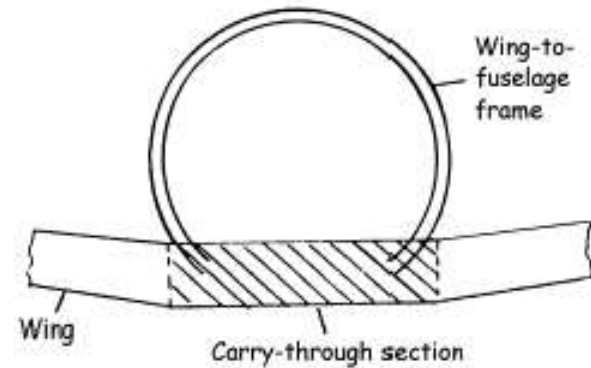
**circa 400 auto**  
**2 Km di coda**

Esistono diverse soluzioni che dipendono essenzialmente dalla posizione dell'ala

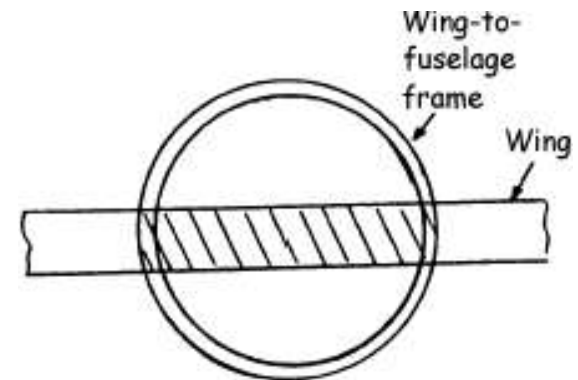
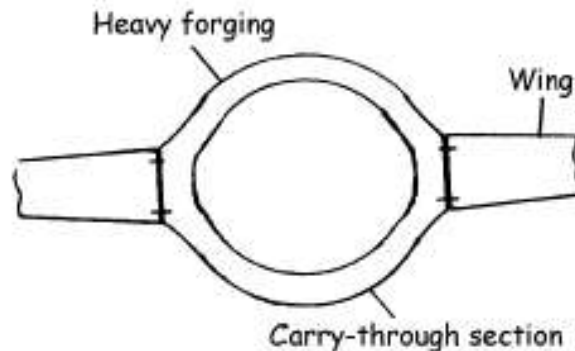
### Ala alta



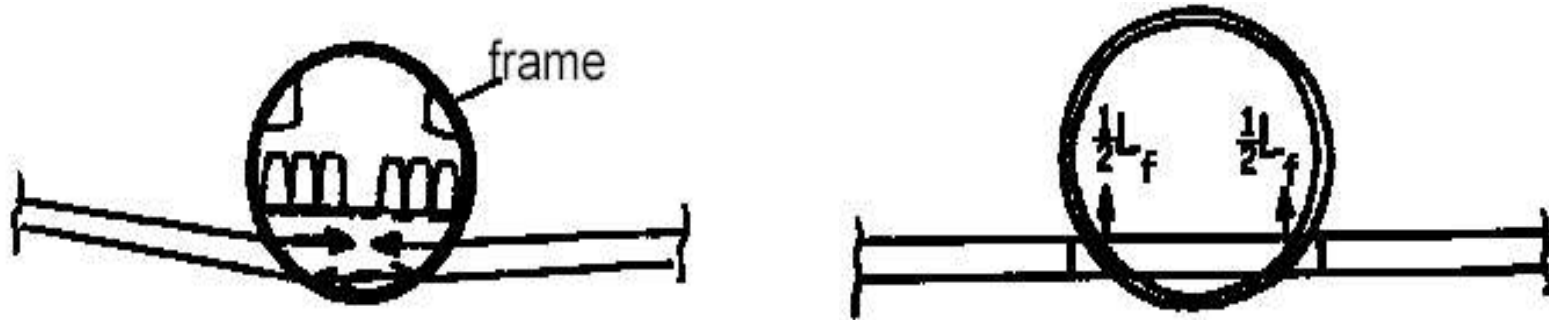
### Ala bassa



### Mid-wing

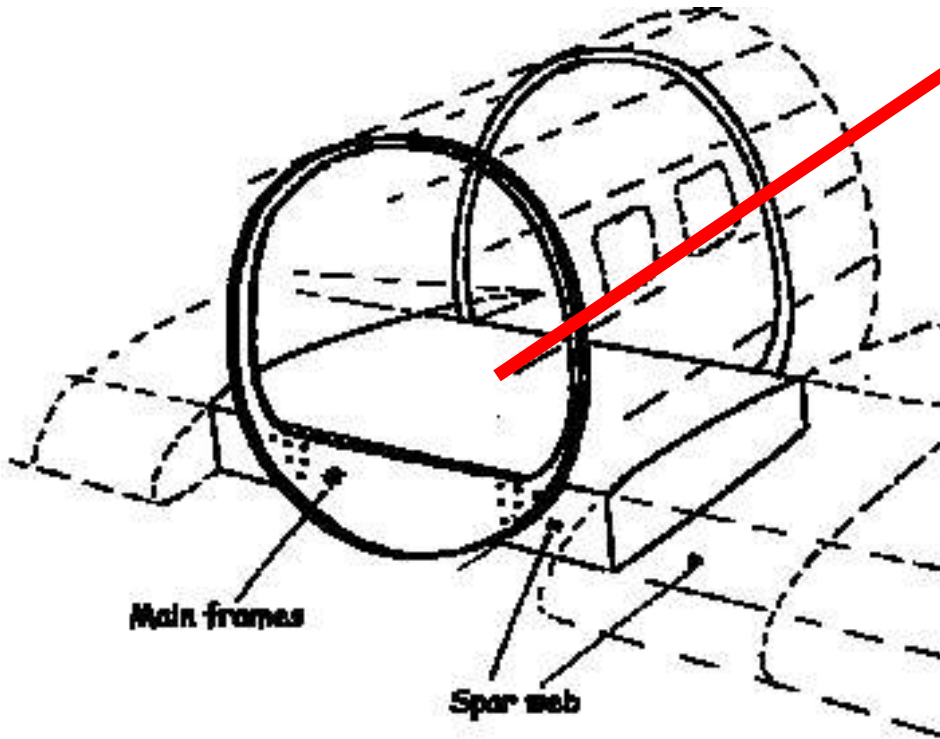


La soluzione più diffusa è quella senza connessione diretta tra l'ala e le ordinate della fusoliera



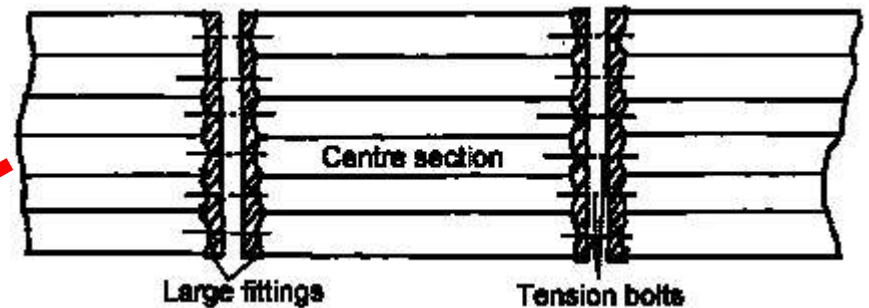
In questo modo ogni semiala regge parte del carico agente sull'altra grazie ad un cassone centrale (*central wing box*) o una connessione diretta; solo i carichi di portanza "netti" vengono introdotti sulla fusoliera attraverso le ordinate

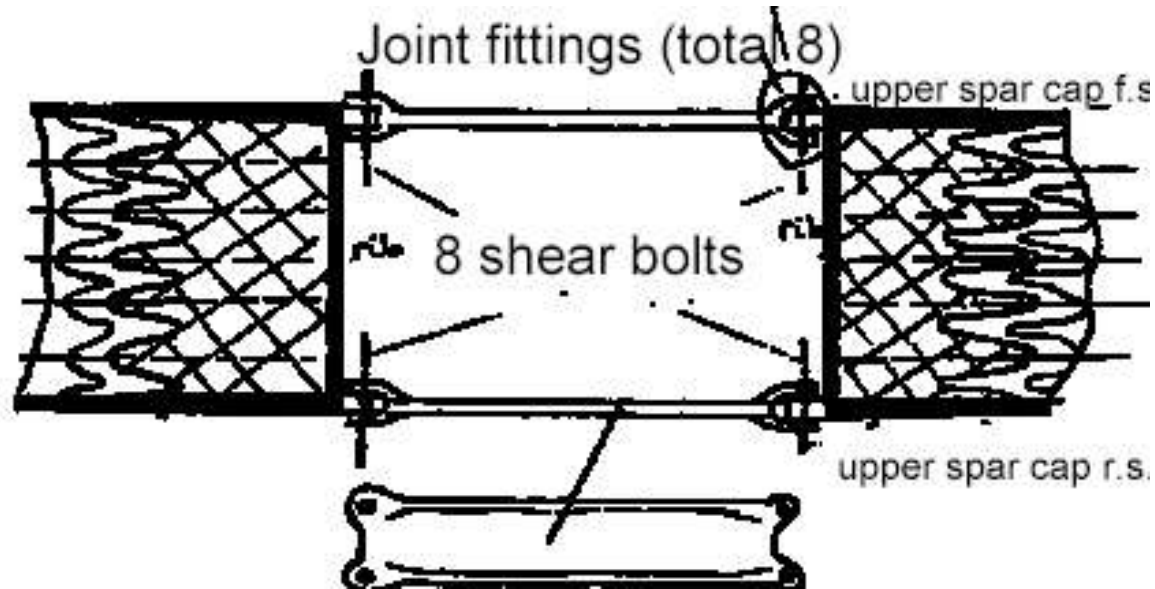
## CENTRAL WING BOX



Struttura "multi-path"  
leggera ma di difficile  
smontaggio adatta a  
velivoli di grandi  
dimensioni

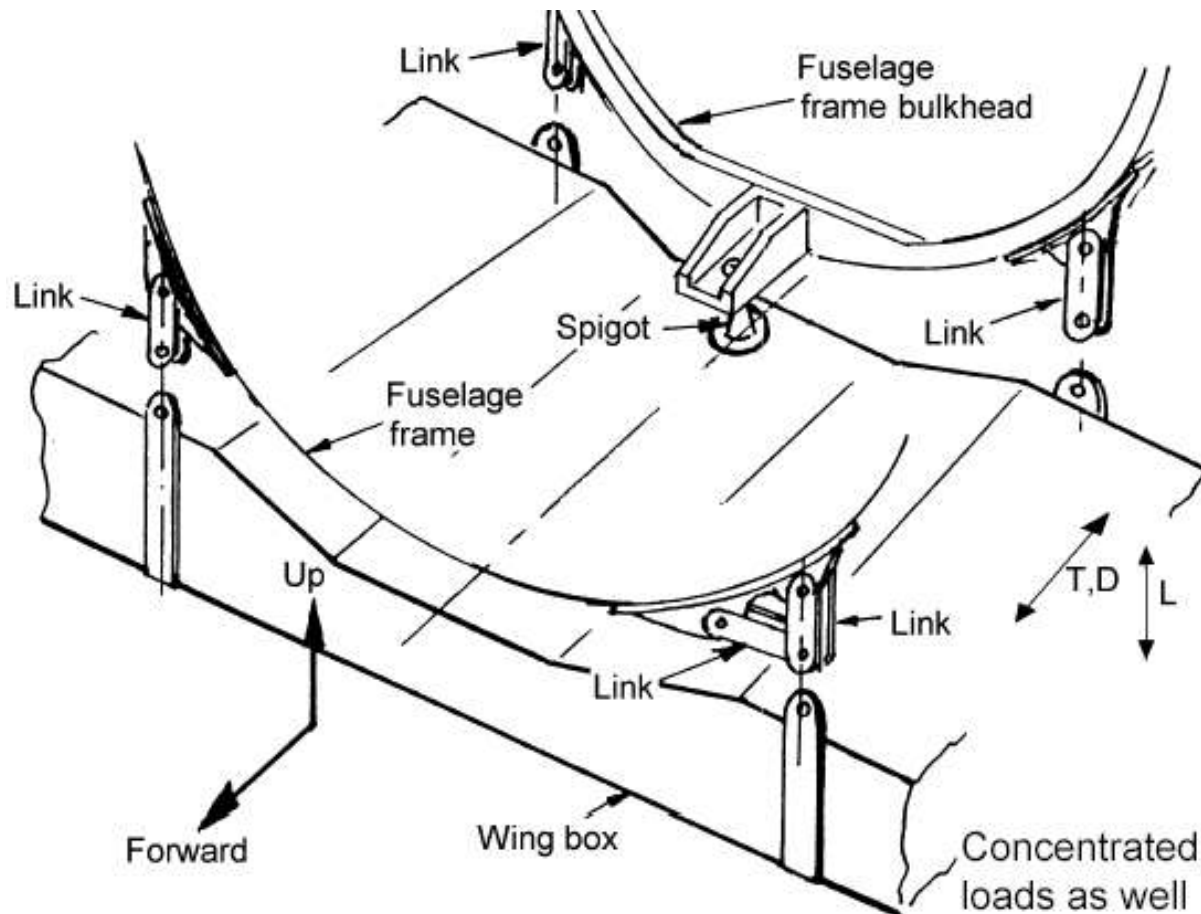
## FITTING SYSTEM

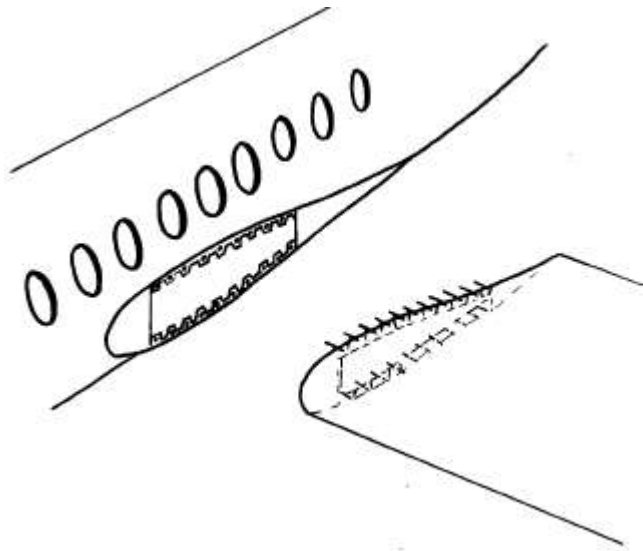




Struttura "single-path" utilizzata su piccoli velivoli.  
È pratica ed economica ma **deve** essere SAFE LIFE

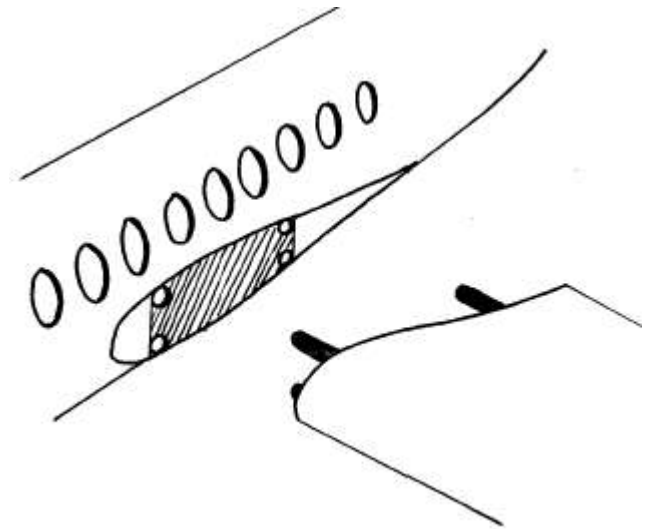
La connessione tra le ordinate ed il box alare viene spesso realizzata attraverso giunzioni semi-rigide in acciaio o in titanio





FAIL-SAFE

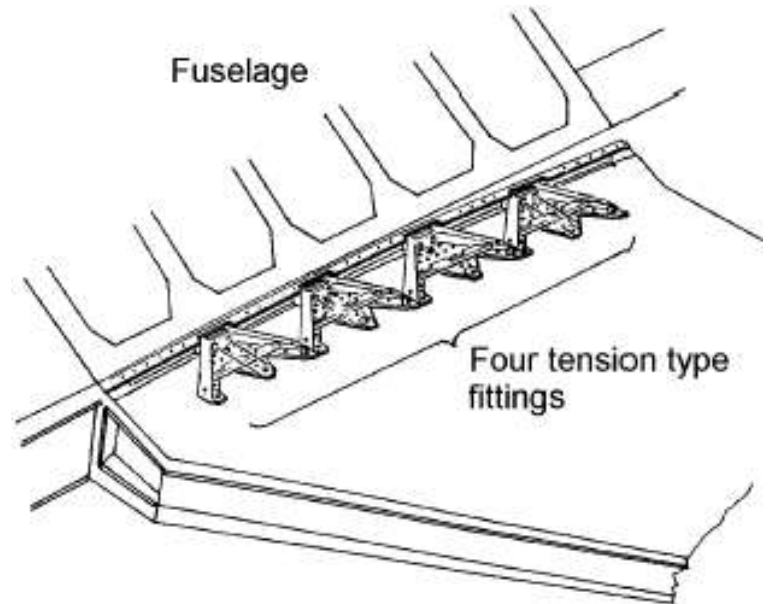
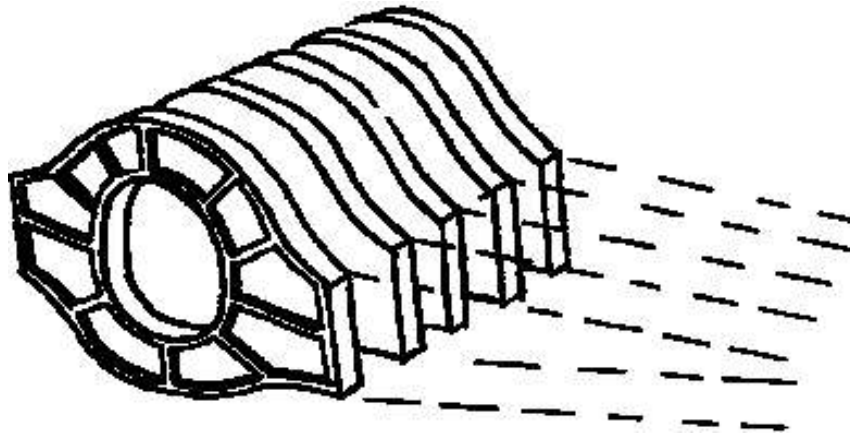
SAFE-LIFE



Anche in questo caso è possibile scegliere tra le due filosofie di progettazione

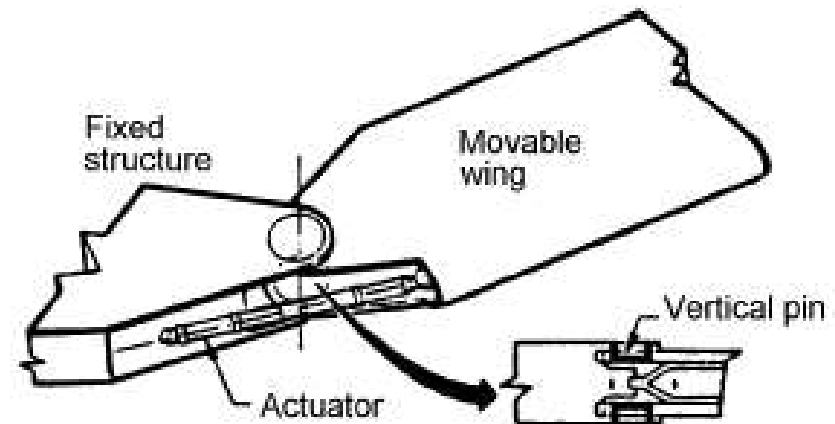
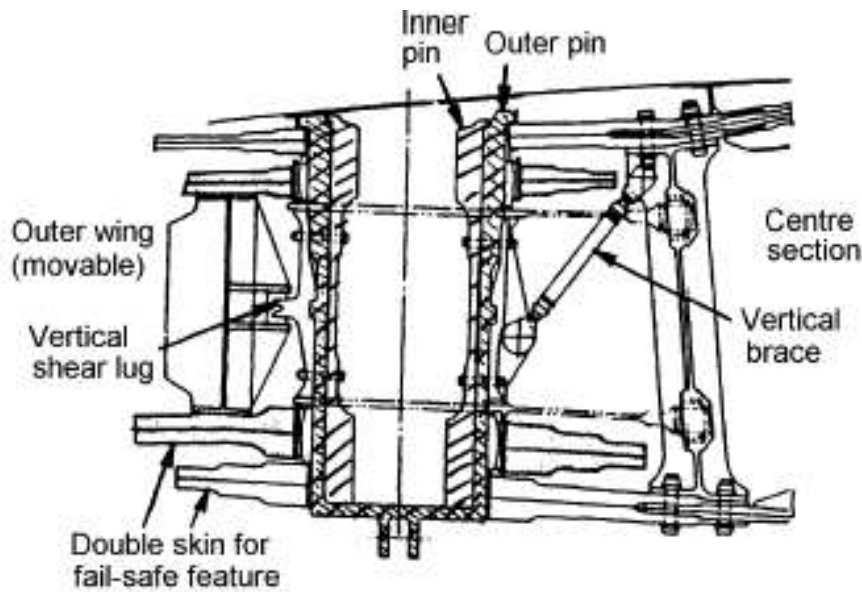


Nel caso dei velivoli da combattimento la struttura è in genere formata da ordinate macchinate cui vengono collegate le ali attraverso una serie di fittings



Giunzione ala/fusoliera F16 

# Giunzione ala/fusoliera B1 (ali a geometria variabile)

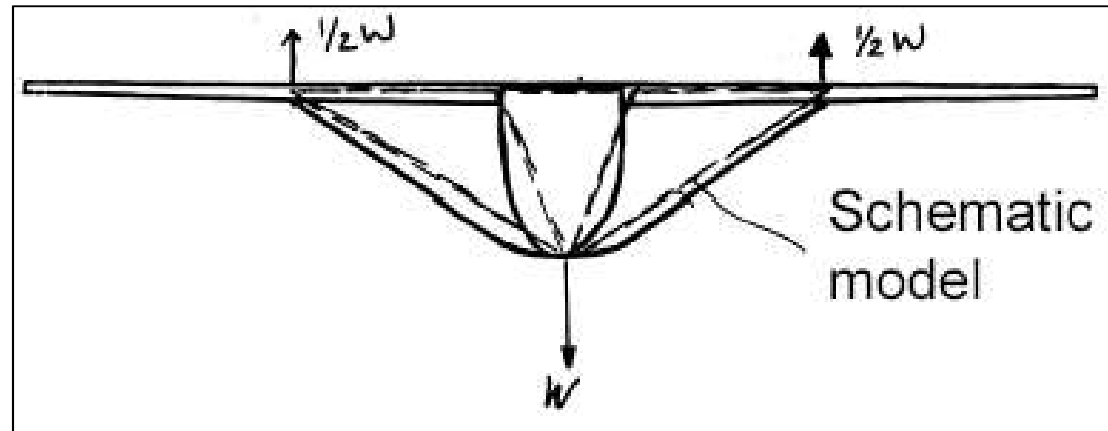


## Velivoli ad ala alta



← CESSNA 172

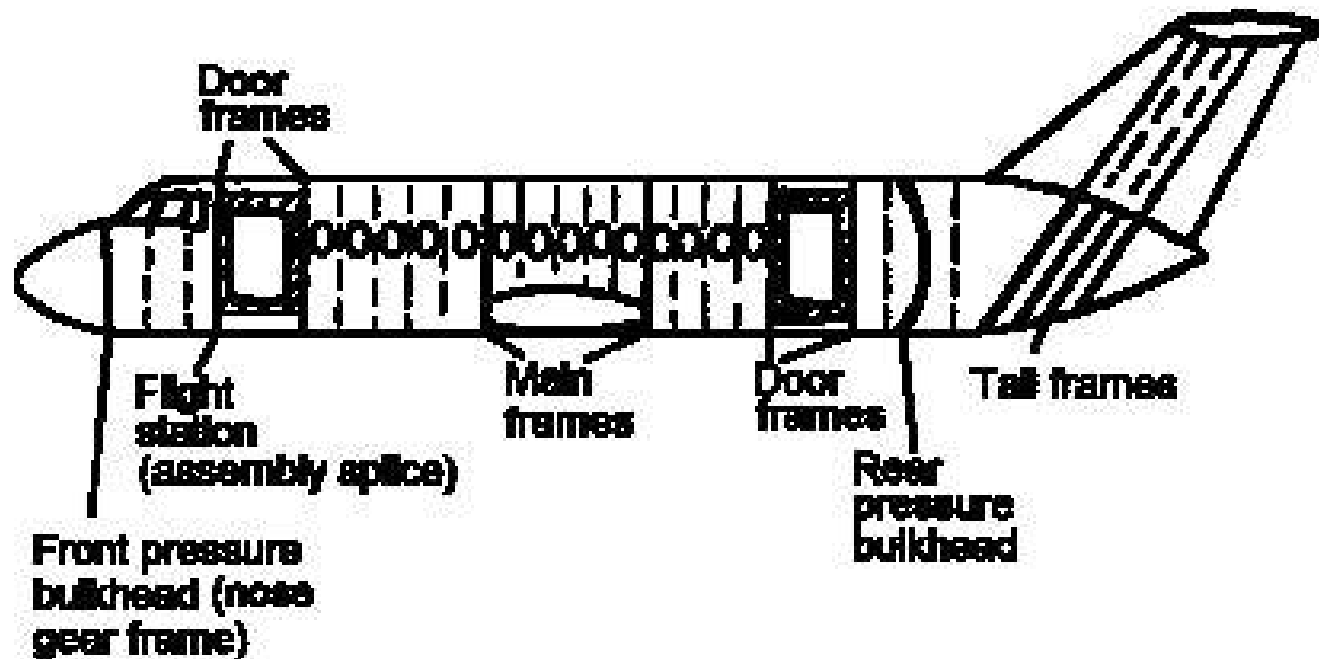
In molti velivoli da turismo si adottano soluzioni particolari per privilegiare lo spazio in cabina (ali controventate)



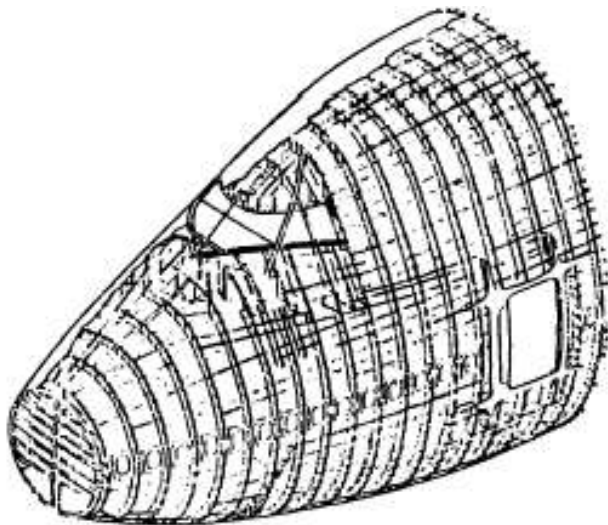
# LE ORDINATE (FRAMES)

Le ordinate (o frames) costituiscono "l'ossatura" della fusoliera, cui si connettono lo skin e tutti i sistemi che introducono i carichi sul resto della struttura.

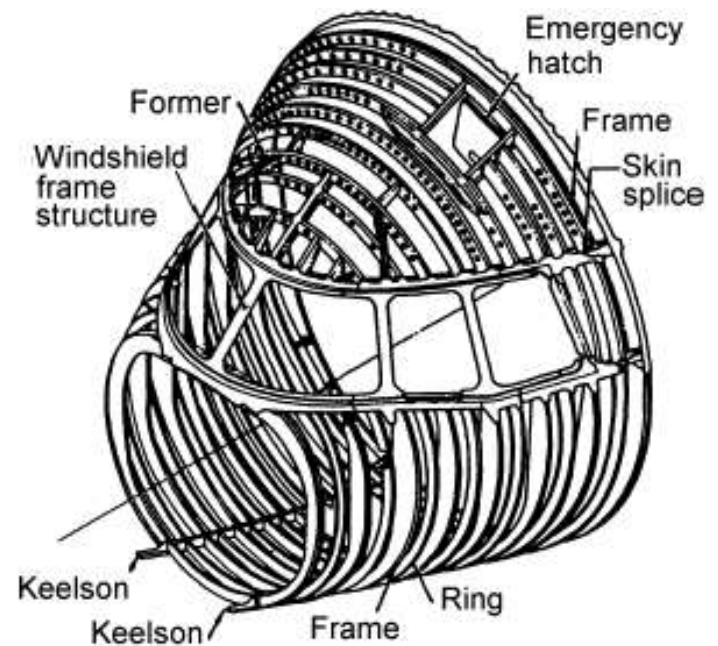
Possono avere forme e dimensioni diverse in dipendenza dal tipo di velivolo e dalla specifica funzione cui devono assolvere



Di particolare interesse sono le ordinate relative a zone critiche della fusoliera quali, ad esempio, il cockpit o le zone di attacco carrello e motore



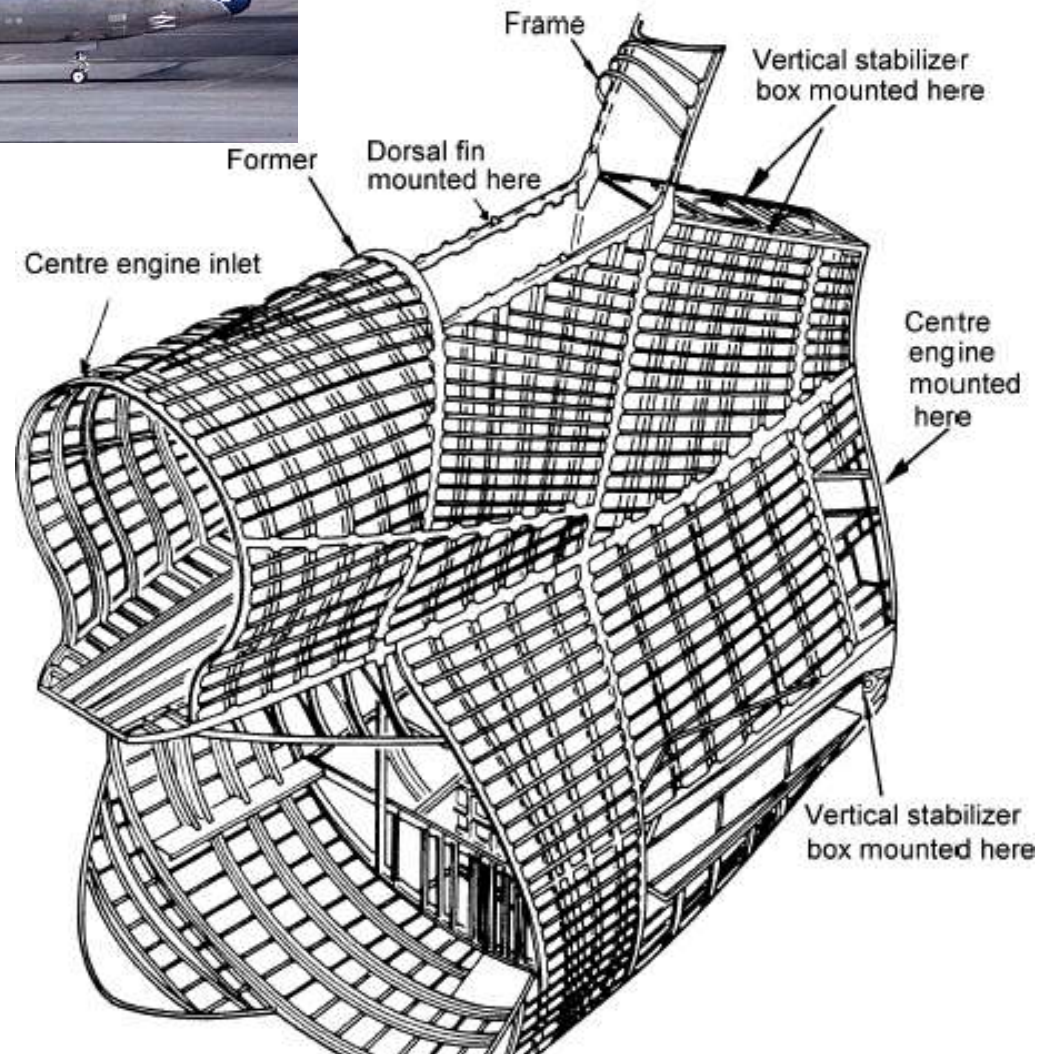
BOEING 747



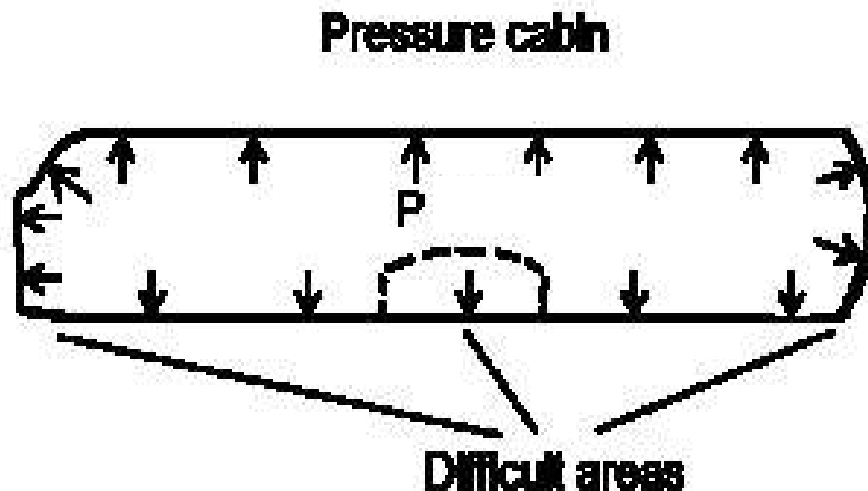
L 1011 TRISTAR



Struttura di  
attacco motore  
posteriore  
L 1011 TRISTAR

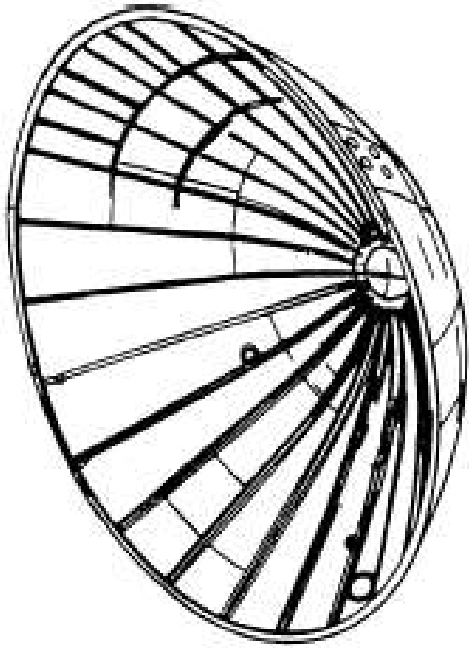


Particolare attenzione va posta nel dimensionamento e nella progettazione di alcune ordinate particolarmente sollecitate, come quelle relative ai setti di separazione tra zone pressurizzate e non pressurizzate



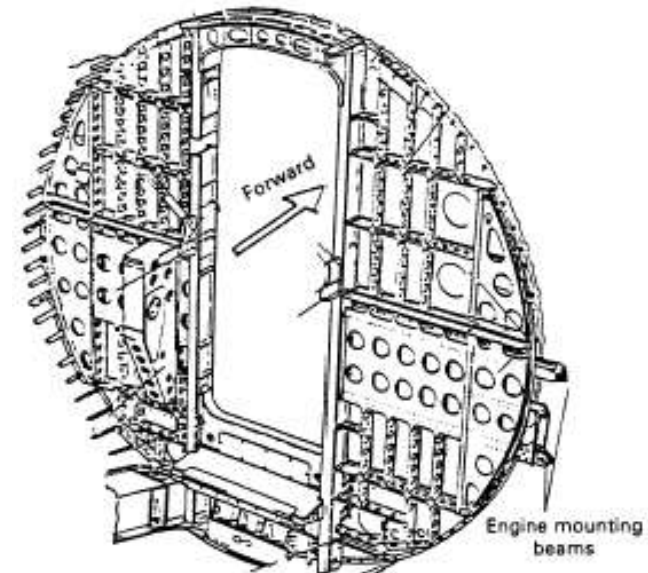
I carichi di pressurizzazione infatti influiscono in maniera sensibile sulla vita a fatica della fusoliera e costituiscono una delle sollecitazioni "imprescindibili"

## Esempi di *pressure bulkheads*



La struttura sferica ideale:

- resistente
- leggera
- ingombrante



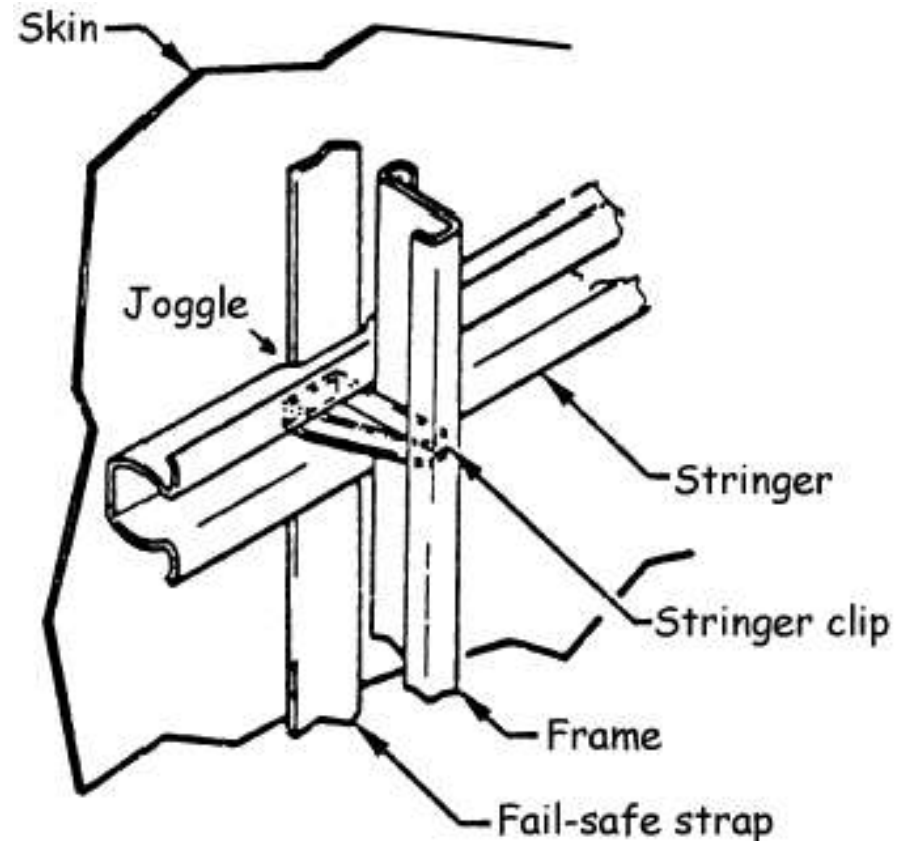
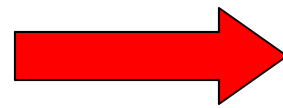
Una struttura reale (DC 9):

- piana (non ideale)
- pesante
- ottimizza lo spazio

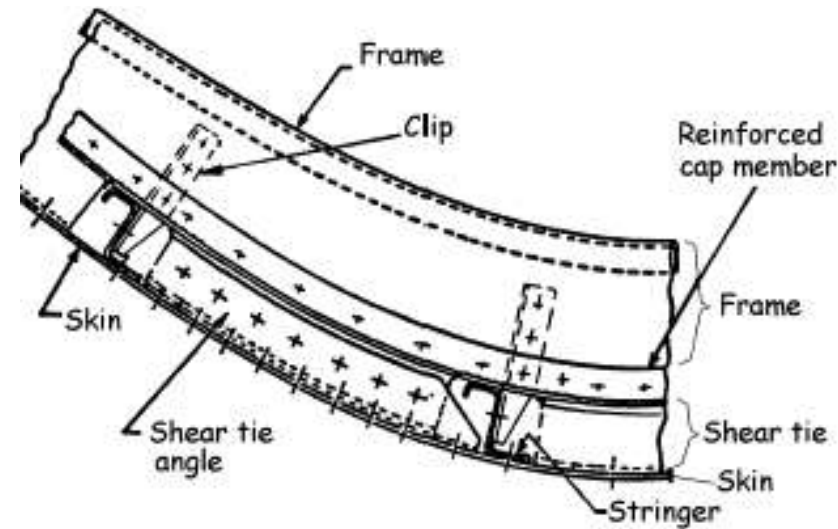
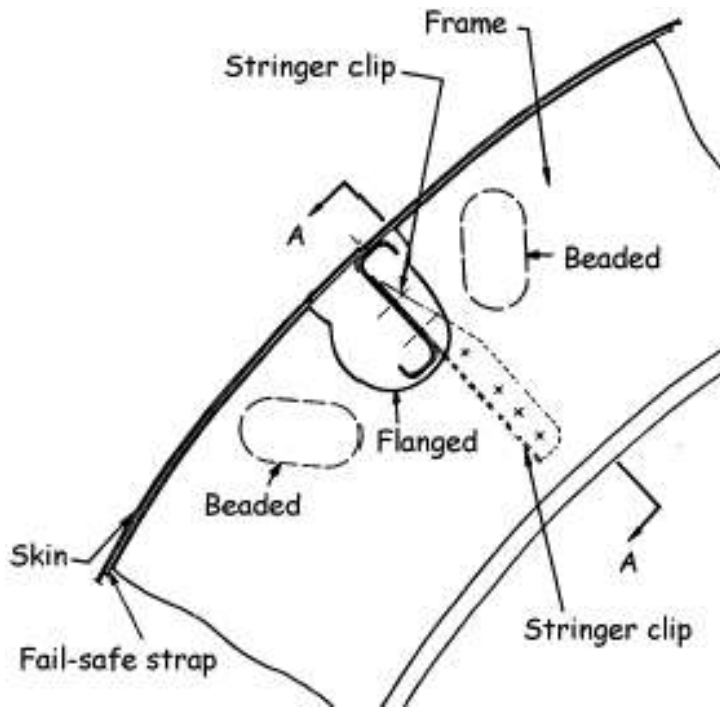


Anche per le ordinate, così come per le centine, sussiste il problema dell'intersezione con gli stringers che irrigidiscono i pannelli di fusoliera

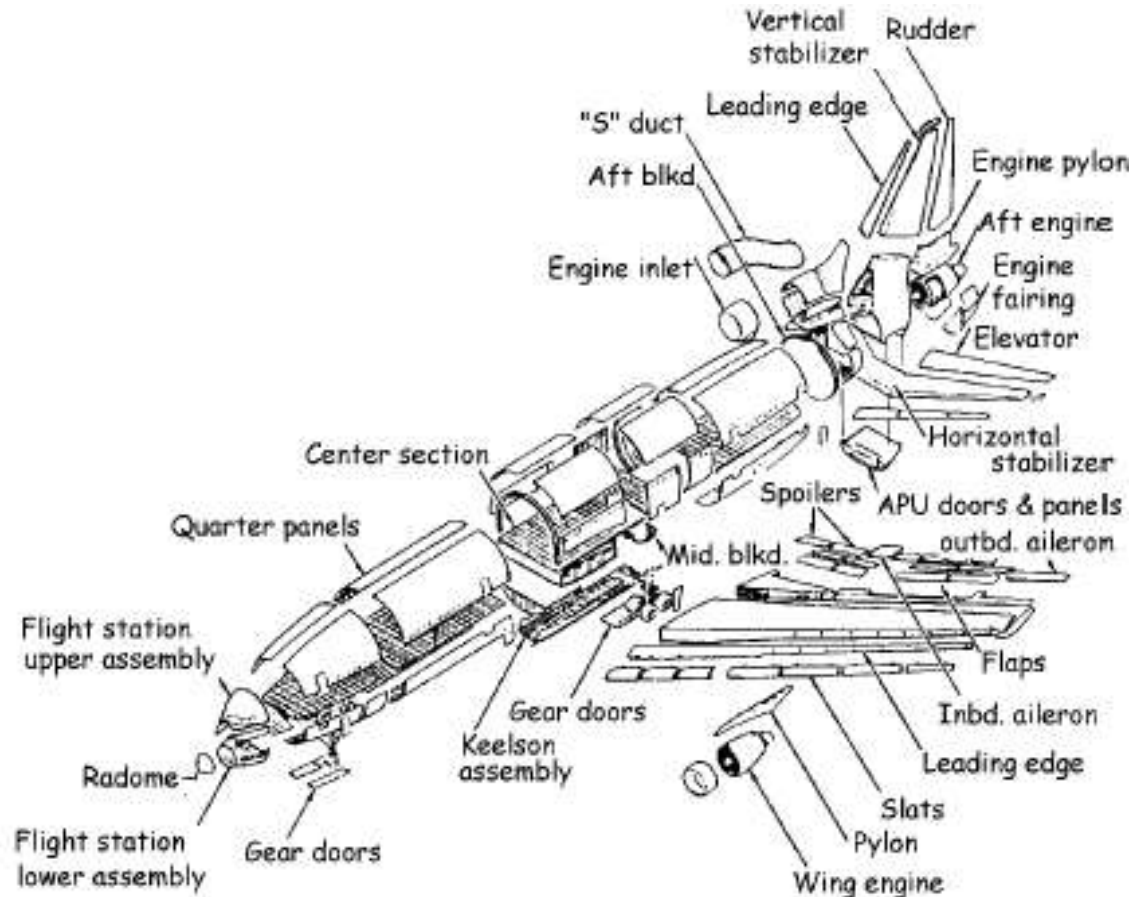
Si utilizzano in genere degli *stringer clips* di forma opportuna che collegano i due elementi e danno continuità alla struttura

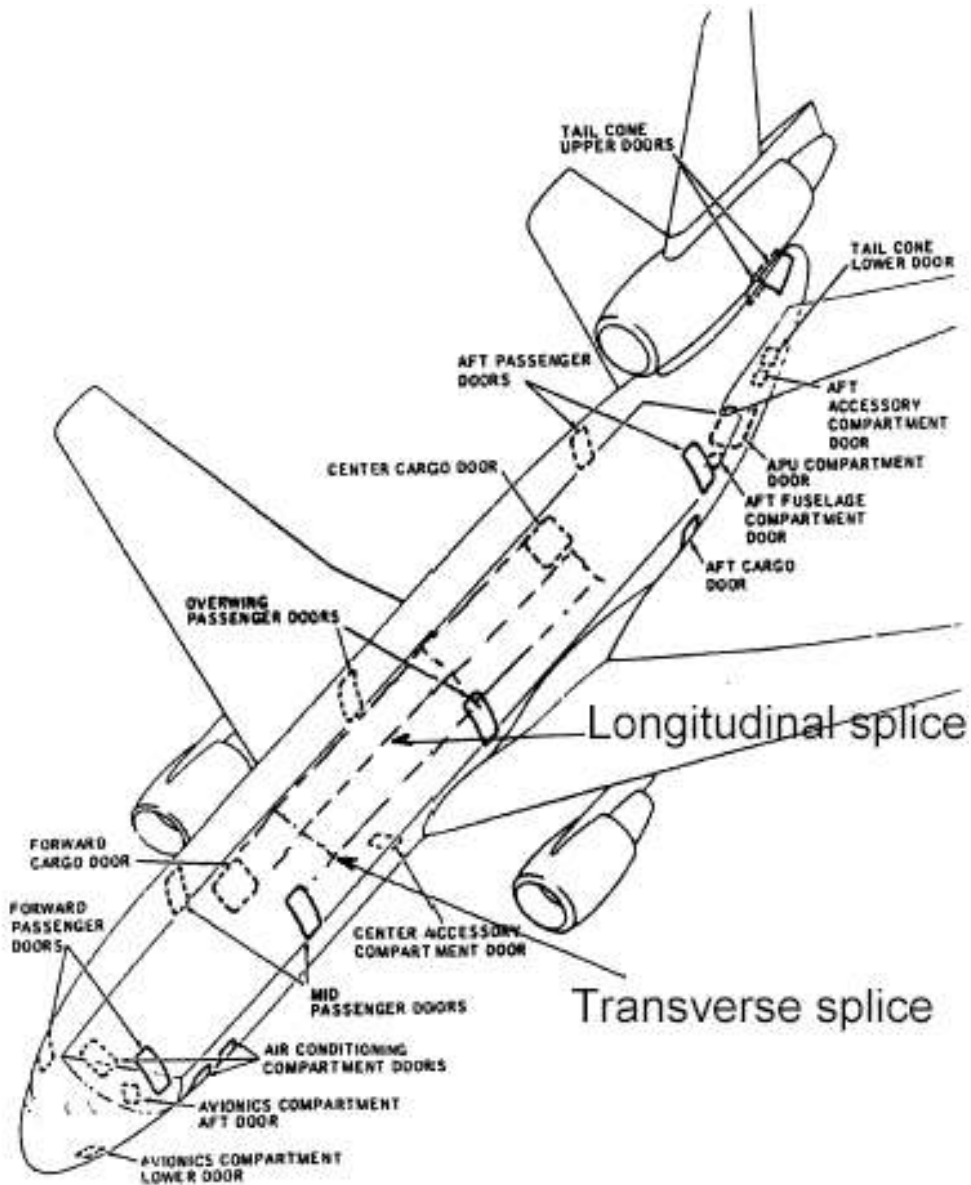


Le ordinate possono essere collegate allo skin direttamente o attraverso degli angolari che trasferiscono le sollecitazioni (gli *shear ties*), come nel caso delle centine non interrotte

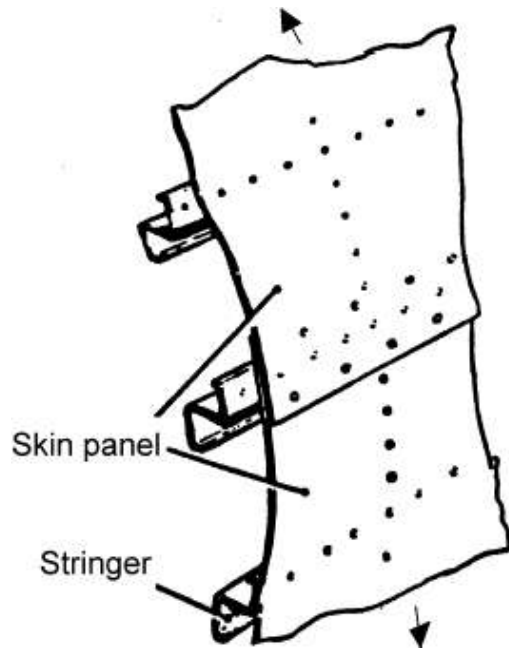


Un elemento critico nel design delle fusoliere è costituito dalla necessità di unire le diverse sezioni (sia longitudinalmente che trasversalmente) e di praticare fori (antenne, finestrini, portelli di ispezione e rifornimento) che rendono la struttura notevolmente più complessa



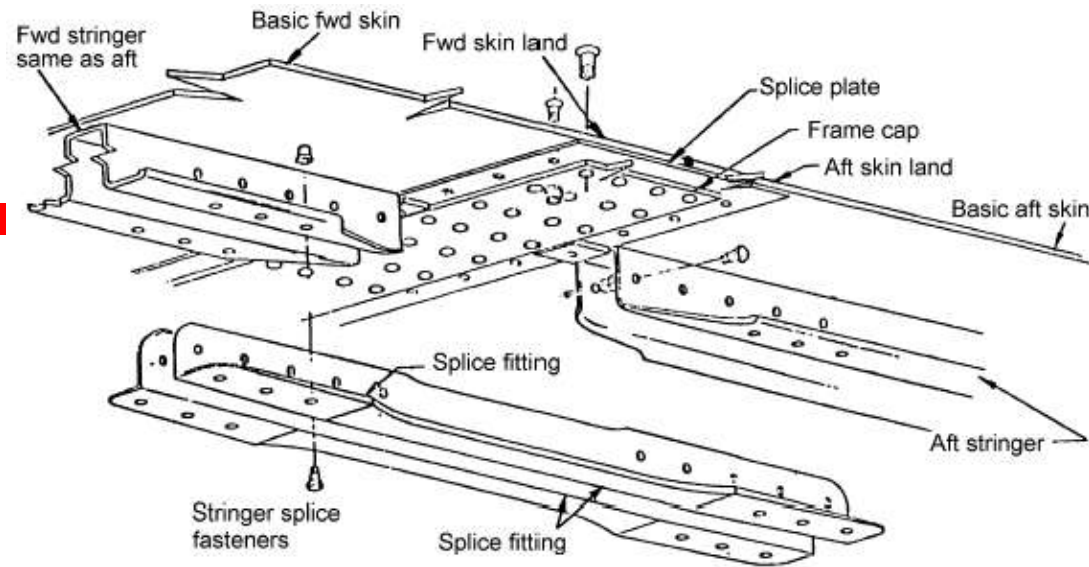


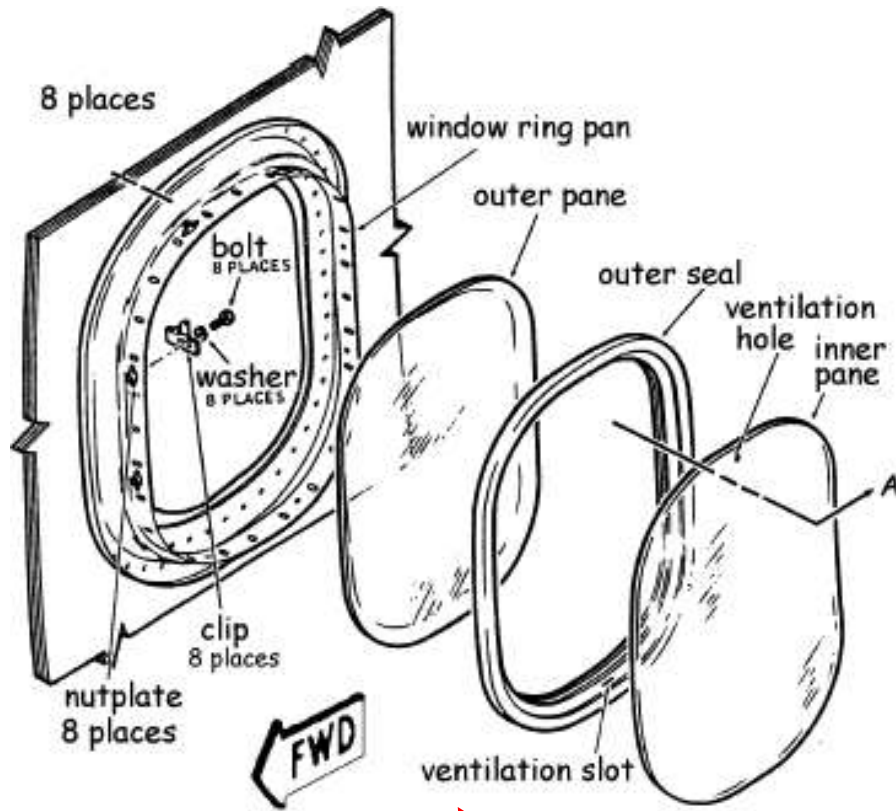
Si devono quindi prevedere sia giunzioni (splices) che aperture su gran parte della fusoliera



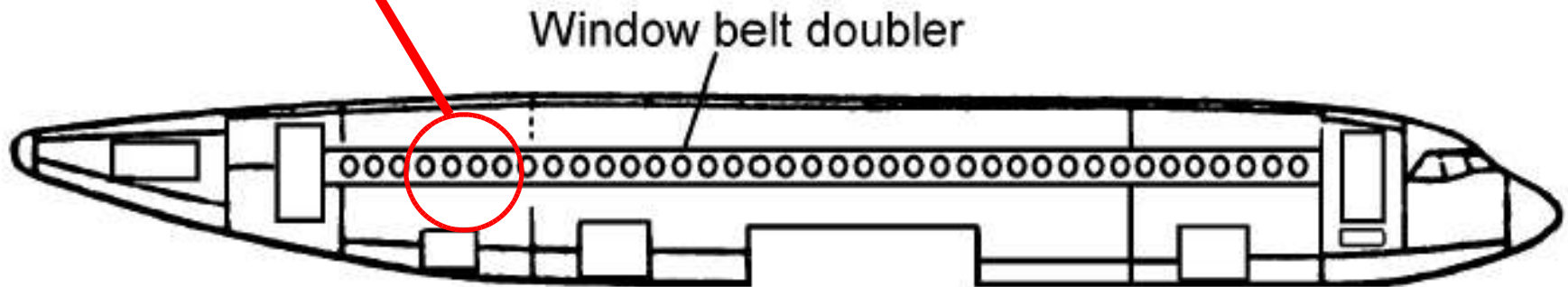
Giunto longitudinale:  
fortemente  
sollecitato a  
causa dei carichi di  
pressurizzazione

Giunto  
trasversale:  
interruzione degli  
stringers; pesante  
e critico per la  
fatica

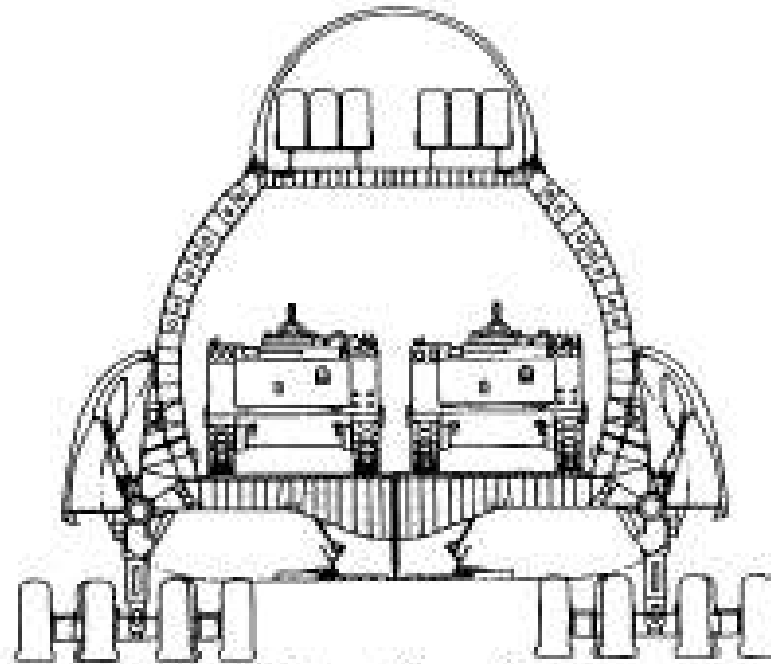




Per rinforzare le zone dei cut-outs sono spesso necessari rinforzi locali (doublers) che hanno anche la funzione di distribuire correttamente gli stress nella struttura



Spesso le cose si complicano quando la fusoliera ha una forma insolita (ad es. a doppio lobo) a causa delle speciali funzioni cui è chiamata ad assolvere



Mid-section with  
main gears extended

C5 A GALAXY