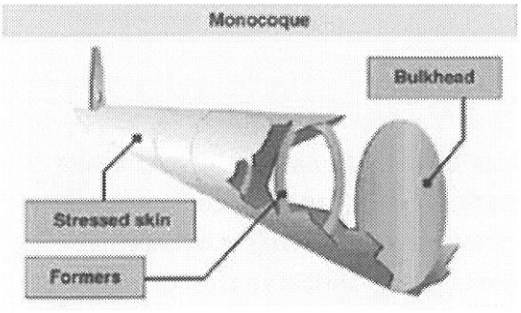
STRUTTURE AEROSPAZIALI

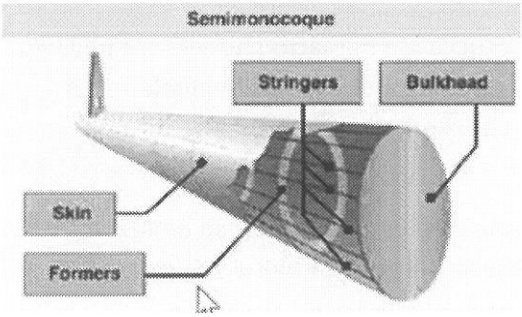
ANATOMIA DI UNA STRUTTURA AEROSPAZIALE

Dato un qualunque velivolo, la sua struttura dovrà essere in grado di svolgere due importanti funzioni:

- Resistere e trasmettere tutte le forze agenti sul velivolo (sia aerodinamiche che inerziali)
- Agire come copertura in grado di proteggere dall'ambiente esterno il contenuto del velivolo mentre assume e mantiene una forma aerodinamica opportuna
- Inoltre, dovendo il velivolo essere in grado di alzarsi in volo, il suo peso assume una grande rilevanza per cui è necessario che i precedenti requisiti siano rispettati seguendo come filo conduttore la minimizzazione del peso.

Dunque, per poter soddisfare tutti i requisiti elencati, la tecnica di progetto più adatta consiste nel concentrare il materiale strutturale sulla superficie esterna del veicolo; in particolare, sempre nell'ottica di rispettare il requisito del minimo peso, tale superficie esterna dovrà avere uno spessore minimo in grado di garantire la resistenza e la rigidezza richieste per l'aereo. Come risultato, la maggior parte dei velivoli sono composti da strutture a pareti sottili denominate ***gusci*** (***shells***). Storicamente, la prima configurazione usata per le strutture aerospaziali è la cosiddetta ***monoscocca*** costituita da una serie di ***elementi trasversali*** ricoperti esteriormente da un ***rivestimento*** (***skin***). Per quanto riguarda il rivestimento esterno, costituito da una serie di piastre molto sottili, è la parte della struttura addetta al bilanciamento di tutti i carichi esterni agenti sul velivolo (forze normali, forze di taglio, torsione e distribuzioni tenso-flessionali interne) mentre gli elementi trasversali fungono da rinforzo e il loro principale scopo è quello di garantire il mantenimento della forma. Questo tipo di architettura strutturale è tutt'ora utilizzata ma limitata a velivoli le cui dimensioni trasversali siano piccole e quindi per condizioni di carico leggere; ciò è dato dal fatto che all'aumentare dei carichi esterni e delle dimensioni della sezione trasversale, le pareti di una struttura monoscocca devono essere più spesse per resistere a carichi di compressione, flessionali e torsionali senza il verificarsi di fenomeni di instabilità, ma se lo spessore aumentasse troppo andrei contro il requisito di minimizzazione del peso. Perciò all'aumentare dei carichi esterni e delle dimensioni trasversali, l'unica soluzione ad oggi adottata a livello industriale è data dall'uso della ***semi-monoscocca*** in cui il risvestimento sottile esterno è irrigito da una griglia formata da elementi trasversali di supporto e da ***elementi longitudinali*** di irrigidimento.

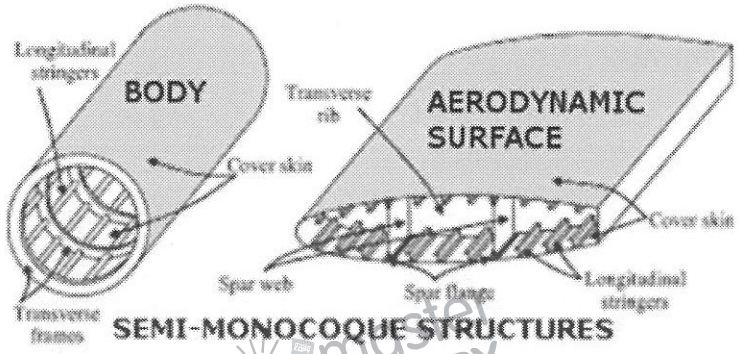




Nota: le classiche strutture aerospaziali sono tipicamente allungate proprio come le travi per cui i termini *longitudinali* e *trasversali* si riferiscono all'asse lungo cui si sviluppa la struttura stessa.

Inoltre, considerato un generico velivolo, la configurazione monoscocca può essere tranquillamente utilizzata per la realizzazione dei principali elementi che lo compongono, ovvero

la ***fusoliera*** (nome tecnico inglese ***body***) le ***superfici aerodinamiche*** (nome tecnico delle ali) come possiamo vedere nelle immagini. La differenza tra queste due configurazioni appena viste sta nel fatto che mentre nella struttura monoscocca la *copertura* deve bilanciare qualsiasi carico esterno agente sulla struttura, nel caso della semi-monoscocca deve equilibrare solamente forze di taglio e torsionali sviluppando flussi di taglio nello spessore mentre le forze interne assiali e flessionali sono bilanciate dagli *elementi longitudinali.* Dunque, in una configurazione semi-monoscocca la ***copertura*** (***cover*** o ***skin***) svolge le seguenti funzioni:



- Rivestire la struttura e fornire una forma aerodinamica al velivolo;
- Reagire alle pressioni aerodinamiche;
- Sviluppare tensioni di taglio in grado di equilibrare carichi di taglio e torsionali applicati;
- Cooperare con gli elementi longitudinali per resistere a carichi assiali e flessionali;
- Cooperare con gli elementi longitudinali e trasversali per resistere, rispettivamente, a tensioni assiali e circonferenziali derivanti dalla pressurizzazione del velivolo (procedura pericolosa poiché promuove rotture per fatica);
- Redistribuire i carichi concentrati su tutta la struttura.

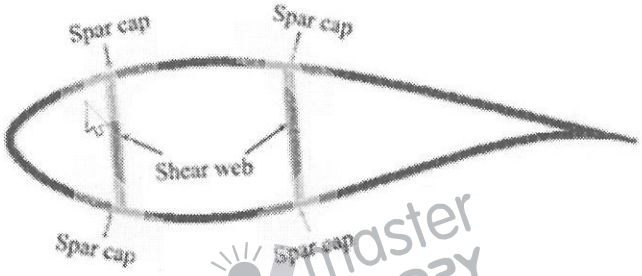
Per quanto riguarda invece gli ***elementi longitudinali***, sono suddivisi in tre categorie in base alla dimensione della sezione trasversale: si parla di ***elementi longitudinali*** quando ci troviamo davanti a elementi con dimensioni medie della sezione trasversale, ***traverse*** o ***correnti*** (***stringers*** o ***stiffeners***) per piccole aree trasversali e ***longheroni*** (***longherons***) per grandi aree trasversali (rispetto alla sezione media della struttura); nonostante però la diversa classificazione, le loro funzioni rimangono sempre le stesse e sono le seguenti:

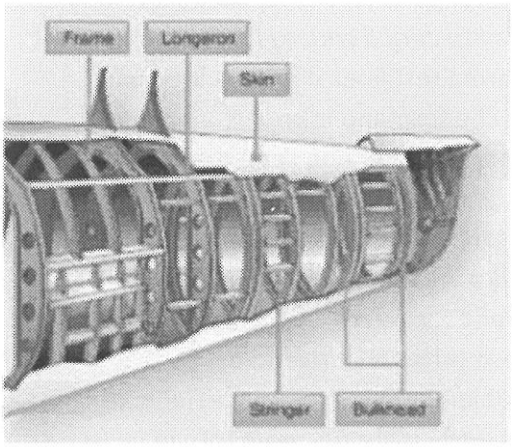
- Bilanciare carichi assiali e flessionali insieme alla copertura esterna (effettivamente, anche se poco, la copertura contribuisce a bilanciare carichi di questo tipo);
- Suddividere la copertura in piccoli pannelli per aumentare le tensioni di rottura e instabilità (si può dimostrare che per migliorare la resistenza all'instabilità di un pannello si devono ridurre le dimensioni nel piano ma di questo se ne parlerà più avanti);
- Resistere, insieme alla copertura, ai carichi assiali causati dalla pressurizzazione.

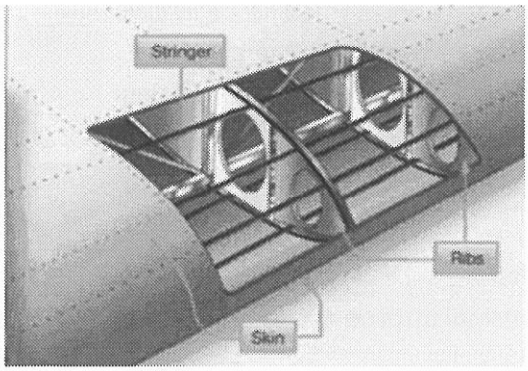
<u>*Nota*</u>: un'altra differenza tra la monoscocca e la semi-monoscocca sta nel fatto che mentre nella prima configurazione la copertura e suddivisa solo sulla base del distanziamento degli elementi trasversali, nel secondo caso la suddivisione viene realizzata anche in base alla spaziatura degli elementi longitudinali.

Altri importantissimi componenti strutturali, che costituiscono gli elementi principali delle superfici aerodinamiche dei velivoli ad ala fissa, sono i ***longheroni*** (***spars***) i quali si sviluppano lungo una direzione con un certo angolo (detto angolo di freccia) rispetto alla fusoliera; tipicamente in un'ala si trovano due longheroni ma il loro numero non è fisso e dipende dalle

dimensioni del velivolo (ad esempio in aerei di grandissime dimensioni si può arrivare ad usare tre longheroni mentre in aerei molto piccoli può capitare di trovare un solo longherone). Dal punto di vista strutturale i longheroni possono essere visti come delle travi la cui sezione trasversale ha tipicamente una forma a I scomponibile a sua volta in un'***anima*** (***web***) alle cui estremità sono poste due ***solette*** (***caps***). Per quanto concerne le *solette*, similmente agli elementi longitudinali (*stringers*), hanno il compito di bilanciare carichi assiali e flessionali insieme alla copertura e di suddividerla in piccoli pannelli cosicché si possa avere un aumento delle sue tensioni di instabilità e rottura; per quanto riguarda infine l'anima, proprio come la copertura esterna, è studiata per sviluppare tensioni di taglio che possano bilanciare carichi di taglio e torsionali. Per concludere con l'analisi degli elementi strutturali andiamo a studiare gli *elementi trasversali* i quali vengono classificati base all'appartenenza alla fusoliera o alle superfici aerodinamiche: per quanto riguarda la fusoliera si possono incontrare le ***ordinate*** (***frames*** o ***rings***) e le ***paratie*** (***bulkheads***) le quali, rispetto alle ordinate, coprono la maggior parte dell'area della sezione trasversale; inoltre le paratie sono tipicamente utilizzate per separare le zone pressurizzate da quelle non pressurizzate e quindi tipicamente tendono ad essere anche più rigide e robuste e, generalmente, si trovano nella zona posteriore della fusoliera laddove si collega la coda (come è possibile vedere nell'immagine). Per quanto riguarda infine le superfici aerodinamiche, le relative componenti trasversali sono indicate come ***centine*** (***ribs***). In quanto alle *ordinate*, tipicamente possono svolgere funzioni diverse in base alle loro dimensioni: nello specifico quando sono piccole e sottili il loro compito è solamente quello di fornire la forma e non sono in grado di sopportare alcun tipo di carico concentrato derivante da qualunque fonte quale potrebbe essere un serbatoio; quando al contrario lo spessore e le loro dimensioni sono maggiori, si possono realizzare strutture molto robuste e permettono a quel punto di sopportare carichi concentrati tant'è che vengono utilizzati laddove vi è l'intersezione tra la fusoliera e le semiali. Passando alle *centine*, proprio come per le ordinate distinguiamo due casi in base al loro spessore e alle loro dimensioni e quindi centine più sottili e meno robuste sono progettate solo per garantire il mantenimento della forma (aspetto critico per un'ala per via del comportamento aerodinamico della superficie) mentre spessori maggiori, da cui dipende una maggiore robustezza, permettono anche di bilanciare e sopportare carichi concentrati quali potrebbero essere serbatoi esterni, motori o qualsiasi altra fonte di forze inerziali concentrate tant'è che questi carichi vengono collegati alle semiali proprio in







corrispondenza di questi elementi strutturali. Dunque, in generale, l'importanza degli elementi trasversali sta nel fatto che si comportano in un certo senso come dei "filtri" per i carichi concentrati poiché quest'ultimi vengono ridistribuiti sotto forma di flussi di taglio ai vari elementi che compongono la struttura; quindi il flusso logico del trasferimento dei carichi comincia proprio dalle componenti trasvrsali le quali trasferiscono i carichi concentrati a cui sono sottoposte inizialmente ai pannelli della copertura sotto forma di flussi da taglio. A quel punto i vari pannelli che sono direttamente collegati agli elementi longitudinali, trasferiscono loro le tensioni interne sotto forma di tensioni assiali; quindi, grazie a questo percorso, partendo dalle componenti trasversali i carichi concentrati vengono ridistribuiti in modo tale che i pannelli contribuiscano all'equilibrio sviluppando flussi di taglio mentre le componenti longitudinali tenderanno a sviluppare tensioni assiali. Un'ulteriore funzione associata agli elementi trasversali è quella di "imporre" la dimensione dei pannelli che formano la copertura esterna proprio come visto per i correnti; come si era visto infatti, al diminuire delle dimensioni dei pannelli si ha un aumento del carico critico che causa l'instabilità ma si tenga presente che questo fenomeno molto pericoloso non affligge solo i pannelli ma anche i correnti stessi. Nello specifico, i correnti sono assimilabili a delle travi e in quanto tali se sottoposti a compressione mantengono la loro forma lineare finché il carico applicato non supera un determinato valore denominato *carico critico* (P_{cr}) oltre il quale il corrente inizia a deformarsi, con l'asse che abbandona la forma rettilinea e inizia a incurvarsi; questo stesso meccanismo si presenta anche per le piastre che formano la copertura, le quali, superato il carico critico, si deformano pesantemente mostrando tutta una serie di gobbe. Questa funzione degli elementi trasversali è di estrema importanza poiché nel momento in cui si presenta l'instabilità, i componenti soggetti a questo fenomeno perdono la capacità di sopportare ulteriori aumenti di carico e le deformazioni tendono a crescere molto anche con piccoli incrementi cosicché alla fine sopraggiunge il cedimento catastrofico. Per concludere, anche i componenti trasversali, così come i longitudinali, aiutano ad equilibrare le tensioni derivanti dalla pressurizzazione della fusoliera (si tenga presente che il problema della pressurizzazione affligge solamente la fusoliera e non le superfici aerodinamiche): in particolare nel momento in cui si ha la pressurizzazione, i pannelli della copertura sono sottoposti a tensioni di trazione sia in direzione longitudinale che trasversale (si pensi come ad un palloncino che si espande mentre viene gonfiato) perciò le tensioni longitudinali saranno equilibrate dai correnti mentre le tensioni trasversali circonferenziali vengono equilibrate dagli elementi trasversali. Quindi, ricapitolando, gli elementi trasversali di una struttura in configurazione semi-monoscocca sono progettati per assolvere i seguenti compiti:

- Mantenere la forma assegnata della sezione trasversale;
- Redistribuire i carichi concentrati nella struttura e le tensioni attorno alle discontinuità strutturali;
- Ridurre la lunghezza dei correnti per migliorare la loro resistenza al fenomeno dell'instabilità primaria e aumentare la tensione locale critica di instabilità dei pannelli di copertura;
- Sviluppare tensioni di taglio in grado di equilibrare i carichi di taglio e di torsione applicati;
- Cooperare con la copertura per resistere alle tensioni circonferenziali derivanti dalla pressurizzazione.

Dunque, come si può facilmente intuire, la struttura di un aereo è estremamente complessa e per poterne studiare il comportamento in maniera semplice sono necessarie delle ipotesi

semplificative abbastanza forti; le ipotesi che vengono fatte e poste alla base dell'analisi strutturale di una semi-monoscocca sono le seguenti:

- Gli elementi longitudinali equilibrano solo carichi assiali;
- I pannelli della copertura esterna e le anime dei longheroni bilanciano solo carichi di taglio e torsione tramite tensioni di taglio;
- Quando le aree delle sezioni trasversali dei correnti sono sufficientemente piccole rispetto alle dimensioni generali della sezione trasversale della struttura, allora possiamo approssimare la distribuzione di tensione assiale nei correnti praticamente costante (se ad esempio si ipotizza la struttura sottoposta a flessione ovviamente tutti i correnti, indipendentemente che si trovino in compressione o in trazione, mostreranno una tipica distribuzione a farfalla; ma se le sezioni trasversali sono relativamente piccole allora il loro contributo al momento totale di flessione è estremamente limitato, per cui la distribuzione nella sezione dei correnti si può ritenere ragionevolmente costante mentre il momento totale di flessione sarà dato dai contributi dei vari correnti sulla base della distanza dall'asse neutro di flessione) e, sulla base dello stesso ragionamento, se lo spessore dei pannelli o delle anime dei longheroni è trascurabile allora anche in questo caso le tensioni di taglio si possono ritenere ragionevolmente costanti lungo lo spessore;
- Ordinate e centine si suppongono infinitamente rigide nel loro piano (ipotesi che non si discosta troppo dal comportamento reale poiché questi elementi sono davvero molto rigidi) cosicché la forma della sezione trasversale della struttura si possa considerare inalterata sotto carico (questo perché, ipotizzando ad esempio che un'ordinata sia sottoposta ad un carico concentrato, se l'elemento trasversale dovesse deformarsi dovremmo necessariamente impostare una procedura iterativa tra la deformata e le tensioni interne che bilanciano il carico esterno fino al raggiungimento della convergenza ma un approccio di questo tipo sarebbe troppo oneroso per un'analisi strutturale semplificata come quella che ci siamo prefissati di fare) mentre, allo stesso tempo, si ipotizza che non possiedano alcuna rigidità in direzione normale al piano in cui giacciono e quindi non offrono alcuna resistenza a deformazioni di ingobbamento (l'uso di questa ipotesi si capirà meglio solo più avanti ma fondamentalmente dipende dal fatto che la struttura non è una trave continua e, a causa di interferenze che si instaurano tra gli elementi longitudinali e quelli trasversali, si hanno dei particolari comportamenti della struttura quando sottoposta a flessione o torsione)

Nota: ovviamente i risultati di un'analisi effettuata su una struttura idealizzata possono definirsi accettabili solo se sono verificate la maggior parte delle assunzioni precedentemente elencate e quando le dimensioni della sezione trasversale degli elementi longitudinali sono sufficientemente piccole se comparate a quelle della sezione trasversale della struttura completa altrimenti se così non fosse la prima e la terza ipotesi non sarebbero verificate a prescindere.

Quindi, se le assunzioni precedentemente elencate risultano ragionevolmente valide, allora una struttura del tipo semi-monoscocca, presa una sua sezione trasversale, indipendentemente che si tratti di una fusoliera o di una superficie aerodinamica, può essere schematizzata come nell'immagine a fianco in cui i correnti sono ridotti a masse concentrate che giacciono sul contorno della sezione che rappresenta il piano medio della

