

Longheroni Alari

Introduzione e motivazione

Eccomi nuovamente motivato a scrivere altre pagine sul Nono Tomo del prestigioso “Convegno di Tecnica Aeromodellistica”, che trovo un’iniziativa assolutamente utile e necessaria come disperato tentativo di mantenere vivo l’approccio scientifico, sperimentale ed un poco, ma poco eh!, matematico alla pratica aeromodellistica e qui rinnovo i complimenti al gruppo NIKE per l’impegno nell’organizzazione!

L’attualità aeromodellistica è sempre più “giocolistica” e pronta al volo, con case produttrici che fanno a gara per progettare il modello più pronto al volo che ci sia e chissà quale ricerca scientifica hanno in corso per produrre il modello che all’apertura della confezione voli fuori come un pipistrello.

Per fortuna che qualche costruttore non allergico alla balsa ed alla colla bicomponente c’è ancora e così anche qualche giovane che ottimizza le ore lavorative non solo per far volare il suddetto pipistrello, ma per disegnare centine e longheroni.

Proprio i longheroni, non vanno solo disegnati, copiati o tantomeno ridotti in scala a partire dal velivolo originale oggetto di riproduzione.

Proprio qui due formule, basate su moltiplicazioni e divisioni apprese alle scuole elementari, possono fare la differenza tra un bel modello ed un modello sapientemente pensato e costruito, nonché sicuro nel volo.

Questo compendio non vuole assolutamente essere un trattato teorico e matematico, si potrebbero scrivere oltre duecento pagine su un argomento così importante ed, in effetti, esistono già articoli e libri a diversi livelli; non è mia intenzione riscrivere argomenti arcinoti.

Il presente articolo non vuole e non è, assolutamente rigoroso e a dire il vero non è nemmeno del tutto fisicamente corretto, ma ho cercato il giusto compromesso, sperimentato personalmente, che permette di arrivare semplicemente ad un risultato valido per il dimensionamento dei longheroni. Si forniscono quindi le formule essenziali già in forma integrata, nel rispetto delle ipotesi via via descritte e seguite nell’esempio generale sul modello Ready, per giungere ad un risultato scientificamente valido e sufficientemente preciso per i nostri scopi.

Ritengo altresì doveroso anticipare che non ho seguito il metodo delle reazioni vincolari, del carico distribuito e dei diagrammi degli sforzi (Taglio, Momento e Assiale), ma bensì ho considerato le forze aerodinamiche concentrate nel punto della risultante e questa è senz’altro l’approssimazione più gravosa.

Per ultimo preciso che il procedimento permette la verifica e non il progetto dimensionale, in quanto sarebbero servite equazioni più complesse e noiose.

Durante la trattazione alterno passo per passo descrizioni teoriche ad un esempio pratico, che uso come filo conduttore, su un’ala progettata per il noto modello Ready, *le parti di esempio sono caratterizzate dal carattere corsivo* (Figura 1).

Ah... dimenticavo la motivazione di questo articolo! Il 19 Aprile 2011 insieme ad altri 6 soci fondatori ho fondato il Gruppo Aeromodellistico Sportivo Sperimentale (GASS) con sede a BRONI (PV), originariamente la prima “s” stava ad indicare “Scientifico”, ma poi abbiamo optato per Sportivo in nome di maggior attività e lealtà; comunque, la missione non è solo il volo, ma la SPERIMENTAZIONE e quindi non perseveriamo nella costruzione empirica, bastano poche formulette per completare una grande costruzione/riproduzione con più sicurezza e soddisfazione. (www.gassaero.it).



Figura 1 - Un'ala sperimentale da 2m al mitico Ready

Forze e Momento

Per prima cosa rappresentiamo le forze in Kg (chilogrammi-forza) e non in Newton, quindi autorizzatemi a “confondere” la massa **m** con il peso **q** dell’aeromodello (tanto voliamo solo nell’atmosfera terrestre!).

In base alla tipologia di aeromodello ed al tipo di volo che vogliamo fare, definiamo **ng** = **fattore di contingenza** che esprime le accelerazioni a cui è sottoposto il modello durante le varie manovre acrobatiche, quali affondate, virate strette, ecc.

Per aiutare alla scelta di ng riporto la seguente tabella (Tabella 1), valida per velocità di volo inferiori a 150 Km/h.

Tipo di aeromodello e/o di volo	ng
Pylon, acrobatico veloce	12
Acrobatico	9-10
Aliante da pendio o acrobatico	8-9
Aliante F3B o HLG	8
Moto aliante	7
Aliante generico	6
Aliante da durata	3-4
Modello ad elastico	2-3

Tabella 1 - Scelta del fattore di contingenza ng

Una volta scelto il fattore di contingenza **ng** calcoliamo le forze che effettivamente generano flessione nell’ala.

$$q_f = q_{tot} - q_{ala} \quad \text{Eq. 1 - Calcolo peso fusoliera in Kg-forza}$$

$$Q = q_f \cdot ng \quad \text{Eq. 2 - Forza Peso a cui è realmente sottoposta l'ala durante le sollecitazioni di volo}$$

Si considera unicamente il peso della fusoliera q_f , perché il peso dell’ala, in prima approssimazione, non genera flessione all’ala stessa.

Come esempio prendiamo un’ala che ho realizzato per il noto modello trainer ad ala alta Ready che ha una massa totale pari a 3.2Kg mentre l’ala pesa 1.1Kg. Consideriamo un fattore di contingenza $ng=9$.

$$q_f = 3.2 - 1.1 = 2.1 \text{ Kg}$$

$$Q = 2.1 \cdot 9 = 18.9 \text{ Kg}$$

Q sta ad indicare che con il fattore di contingenza che abbiamo adottato, durante la richiamata da un’affondata, l’ala sarà soggetta ad una forza della fusoliera pari a circa 19 Kg, a causa dell’accelerazione di 9 g (9 volte l’accelerazione gravitazionale terrestre) a cui stimiamo sia sottoposto il modello.

Se volessimo realmente calcolare l’accelerazione a cui è soggetto il modello, dovremmo conoscere la velocità di volo al momento della richiamata o della virata stretta, nonché il raggio di curvatura che chiediamo al modello stesso. Oggigiorno ci sono telemetrie e data-logger che registrano facilmente i valori delle accelerazioni istantanee.

A questo punto sarebbe doveroso aprire una parentesi concettuale. Con semplici considerazioni si può dimostrare che la forza Q deve essere controbilanciata dalla portanza $\mathcal{L}$ (Lift) sviluppata dall’ala stessa in quelle particolari condizioni di volo. Quindi Q non potrà eccedere il valore della portanza massima sviluppata dall’ala, qui si entra in un loop di causa effetto che non sto a spiegare, ma che negli aerei veri viene risolto specificando la VNE =Velocity never exceed (la velocità massima da non superare MAI). Sarà proprio la VNE a limitare il Q_{MAX} e quindi l’accelerazione massima a cui può essere sottoposto l’aeromobile, se non limitata prima dai parametri fisiologici del pilota. Un dato profilo dell’ala, svilupperà un $C_{L,MAX}$, e quindi un $\mathcal{L}_{MAX}$ data da:

$$\mathcal{L}_{MAX} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot VNE^2 \cdot C_{L,MAX}$$

Eq. 3 - Forza di portanza MAX per un aereo che non deve superare la VNE

Giulio Ricotti

Però si sa che durante le acrobazie di un aeromodello, dove il pilota ha i piedi per terra, non vi sono limiti fisiologici e nelle virate strette e veloci attorno al pilone, non esiste una VNE e la portanza massima sarà relativa alla velocità che il motore e la forza di gravità possono aver dato all'aeromodello.

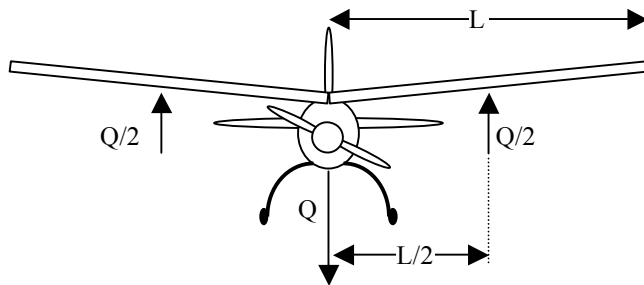


Figura 2 - Riferimento e Definizione Forze e Misure

La forza Q viene dinamicamente bilanciata da 2 forze $Q/2$ generate aerodinamicamente dalle 2 semiali.

Se la pianta alare è rettangolare, con una certa semplificazione e approssimazione, si può considerare la risultante delle pressioni aerodinamiche della portanza applicata nel mezzo della semiapertura alare.

Nel caso di ala rastremata, il punto di applicazione della risultante coincide con la posizione della CAM (Corda Aerodinamica Media).

Nel caso non si volesse calcolare la CAM e la sua posizione, si può considerare il punto di applicazione nel mezzo della semiapertura alare anche per piante trapezoidali; ci si mette così nel caso peggiore, quindi sicuro per la verifica a cui si vuole arrivare.

La Figura 2 rappresenta immediatamente la posizione della risultante meglio che cento parole descrittive.

Esprimiamo la completa apertura alare con $2L$, la semiapertura con L e la distanza della risultante rispetto alla radice dell'ala con $\frac{1}{2}L$.

Torniamo all'ala del Ready con apertura $2L=1.90m$, quindi $L=95cm$ e $\frac{1}{2}L=47.5cm$.

Perché è importante conoscere il punto di applicazione rispetto alla radice dell'ala?

Occorre calcolare il momento che tale forza genera sulla "trave" ala.

È proprio il momento o coppia che provoca lo sforzo di flessione nei longheroni.

DEF. 1 - MOMENTO O COPPIA DI UNA FORZA RISPETTO AD UN PUNTO: Il momento o coppia di una forza F rispetto ad un punto P è dato dal prodotto tra l'intensità di F e la distanza o braccio di P dalla retta direzione di F .

DEF. 2 – DISTANZA DI UN PUNTO DA UNA RETTA: data una retta r ed un punto P non appartenente ad essa, si chiama distanza del punto P dalla retta r la lunghezza del segmento di perpendicolare condotto dal punto P alla retta r .

Ancora una volta il lettore non deve spaventarsi e la Figura 3 chiarisce il significato della **DEF. 2**.

Ad esempio se fosse $F=15N$ (Newton) e $b_F=0.3m \rightarrow M=15 \cdot 0.3=4.5 \text{ N} \cdot m$ (Newton per metri (= segno della moltiplicazione)). In questo trattato abbiamo convenuto di esprimere le forze in Kg, quindi il momento lo misuriamo in Kg·m (chilogrammi per metro). Permettetemi anche di esprimere la misura del braccio della forza b_F in cm cosicché il momento si esprime in Kg·cm che verrà utile in seguito.

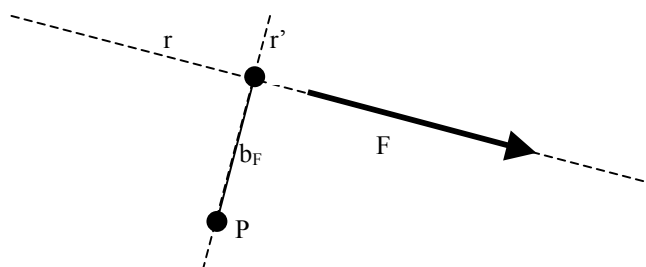


Figura 3 - Definizione di braccio di una Forza rispetto ad un punto P

Giulio Ricotti

Come altro esempio consideriamo $F=3.5\text{Kg}$ e $b_F=20\text{cm}$, avremo $M=3.5\text{Kg} \cdot 20\text{cm}=70\text{Kg} \cdot \text{cm}$.

Ora che abbiamo chiara la definizione di momento lasciatemi aprire una parentesi sui servocomandi, per polemizzare sulle unità di misura che spesso vengono riportate in alcuni siti o riviste.

I servocomandi sono specificati con la loro coppia massima espressa in $\text{Kg} \cdot \text{cm}$ nella forma corretta (Kg per cm), ma sempre più sovente si leggono coppie espresse in Kg/cm , magari fosse così, significherebbe che con squadrette lunghe il servo sviluppa forze maggiori!

Chiariamo anche qui con l'esempio di un servo da $M=5\text{Kg} \cdot \text{cm}$ il che significa che se il braccetto montato sul suo albero fosse lungo 1 cm , la forza massima all'estremità sarebbe di 5Kg ; se invece il braccetto fosse lungo $b_F=2\text{cm}$ si avrebbe:

$$M = F \cdot b_F \text{ da cui } F = \frac{M}{b_F} \text{ quindi } F = \frac{5}{2} = 2.5\text{Kg} \text{ ovviamente inferiore ai } 5\text{Kg}.$$

Come è intuitivo più è lungo il braccio e più la forza sarà minore per generare lo stesso momento o coppia perché è il prodotto ad essere costante, non il rapporto!

Chiusa parentesi sui servocomandi.

Torniamo all'esempio conduttore del Ready e calcoliamo il momento massimo a cui è sottoposta l'ala:

$$Q/2=9.5\text{Kg}$$

$$b_Q=L/2=47.5\text{cm}$$

$$M = \frac{Q}{2} \cdot b_q \quad \text{Eq. 4 - Calcolo del Momento nella semiala}$$

$$M=9.5\text{Kg} \cdot 47.5\text{cm}=451.25 \text{ Kg} \cdot \text{cm}$$

Il momento generato dalla coppia di forze "portanza semiala" e " $Q/2$ " deve essere controbilanciato da un momento uguale e contrario che si genera all'interno del longherone portante (trave) grazie alla tensione e compressione delle fibre o strati di cui è composto.

Consideriamo il caso di longherone a sezione rettangolare e composto da materiale omogeneo.

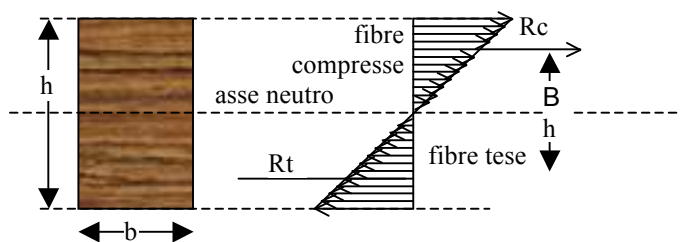


Figura 4 - Andamento dello sforzo di flessione all'interno del longherone o trave

Gli sforzi di flessione creano delle forze di compressione e di trazione all'interno del longherone e sono proprio queste forze che generano tra loro un momento o coppia che controbilancia quello generato dalle forze esterne applicate alla trave.

Intuitivamente dato che le forze esterne che generano il momento M_{EXT} sono tra loro ad una distanza (b_F) molto superiore allo spessore del longherone, questo significa che le forze interne hanno un'intensità notevolmente maggiore.

Se il longherone è di materiale omogeneo e con forma simmetrica rispetto ad un asse orizzontale, quest'ultimo coincide con l'asse neutro posizionato quindi a metà dell'altezza h .

L'asse neutro identifica i punti della sezione della trave dove le fibre non sono sottoposte né a trazione né a compressione. Attenzione questo sarebbe vero se la trave fosse soggetta unicamente allo sforzo di momento, quindi solo a flessione, ma nella realtà vi sono più sforzi, quali compressione pura e/o taglio, che sovrappongono gli effetti tra loro, generando presso-flessione e taglio, che noi trascuriamo quasi completamente in questo trattat

Per la sezione di longherone rappresentata in Figura 4, gli sforzi interni hanno andamento triangolare e generano una risultante delle forze di compressione R_c ed una delle forze di trazione R_t di uguale intensità ad una distanza tra loro pari $2/3h$, quindi si parte dall'equazione di equilibrio:

Giulio Ricotti

$M_{INT} = M_{EXT}$ Eq. 5 - Gli sforzi interni generano un momento interno che bilancia quello applicato esternamente

$$Rc \cdot \frac{2}{3} \cdot h = \frac{Q}{2} \cdot b_Q$$

Eq. 6 - Esplicitazione dell' $M_{INT} = M_{EXT}$

Eq. 5 Errore.

L'origine riferimento non è stata trovata.

Ora si prosegue nello sviluppo mediante un integrale lineare in h al fine di calcolare il momento di ogni infinitesimale di sforzo assiale col relativo braccio e si arriva a:

$$\sigma_E = \frac{M \cdot y}{J}$$

Eq. 7 - Formula integrata che fornisce l'intensità dello sforzo di flessione σ_E (sigma) in Kg/cm²

Dove:

$$M = \text{momento esterno calcolato con } l' M = \frac{Q}{2} \cdot b_Q$$

Eq. 4 in Kg·cm

y= distanza tra la fibra tesa o compressa più lontana dall'asse neutro, per i nostri scopi usiamo $\frac{1}{2}h$ espresso in cm

J= momento d'inerzia baricentrico geometrico, si determina con l'Eq. 8, si esprime in cm⁴ ed è più difficile da dirsi che da calcolarsi!

$$J = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

Eq. 8 - Calcolo del Momento d'inerzia baricentrico per una sezione rettangolare

Ad esempio se usassimo un longherone con b=1.5cm e h=4cm si avrebbe:

$$J = \frac{1.5 \cdot 4^3}{12} = \frac{1.5 \cdot 64}{12} = 8 \text{ cm}^4$$

$$\sigma_E = \frac{M \cdot y}{J}$$

Nell'Eq. 7, J è al denominatore, quindi è semplice intuire che con più J è grande meglio è in quanto a parità di M, σ sarà piccolo. Inoltre J è quel fattore che considera la forma della sezione della trave usata, rettangolare, circolare, composta da più forme elementari ecc.

J è anche ben tabulato in molti manuali di scienza delle costruzioni, richiedibili a geometri o più comunemente scaricabili da internet. Vedi Tabella 3.

Tornando all'esempio del Ready, se il longherone fosse rettangolare ed omogeneo con b=2cm e h=4cm, avremo:

$$J = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

$$J = \frac{2 \cdot 4^3}{12} = \frac{2 \cdot 64}{12} = 10.7 \text{ cm}^4$$

$$y = 4/2 = 2 \text{ cm}$$

Avevamo calcolato M=451 Kg·cm quindi ecco già il σ_E :

$$\sigma_E = \frac{M \cdot y}{J}$$

$$\sigma_E = \frac{451 \cdot 2}{10.7} = 84.3 \text{ Kg/cm}^2$$

Come vedremo più Avanti un $\sigma_E = 84 \text{ Kg/cm}^2$ per un longherone di abete è più che marginato.

Prima di alcune considerazioni teoriche e pratiche, arriviamo subito alla fine della parte pratica ed usiamo la seguente tabella (Tabella 2) che riporta il sigma di rottura σ_R ed il sigma ammissibile σ_A per alcuni materiali usati in aeromodellismo.

Il sigma calcolato precedentemente prende il nome di sigma di esercizio σ_E , a cui è realmente sottoposto il longherone.

Materiale	σ_R in Kg/cm ²	σ_A in Kg/cm ²
Abete Bianco	900	120-140
Abete Douglas	900	120-140
Abete Rosso	750	100
Betulla	1200	170
Ciliegio	1000	150
Faggio	1100	160
Frassino	1200	170
Fibra di Carbonio	22000	~5000
Fibra di Vetro	1800	350
Acciaio	5000	~1500
Alluminio	3800	~450
Kevlar	35000	10000

Tabella 2 - sforzo di Rottura σ_R e Ammissibile σ_A per diversi materiali

Riepilogo schematico e pratico dei passi da seguire

Al fine di dimostrare che veramente occorrono semplicissime formule, 5 minuti di tempo ed una calcolatrice, schematizzo i passi descritti nelle lunghe pagine precedenti:

1. Conoscere solo il peso della fusoliera Q (escluso l'ala portante). *Esempio $q_F=2.1\text{Kg}$.*
2. Scegliere il coefficiente di contingenza ng dalla Tabella 1 in funzione del tipo di modello e di volo per cui è progettato. *Es. $ng=9$.*
3. Calcolare il carico reale $Q=q_F \cdot ng$ del modello sottoposto alle accelerazioni dovute al volo. *$Q=2.1 \cdot 9=18.9\text{Kg}$.*
4. Calcolare $\frac{1}{2}Q$. *$\frac{1}{2}Q=18.9/2 \approx 9.5\text{Kg}$.*
5. Calcolare o misurare la metà delle semiaperture alari o dell'intera apertura alare. *Es. $b_0=47.5\text{cm}$.*
6. Calcolare il Momento di flessione a cui è soggetta l'ala $M = \frac{Q}{2} \cdot b_0$. *$M=9.5 \cdot 47.5 \approx 451\text{Kg} \cdot \text{cm}$*
7. Calcolare il momento d'inerzia baricentrico J consultando la Tabella 3 in base alla sezione del longherone utilizzato. *Nel caso di sezione rettangolare $b=2\text{ cm}$ e $h=4\text{cm}$ $J = \frac{2 \cdot 4^3}{12} = \frac{2 \cdot 64}{12} = 10.7\text{ cm}^4$.*
8. Calcolare la massima distanza delle fibre dall'asse neutro y generalmente $y=\frac{1}{2}h$. *$y=4/2=2\text{cm}$*
9. Eccoci a calcolare il sigma di esercizio, a cui è realmente soggetto il longherone $\sigma_E = \frac{M \cdot y}{J}$.
Quindi $\sigma_E = \frac{451 \cdot 2}{10.7} = 84.3\text{ Kg/cm}^2$.
10. Verificare che $\sigma_E < \sigma_A$ cioè il sigma di esercizio deve essere inferiore al sigma ammissibile, in caso contrario si ricomincia la verifica aumentando le dimensioni del longherone o riducendo i carichi o l'apertura alare.

Approfondimenti e considerazioni teoriche

La prima considerazione che voglio sottolineare, (in quanto dovrebbe già essere nota) riguarda lo spessore del longherone..... non facciamo economia sullo spessore o altezza!

Nell'Eq. 8 si nota che il parametro h riveste un'importanza enorme, è ben alla terza potenza, significa che una piccola variazione di h comporta una grossa variazione di J.

Nel caso Ready se il longherone fosse di dimensioni $b=2\text{cm}$ come prima, ma ora provassimo a ridurre di 8mm h portandolo a $h=3.2\text{cm}$ e quindi $y=3.2/2=1.6\text{cm}$ otterremmo:

$$J = \frac{2 \cdot 3.2^3}{12} = \frac{2 \cdot 32.768}{12} = 5.46\text{ cm}^4 \quad \text{rispetto ai } 10.7\text{ cm}^4 \text{ è praticamente DIMEZZATO!}$$

Giulio Ricotti

Di conseguenza

$$\sigma_E = \frac{451 \cdot 1.6}{5.46} = 132 \frac{Kg}{cm^2} \text{ notevolmente aumentato rispetto a } 84 \frac{Kg}{cm^2}$$

È quindi importantissimo sfruttare ogni mm dello spessore del profilo, magari andare a filo del rivestimento e cercare il posizionamento nella coordinata di massimo spessore del profilo (SE NON ECCESSIVAMENTE LONTANO DAL FUOCO AERODINAMICO DEL PROFILO). QUESTO FA RISPARMIARE PESO GRATUITAMENTE.

La seconda considerazione deve scaturire dall'osservazione della Figura 4 notando che le fibre vicine all'asse neutro danno un contributo esiguo al bilanciamento del momento esterno, quindi eliminiamole e facciamo lavorare di più le fibre lontane; ma proprio grazie al maggior braccio rispetto all'asse neutro, l'aggravio di sforzo è minimo. Bene adottiamo la seguente forma per il longherone:

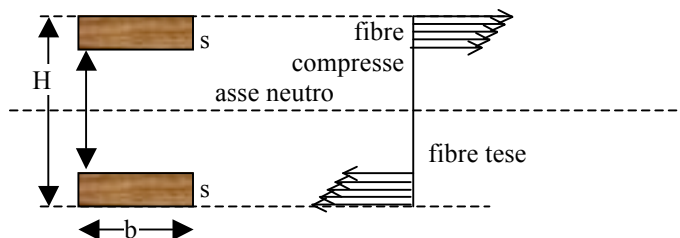


Figura 5 - Nuova sezione del longherone, alleggerito dalla parte centrale, ma con J poco variato

In Figura 5 abbiamo rimosso il legno centrale del longherone, che non contribuisce molto alla resistenza strutturale, ma sicuramente alla massa.

Dalla Tabella 3 ricaviamo la formula di J per la geometria della Figura 5 che è:

$$J = \frac{b \cdot (H^3 - h^3)}{12} \quad \text{Eq. 9 - Momento d'inerzia baricentrico della sezione riportata in Figura 5.}$$

Quindi se utilizziamo 2 listelli di abete con $b=2\text{cm}$ e di spessore $s=5\text{mm}$ con $H=4\text{cm}$ abbiamo $h=4-0.5-0.5=3\text{cm}$.

$$J = \frac{2 \cdot (4^3 - 3^3)}{12} = \frac{2 \cdot (64 - 27)}{12} = \frac{2 \cdot 37}{12} = 6.1 \text{ cm}^4$$

Quindi:

$$\sigma_E = \frac{451 \cdot 2}{6.1} = 148 \frac{Kg}{cm^2}$$

Ora si potrebbe aprire una riflessione su come definire un fattore di merito di una forma geometrica rispetto alla sua massa, cercando quelle sezioni che massimizzano J mantenendo contenuta la loro massa, ma sorvoliamo.



Figura 6 - I 2 listelli 10x5mm che costituiscono il longherone principale. In quello inferiore (tensore) ho aggiunto 2 listelli in fibra di carbonio, per scaricare le fibre del legno.

Giulio Ricotti

Siamo pronti per la terza considerazione e che vuole essere il fuoco concettuale dell'articolo.

Facendo riferimento alla Figura 5 possiamo notare che i due listelli, nel loro insieme sono sottoposti a flessione, ma presi singolarmente, non sono soggetti a flessione, bensì quello superiore ha unicamente sforzi assiali di compressione mentre quello inferiore ha sforzi assiali di trazione. A mio parere questo è il modo migliore per far lavorare listelli di legno.

Bene, intuitivamente è chiaro che in un longherone siffatto sottoposto a flessione, si sviluppa una forza attrattiva tra i listelli che cercherebbe di farli collassare annullando la distanza h . In molti testi aeromodellistici e dai consigli dei costruttori esperti si evince di applicare delle foderine verticali tra i due listelli. Generalmente suggeriscono di alternare foderine con fibra verticale a foderine con fibra orizzontale tra le centine; sì, è una buona procedura, ma si demanda alla colla l'onere di trasferire gli sforzi dai listelli alle foderine e viceversa, compromettendo la rigidità della struttura.

Siamo tutti d'accordo che qualunque cosa mettiamo tra i due listelli, sarà soggetta a compressione lungo un certo angolo dipendente dallo scorrimento ... omiss. ... Bene in geometria piana esiste un poligono che una volta fissate le lunghezze dei suoi lati, sono UNIVOCAMENTE fissati anche gli angoli (Euclide). Il triangolo. Cosa non vera per nessun altro poligono, ad esempio un quadrilatero, mantenendo invariati i lati può passare da un rettangolo ad un romboide semplicemente variando gli angoli. Questo significa che per mantenere la figura originale, agli angoli dobbiamo dare proprietà di incastro, che negli oggetti composti, tipicamente è una proprietà che viene demandata alla colla!

Per mantenere i listelli distanziati realizziamo dei triangoli, in edilizia non a caso hanno inventato le strutture reticolari, dove non troverete mai dei quadrilateri. È più facile guardare la Figura 7 che proseguire con lunghe spiegazioni.

FIDATEVI, i listelli inclinati sono sottoposti unicamente a sforzo assiale di compressione, sono sì incollati, ma solo per tenerli in posizione, la colla non partecipa agli sforzi, in quanto anche a secco, sotto flessione del longherone non hanno gradi di libertà, ma sono unicamente compressi. Si ottiene una struttura leggera e rigida, indipendente dall'elasticità e dall'invecchiamento della colla.



Figura 7 - Listelli inclinati a realizzare triangoli tra i listelli del longherone e tra le centine, con lo scopo di mantenere la distanza verticale.

Come quarto e ultimo consiglio, invito a riflettere sul fatto che per un longherone o trave per avere fibre tese (e quindi i diagrammi dei σ come spiegato nell'articolo), occorre che vi siano fibre compresse, o meglio che reagiscano alla compressione Figura 8.

Ho visto ali di polistirolo con listelli di fibra di carbonio unicamente nella parte inferiore! (Figura 9) La motivazione era che il carbonio si mette nella parte tesa! Sì se però vi è una parte compressa, altrimenti il carbonio resiste, ma la parte superiore dell'ala si schiaccia!

Giulio Ricotti

Ho visto anche fili di carbonio messi nell'asse neutro, ora se vogliamo che servano per legare meglio insieme due oggetti incollati tra loro, va bene parliamone, ma per dare rigidità strutturale proprio no (forse per sforzi di taglio), per definizione di asse neutro.

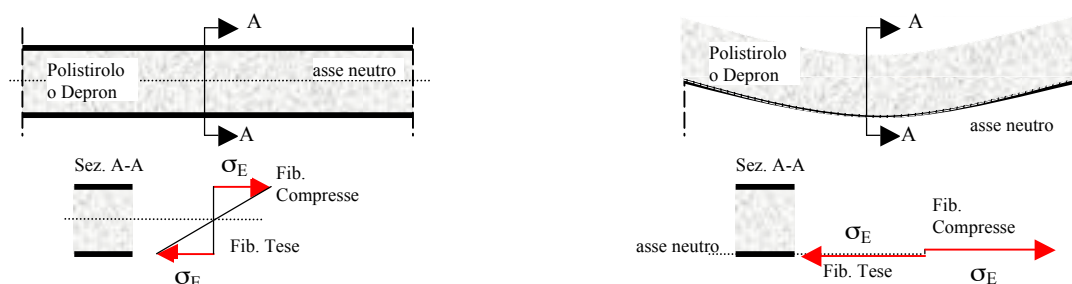
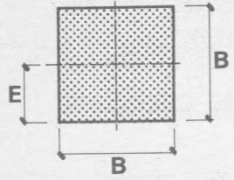
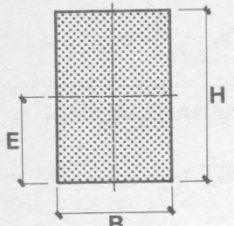
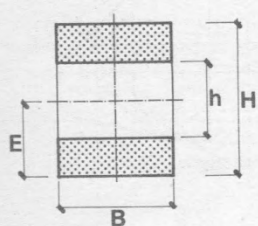
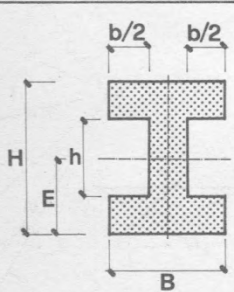
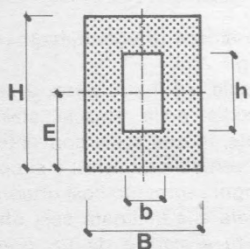
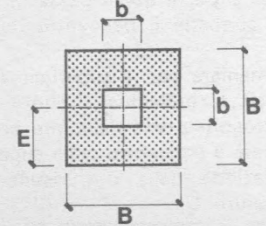


Figura 9 - Listello di Carbonio solo sotto ad un'ala in Polistirolo o Depron

Sperando di non aver annoiato eccessivamente, concludo augurando e stimolando ottime costruzioni, ma soprattutto divertimento e motivazione, sentendosi appagati e soddisfatti della propria realizzazione.

**MOMENTI D'INERZIA, MOMENTI DI RESISTENZA
ED AREE DELLE SEZIONI PIÙ COMUNI**

Tipo di sezione	Momento d'inerzia I	Distanza E	Modulo di resistenza W	Area della sezione
	$\frac{B^4}{12} = 0,0833 B^4$	$\frac{B}{2}$	$\frac{B^3}{6} = 0,167 B^3$	B^2
	$\frac{BH^3}{12} = 0,0833 BH^3$	$\frac{H}{2}$	$\frac{BH^2}{6} = 0,167 BH^2$	BH
	$\frac{B(H^3 - h^3)}{12} = 0,0833 B(H^3 - h^3)$	$\frac{H}{2}$	$\frac{B(H^3 - h^3)}{6H} = 0,167 B \frac{H^3 - h^3}{H}$	$B(H - h)$
	$\frac{BH^3 - bh^3}{12} = 0,0833 (BH^3 - bh^3)$	$\frac{H}{2}$	$\frac{BH^3 - bh^3}{6H} = 0,167 \frac{BH^3 - bh^3}{H}$	$BH - bh$
	$\frac{BH^3 - bh^3}{12}$	$\frac{H}{2}$	$\frac{BH^3 - bh^3}{6H}$	$BH - bh$
	$\frac{B^4 - b^4}{12} = 0,0833 (B^4 - b^4)$	$\frac{B}{2}$	$\frac{B^4 - b^4}{6B} = 0,167 \frac{B^4 - b^4}{B}$	$B^2 - b^2$

Segue MOMENTI D'INERZIA, MOMENTI DI RESISTENZA ED AREE DELLE SEZIONI PIÙ COMUNI

Tipo di sezione	Momento d'inerzia I	Distanza E	Modulo di resistenza W	Area della sezione
	$\frac{BH^3 - bh^3}{12} = 0,0833 (BH^3 - bh^3)$	$\frac{H}{2}$	$\frac{BH^3 - bh^3}{6H} = 0,167 \frac{BH^3 - bh^3}{H}$	$BH - bh$
	$\frac{5\sqrt{3}}{16} R^4 = 0,5413 R^4$	$\frac{\sqrt{3}}{2} R = 0,866 R$	$\frac{5}{8} R^3 = 0,625 R^3$	$2,598 R^2$
	$\frac{B^2 + 4Bb + b^2}{36 (B + b)} H^3$	$\frac{H}{3} \cdot \frac{B + 2b}{B + b}$	$W = \frac{B^2 + 4Bb + b^2}{12 (B + b)} H^2$ $W' = \frac{B^2 + 4Bb + b^2}{12 (2B + b)} H^2$	$\frac{(B + b)}{2} H$
	$\frac{\pi R^4}{4} = 0,7854 R^4$ $\frac{\pi D^4}{64} = 0,0491 D^4$	$R = \frac{D}{2}$	$\frac{\pi R^3}{4} = \frac{\pi D^3}{32}$	$\pi R^2 = \frac{\pi D^2}{4}$
	$\frac{\pi (R^4 - r^4)}{4} = 0,7854 (R^2 - r^2)$ $\frac{\pi (D^4 - d^4)}{64} = 0,0491 (D^4 - d^4)$	$R = \frac{D}{2}$	$\frac{\pi (R^4 - r^4)}{4R} = 0,7854 \frac{(R^4 - r^4)}{R}$ $\frac{\pi (D^4 - d^4)}{32 D} = 0,098 \frac{(D^4 - d^4)}{D}$	$\pi (R^2 - r^2)$
	$\left(\frac{\pi}{8} - \frac{8}{9\pi} \right) R^4 = 0,1098 R^4$	$E = 0,5756 R$ $E' = 0,4244 R$	$W = 0,1908 R^3$ $W' = 0,2587 R^3$	$\frac{\pi R^3}{2} = 1,5707 R^2$ $\frac{\pi D^3}{8} = 0,3926 D^3$

31

Tabella 3 - Formule per il calcolo del momento d'inerzia baricentrico J

Bibliografia e Riferimenti

1. *Ferdinando Galè* – DIMENSIONAMENTO PRATICO DI AEROSTRUTTURE – Ed. NASN
2. *Lemonnier* – PRONTUARIO PER IL CALCOLO DI ELEMENTI STRUTTURALI