

# Esame di Stato — Sessione Ordinaria 2016

## Costruzioni Aeronautiche — Prima Parte

Velivolo leggero biposto — Corsa di atterraggio e verifica gamba carrello

Pag. 1/2



Sessione ordinaria 2016

Seconda prova scritta



*Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca*  
**M001 – ESAME DI STATO DI ISTRUZIONE SECONDARIA SUPERIORE**

**Indirizzo:** ITCT - TRASPORTI E LOGISTICA  
ARTICOLAZIONE COSTRUZIONE DEL MEZZO  
OPZIONE COSTRUZIONI AERONAUTICHE

**Tema di:** STRUTTURA, COSTRUZIONE, SISTEMI E IMPIANTI MEZZO AEREO

*Il candidato svolga la prima parte della prova e due dei quesiti proposti nella seconda parte.*

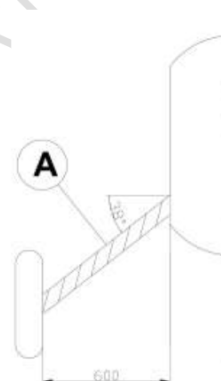
### PRIMA PARTE

Determinare spazio e tempo di atterraggio di un velivolo leggero biposto con le seguenti caratteristiche:

- Massa di 350 kg
- Superficie alare di 17 m<sup>2</sup>
- Apertura alare 11 m
- $C_{R0}$  0,042 e  $C_{Pmax}$  1,4

Inoltre la struttura del suo carrello triciclo anteriore è costituita da due aste tubolari collegate direttamente alla struttura della fusoliera, con le seguenti caratteristiche (A vedi disegno):

- $\sigma_R = 750$  N/mm<sup>2</sup>
- $E = 200000$  N/mm<sup>2</sup>
- angolo di 38°



Se durante l'atterraggio si verifica, al contatto con il terreno, un incremento del peso di 3 volte, il candidato, facendo le dovute ipotesi semplificative, assumendo con motivati criteri gli ulteriori dati necessari, effettui la verifica di resistenza nella sezione più sollecitata dell'asta del carrello, verificandola anche a carico di punta (nell'ipotesi di solo sforzo normale).

### Dati del problema

#### Aeromobile:

- Massa:  $m = 350$  kg
- Superficie alare:  $S = 17$  m<sup>2</sup>
- Apertura alare:  $b = 11$  m
- $C_{D0} = 0,042$ ;  $C_{Lmax} = 1,4$

#### Gamba carrello (asta tubolare):

- $\sigma_R = 750$  N/mm<sup>2</sup>
- $E = 200\,000$  N/mm<sup>2</sup>
- Angolo di inclinazione:  $\alpha = 38^\circ$
- Proiezione orizzontale:  $L_h = 600$  mm
- Fattore di carico al contatto:  $n = 3$

## Primo Quesito — Corsa di atterraggio

Per *corsa di atterraggio* si intende la manovra che va dal momento del contatto delle ruote con la pista fino all'arresto completo del velivolo.

### Fase A — Peso e velocità di stallo in configurazione di atterraggio

Il peso del velivolo vale:

$$W = m g = 350 \times 9,81 = 3433,5 \text{ N}$$

Il testo non specifica ipersostentatori: si assume  $C_{L\max} = 1,4$  uguale alla configurazione pulita (ipotesi del tutto plausibile per un ultraleggero di questo peso). La velocità di stallo in configurazione di atterraggio è:

$$v_{S0} = \sqrt{\frac{2W}{\rho S C_{L\max}}} = \sqrt{\frac{2 \times 3433,5}{1,225 \times 17 \times 1,4}} = 15,35 \text{ m/s}$$

La velocità di contatto con la pista è convenzionalmente assunta pari a:

$$v_{\text{contatto}} = 1,17 v_{S0} = 1,17 \times 15,35 = 17,96 \text{ m/s}$$

### Ipotesi semplificative

Per il calcolo della corsa di atterraggio si adottano le seguenti ipotesi semplificative:

- **Spinta nulla:**  $T = 0$  (motore al minimo durante la corsa);
- **Pista in erba:**  $f_{\text{ruota libera}} = 0,07$  (attrito volvente su fondo erboso, compatibile con la categoria del velivolo);
- **Frenatura:**  $f_{\text{fren}} = 0,30$  (attrito durante l'azionamento dei freni).

### Fase B — Parametri aerodinamici per la rullata

L'allungamento geometrico e quello efficace valgono:

$$\lambda = \frac{b^2}{S} = \frac{11^2}{17} = 7,118 \quad \lambda_e = k \lambda = 0,9 \times 7,118 = 6,41$$

Il coefficiente di portanza ottimale per la rullata (quello che minimizza la resistenza totale a terra, bilanciando la resistenza aerodinamica con quella d'attrito) è:

$$C_{L\text{ott}} = \frac{f \cdot \pi \cdot \lambda_e}{2} = \frac{0,07 \times \pi \times 6,41}{2} = 0,704$$

Fisicamente,  $C_{L\text{ott}}$  è il valore di  $C_L$  per cui il velivolo in rullata genera esattamente la portanza che riduce al minimo l'attrito sulle ruote; esso vale lo stesso sia in decollo che in atterraggio perché il problema della rullata è simmetrico rispetto alla direzione del moto.

**Fase C — Calcolo numerico per incrementi finiti**

La corsa viene suddivisa in 5 intervalli di velocità uguali  $\Delta v = -3,591$  m/s. Per ogni intervallo si calcolano la portanza  $P$ , la resistenza  $R$ , la resistenza di attrito  $R_A$  e la decelerazione  $a$ :

$$P = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_{Lott} \quad C_D = C_{D0} + \frac{C_{Lott}^2}{\pi \lambda_e} \quad R = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_D$$

$$R_A = f_{fren} (W - P) \quad a = -\frac{R + R_A}{m}$$

| $v$ [m/s] | $a$ [m/s <sup>2</sup> ] | $a_m$ [m/s <sup>2</sup> ] | $\Delta v$ [m/s] | $\Delta t$ [s] | $v_m$ [m/s]  | $\Delta l$ [m] | $\ell$ [m]      |
|-----------|-------------------------|---------------------------|------------------|----------------|--------------|----------------|-----------------|
| 17.955    | -1.56                   |                           |                  |                |              |                | 0.000           |
| 14.364    | -2.06                   | -1.81                     | -3.591           | 2.0            | 16.160       | 32.135         | 32.135          |
| 10.773    | -2.44                   | -2.25                     | -3.591           | 1.6            | 12.569       | 20.065         | 52.200          |
| 7.182     | -2.72                   | -2.58                     | -3.591           | 1.4            | 8.978        | 12.485         | 64.685          |
| 3.591     | -2.89                   | -2.80                     | -3.591           | 1.3            | 5.387        | 6.898          | 71.584          |
| 0.000     | -2.94                   | -2.91                     | -3.591           | 1.2            | 1.796        | 2.212          | 73.796          |
|           |                         |                           |                  | $t_{TOT} =$    | <b>7.5 s</b> | $\ell_{TOT} =$ | <b>73.796 m</b> |

**Risultati — Primo Quesito**

$$\ell_{TOT} \approx 73,8 \text{ m}$$

$$t_{atterraggio} \approx 7,5 \text{ s}$$

**Secondo Quesito — Verifica strutturale della gamba del carrello****Fase A — Determinazione del carico di calcolo**

Al contatto col suolo il peso si amplifica di un fattore  $n = 3$ :

$$W_{\text{land}} = 3 \times 3433,5 = 10\,300 \text{ N}$$

Il carrello anteriore è di tipo triciclo con **due gambe**: ciascuna sopporta la metà:

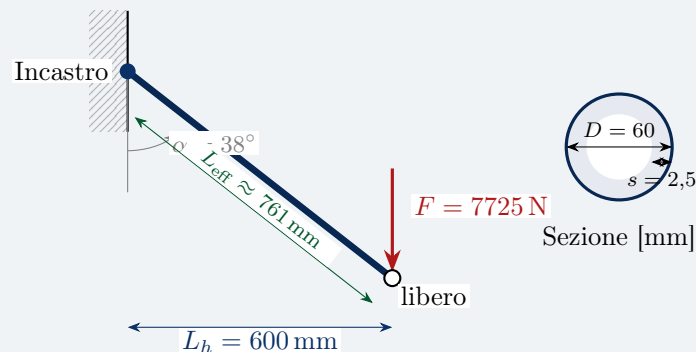
$$F_{\text{gamba}} = \frac{W_{\text{land}}}{2} = 5150 \text{ N}$$

Il testo fornisce  $\sigma_R$  (resistenza a rottura): si esegue pertanto una **verifica a rottura** con coefficiente di sicurezza  $k = 1,5$  (norma RAI/CS-VLA per strutture di carrello in regime di carico limite):

$$F = k \cdot F_{\text{gamba}} = 1,5 \times 5150 = 7725 \text{ N} \quad (\text{carico di robustezza})$$

### Fase B — Schema strutturale e geometria

La gamba, collegata rigidamente alla fusoliera, si comporta come una **trave a sbalzo (incastro-libero)**: l'incastro è alla fusoliera, il vincolo di terra è l'estremità libera. Il carico  $F$  agisce verticalmente verso il basso (reazione del terreno trasmessa al velivolo).



La **lunghezza effettiva** dell'asta (dal nodo di incastro all'asse ruota) si ottiene dalla proiezione orizzontale nota:

$$L_{\text{eff}} = \frac{L_h}{\cos \alpha} = \frac{600}{\cos 38^\circ} = 761,4 \text{ mm}$$

Il momento flettente all'incastro (sezione più sollecitata) vale:

$$M_f = F \times L_h = 7725 \times 600 = 4,635 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

#### Due metodi equivalenti per $M_f$ :

*Metodo diretto (leva verticale):*

$$M_f = F_{\text{vert}} \times L_h = 7725 \times 600 = 4,635 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

*Metodo componenti (forza trasversale  $\times$  lunghezza asta):*

$$M_f = F \cos \alpha \times L_{\text{eff}} = 7725 \cos 38^\circ \times 761,4 = 6088 \times 761,4 = 4,635 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Il risultato è identico: il momento flettente dipende solo dalla componente di forza *perpendicolare* all'asse dell'asta, moltiplicata per la lunghezza dell'asta — oppure, equivalentemente, dalla forza verticale moltiplicata per il suo braccio orizzontale rispetto all'incastro.

### Fase C — Verifica a flessione

Si sceglie un **tubolare circolare cavo** con  $D = 60 \text{ mm}$  e spessore  $s = 2,5 \text{ mm}$ , quindi raggio esterno  $R = 30 \text{ mm}$  e interno  $r = 27,5 \text{ mm}$ .

Il momento d'inerzia della sezione è:

$$J = \frac{\pi(R^4 - r^4)}{4} = \frac{\pi(30^4 - 27,5^4)}{4} = 186\,992 \text{ mm}^4$$

La tensione massima (sulla fibra più lontana dall'asse neutro, a  $y = R = 30 \text{ mm}$ ) è:

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{M_f \cdot R}{J} = \frac{4,635 \times 10^6 \times 30}{186\,992} = 744 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\max} = 744 \text{ N/mm}^2 < \sigma_R = 750 \text{ N/mm}^2 \quad \Rightarrow \quad \text{VERIFICA POSITIVA} \quad (\text{margine: } +0,8\%)$$

Si noti che il margine è molto ridotto: il tubolare  $60 \times 2,5$  è *esattamente* il profilo commerciale minimo che soddisfa la condizione.

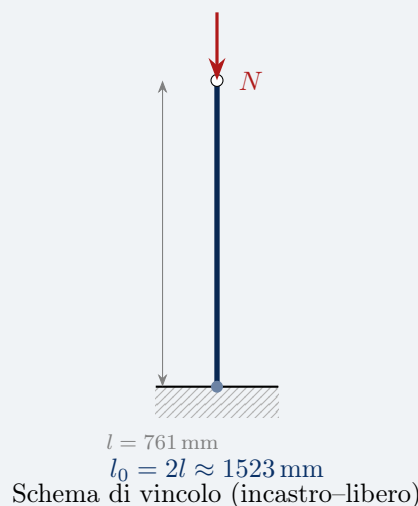
#### Fase D — Verifica a carico di punta (instabilità di Eulero)

Poiché la gamba è inclinata, il carico  $F$  presenta una **componente assiale** (di compressione) lungo l'asse dell'asta:

$$N = F \sin \alpha = 7725 \times \sin 38^\circ = 4756 \text{ N}$$

**Schema di vincolo e lunghezza libera d'inflessione.** La gamba è incastrata alla fusoliera (estremità superiore) e libera all'estremità inferiore (contatto ruota), quindi lo schema è *incastro-libero*. Per questo caso la lunghezza libera d'inflessione vale il **doppio** della lunghezza effettiva:

$$l_0 = 2 L_{\text{eff}} = 2 \times 761,4 = 1522,8 \text{ mm}$$



La formula di Eulero fornisce il carico critico di instabilità:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E J}{l_0^2} = \frac{\pi^2 \times 200\,000 \times 186\,992}{1522,8^2} = 159\,168 \text{ N}$$

$$P_{cr} = 159\,168 \text{ N} \gg N = 4756 \text{ N} \quad \Rightarrow \quad \text{VERIFICA POSITIVA}$$

Il rapporto  $P_{cr}/N \approx 33,5$ : il tubolare lavora ben al di sotto del carico critico. L'instabilità non è il fenomeno governante per questa asta.

**Snellezza dell'asta** (controllo del campo di validità di Eulero):

$$A = \pi(R^2 - r^2) = \pi(30^2 - 27,5^2) = 451,6 \text{ mm}^2 \quad \rho_{\min} = \sqrt{\frac{J}{A}} = \sqrt{\frac{186\,992}{451,6}} = 20,35 \text{ mm}$$

$$\lambda = \frac{l_0}{\rho_{\min}} = \frac{1522,8}{20,35} \approx 74,8$$

Con  $E = 200\,000 \text{ N/mm}^2$  e  $\sigma_R = 750 \text{ N/mm}^2$  (acciaio), la snellezza limite di Eulero vale:

$$\lambda^* = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_R}} = \pi \sqrt{\frac{200\,000}{750}} \approx 51,3$$

Poiché  $\lambda = 74,8 > \lambda^* = 51,3$ , l'asta è **snella** e la formula di Eulero è applicabile.

#### Riepilogo — Secondo Quesito

| Verifica                      | Valore calcolato      | Limite                          | Esito     |
|-------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------|
| Flessione ( $\sigma_{\max}$ ) | 744 N/mm <sup>2</sup> | $\sigma_R = 750 \text{ N/mm}^2$ | <b>OK</b> |
| Carico di punta ( $P_{cr}$ )  | 159 168 N             | $N = 4756 \text{ N}$            | <b>OK</b> |

Il tubolare  $\phi 60 \times 2,5$  in acciaio ( $\sigma_R = 750 \text{ N/mm}^2$ ,  $E = 200\,000 \text{ N/mm}^2$ ) soddisfa entrambe le condizioni di resistenza. La flessione è la condizione governante, con un margine di sicurezza residuo dell'ordine dell'0,8 %.