

Pag. 1/3

Sessione ordinaria 2026
Seconda prova scritta*Ministero dell'Istruzione e del Merito***A061 - ESAME DI MATURITÀ**

Indirizzo: ITCT – TRASPORTI E LOGISTICA
ARTICOLAZIONE COSTRUZIONE DEL MEZZO
OPZIONE COSTRUZIONI AERONAUTICHE
(Testo valevole anche per l'indirizzo quadriennale IT57)

Disciplina: STRUTTURA, COSTRUZIONE, SISTEMI E IMPIANTI DEL MEZZO AEREO

Il candidato svolga il tema indicato nella prima parte e risponda a due soli quesiti tra i quattro proposti nella seconda parte.

PRIMA PARTE

Un velivolo di linea bimotore a corto/medio raggio si trova in fase di crociera alle seguenti condizioni operative:

- Quota di volo: 9000 m in atmosfera standard
- Velocità di crociera $V_c = 230$ m/s
- Peso del velivolo $W = 600$ kN
- Superficie alare $S = 125$ m²

Il candidato esegua il progetto preliminare dell'alettone per garantire la manovra di rollio. L'alettone ha una configurazione a sbalzo, è incernierato al longherone posteriore dell'ala ed è realizzato in lega di alluminio 2024-T3 $\sigma_{amm} = 140$ MPa considerando i coefficienti di sicurezza.

Dati dell'alettone:

- Apertura dell'alettone $b_{alettone} = 3.5$ m
- Corda media dell'alettone $c_{alettone} = 0.6$ m
- Coefficiente di portanza massimo dell'alettone $\Delta c_{Lmax} = 0.8$ (incremento locale dovuto alla deflessione massima).

Pag. 2/3



Sessione ordinaria 2026
Seconda prova scritta

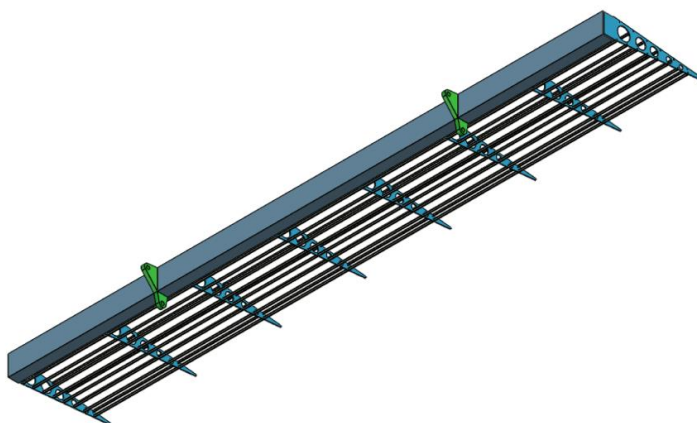
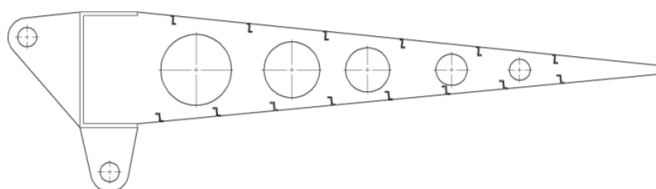


Ministero dell'Istruzione e del Merito

A061 - ESAME DI MATURITÀ

Indirizzo: ITCT – TRASPORTI E LOGISTICA
ARTICOLAZIONE COSTRUZIONE DEL MEZZO
OPZIONE COSTRUZIONI AERONAUTICHE
(Testo valevole anche per l'indirizzo quadriennale IT57)

Disciplina: STRUTTURA, COSTRUZIONE, SISTEMI E IMPIANTI DEL MEZZO AEREO



Il candidato, formulate le opportune ipotesi aggiuntive, svolga i seguenti punti:

- 1) Determinare il carico distribuito massimo agente sull'alettone nell'ipotesi di deflessione massima alla velocità di progetto, considerando un coefficiente di robustezza $n = 2.5$.
- 2) Definire lo schema statico dell'alettone ipotizzando la presenza di 2 cerniere di attacco. Rappresentare i diagrammi del taglio e del momento flettente lungo l'apertura dell'alettone.
- 3) Ipotizzando che il momento flettente sia assorbito interamente dai correnti (solette) di un longherone a "C" (altezza longherone $h = 0.12$ m), calcolare l'area della sezione trasversale dei correnti nel punto di massimo momento.
- 4) Calcolare lo spessore minimo dell'anima del longherone per resistere al taglio massimo rilevato.

Pag. 3/3



Sessione ordinaria 2026
Seconda prova scritta



Ministero dell'Istruzione e del Merito

A061 - ESAME DI MATURITÀ

Indirizzo: ITCT – TRASPORTI E LOGISTICA
ARTICOLAZIONE COSTRUZIONE DEL MEZZO
OPZIONE COSTRUZIONI AERONAUTICHE
(Testo valevole anche per l'indirizzo quadriennale IT57)

Disciplina: STRUTTURA, COSTRUZIONE, SISTEMI E IMPIANTI DEL MEZZO AEREO

SECONDA PARTE

- 1) Descrivere il fenomeno dell'inversione del comando di rollio (*aileron reversal*) dovuto alla deformabilità torsionale dell'ala e come questo influenzi la velocità massima operativa.
- 2) Illustrare i criteri di scelta dei materiali per le strutture mobili (alettoni, flap) confrontando le leghe di alluminio con i materiali compositi (fibra di carbonio), con particolare attenzione al peso e alla rigidità.
- 3) Descrivere le modalità di attuazione degli alettoni in un sistema *Fly-by-Wire*, spiegando il ruolo degli attuatori idraulici e la ridondanza necessaria per la sicurezza del volo.
- 4) Illustrare le procedure di ispezione tipiche per le cerniere degli alettoni, descrivendo i possibili difetti (corrosione, usura dei cuscinetti) e le relative prove non distruttive (PND).

Durata massima della prova: 6 ore.

È consentito soltanto l'uso di manuali tecnici e di calcolatrici scientifiche o grafiche purché non siano dotate della capacità di elaborazione simbolica algebrica e non abbiano la disponibilità di connessione a Internet.

È consentito l'uso del dizionario della lingua italiana.

È consentito l'uso del dizionario bilingue (italiano-lingua del Paese di provenienza) per i candidati di madrelingua non italiana.

Non è consentito lasciare l'Istituto prima che siano trascorse 3 ore dalla consegna della traccia.

ESAME DI STATO – Sessione ordinaria 2026**A061 – Seconda prova scritta**Indirizzo ITCT – Costruzione del mezzo, opzione *Costruzioni Aeronautiche**Struttura, costruzione, sistemi e impianti del mezzo aereo***Proposta di soluzione ragionata**

Progetto preliminare strutturale di un alettone

Dati di progetto assegnati dalla traccia**Velivolo (crociera)**

- Quota: $H = 9000$ m (atmosfera ISA)
- Velocità: $V_c = 230$ m/s
- Peso: $W = 600$ kN
- Superficie alare: $S = 125$ m²

Alettone (a sbalzo, in lega 2024-T3)

- Apertura: $b = 3,5$ m
- Corda media: $c = 0,6$ m
- $\Delta C_{L,\max} = 0,8$ (deflessione massima)
- $\sigma_{\text{amm}} = 140$ MPa (FS inclusa)
- Altezza longherone a "C": $h = 0,12$ m
- Coeff. di robustezza: $n = 2,5$

Ipotesi aggiuntive adottate

1. La condizione dimensionante è la *contromanovra* di rollio alla velocità di progetto, qui assunta pari alla velocità di crociera V_c (unica velocità fornita); a tale velocità l'alettone sviluppa l'incremento locale massimo di portanza $\Delta C_{L,\max}$.
2. Il carico aerodinamico sull'alettone è assunto *uniformemente distribuito* lungo l'apertura (corda e $\Delta C_{L,\max}$ costanti), ipotesi cautelativa e coerente con la fase di progetto preliminare.
3. Il coefficiente di robustezza $n = 2,5$ amplifica il carico aerodinamico reale (la σ_{amm} contiene già il coefficiente di sicurezza $FS = 1,5$; pertanto *non* si moltiplicano ulteriormente le tensioni ammissibili).
4. Schema strutturale a *semiguscio*: il momento flettente è assorbito dalle solette (correnti) del longherone, il taglio dalla sola anima (flusso di taglio uniforme).
5. Si trascurano gli effetti di comprimibilità sui coefficienti aerodinamici ($M_\infty \approx 0,76$) e l'azione assiale sulle solette.

1. Inquadramento aerodinamico: atmosfera ISA e pressione dinamica

Tutti i carichi derivano dalla pressione dinamica $q = \frac{1}{2}\rho V^2$: il primo passo è quindi determinare la densità dell'aria alla quota di volo.

Modello di atmosfera standard ISA (troposfera)

In troposfera la temperatura decresce linearmente con gradiente $L = 0,0065$ K/m:

$$T = T_0 - L H, \quad p = p_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{g}{RL}}, \quad \rho = \frac{p}{RT}$$

con $T_0 = 288,15$ K, $p_0 = 101\,325$ Pa, $R = 287,05$ J/(kg K).

Sostituendo $H = 9000$ m:

$$T = 288,15 - 0,0065 \cdot 9000 = 229,65 \text{ K } (\approx -43,5 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$p = 101325 \left(\frac{229,65}{288,15} \right)^{5,256} = 30,74 \text{ kPa}, \quad \rho = \frac{30740}{287,05 \cdot 229,65} = \boxed{0,466 \text{ kg/m}^3}$$

Verifica di coerenza: $a = \sqrt{\gamma RT} = 303,8 \text{ m/s} \Rightarrow M_\infty = V_c/a = 0,76$, valore tipico di crociera di un bireattore di linea (giustifica l'ipotesi di flusso subsonico ad alto numero di Mach).

$$q = \frac{1}{2} \rho V_c^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,466 \cdot 230^2 = 12,34 \text{ kPa}$$

2. Carico distribuito massimo sull'alettone

Forza aerodinamica generata dalla deflessione

La deflessione dell'alettone produce un incremento locale di portanza $\Delta C_{L,\max}$. La forza aerodinamica per unità di apertura (carico lineico) vale:

$$p_{\text{aer}} = \Delta C_{L,\max} \cdot q \cdot c$$

ossia “coefficiente $\times$ pressione dinamica $\times$ corda”. Il carico *di progetto* si ottiene amplificando per il coefficiente di robustezza n .

$$p_{\max} = n \cdot \Delta C_{L,\max} \cdot q \cdot c = 2,5 \cdot 0,8 \cdot 12340 \cdot 0,6$$

Punto 1 – Carico distribuito di progetto

$$\boxed{p_{\max} \approx 14,80 \text{ kN/m}} \quad \Rightarrow \quad F_{\text{tot}} = p_{\max} \cdot b = 14,80 \cdot 3,5 \approx 51,8 \text{ kN}$$

Lettura fisica del valore

Quasi 5,3 t di spinta aerodinamica gravano su una superficie mobile di soli $b \cdot c = 2,1 \text{ m}^2$. Il valore elevato deriva dall'altissima pressione dinamica ($V_c = 230 \text{ m/s}$): è esattamente questo il motivo per cui l'inversione del comando (quesito teorico 1) diventa critica proprio alle alte velocità.

3. Schema statico e diagrammi di taglio e momento flettente

Perché due cerniere e dove collocarle

Con una sola cerniera il momento flettente dell'alettone verrebbe equilibrato da due forze opposte a piccolissimo braccio sull'occhiello della cerniera, generando reazioni enormi che la danneggerebbero. Si adottano quindi *due cerniere*: idealmente agli estremi (massimo braccio, minime reazioni), in pratica leggermente arretrate per contenere la freccia in mezzeria. Per il progetto preliminare si schematizza l'alettone come *trave su due appoggi* agli estremi, soggetta al carico uniforme $p_{\max}$.

Trave appoggiata di luce $L = b = 3,5$ m, carico uniforme $p_{\max} = 14,80 \text{ kN/m}$.

Reazioni vincolari.

$$R_A = R_B = \frac{p_{\max} L}{2} = \frac{14,80 \cdot 3,5}{2} \approx 25,9 \text{ kN}$$

Taglio. Andamento lineare, nullo in mezzeria:

$$T(x) = R_A - p_{\max} x, \quad \boxed{T_{\max} = R_A = 25,9 \text{ kN}} \quad (\text{agli appoggi})$$

Momento flettente. Andamento parabolico, massimo in mezzeria:

$$M(x) = R_A x - \frac{p_{\max} x^2}{2}, \quad \boxed{M_{\max} = \frac{p_{\max} L^2}{8} = \frac{14,80 \cdot 3,5^2}{8} \approx 22,67 \text{ kN m}}$$

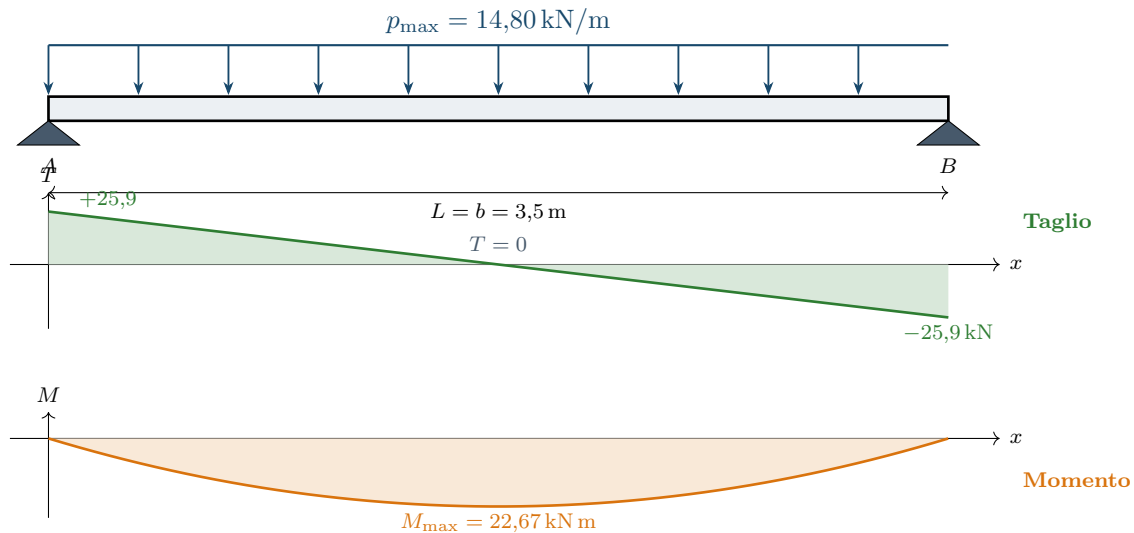


Figura – Schema statico, diagramma del taglio (lineare) e del momento flettente (parabolico).

4. Area dei correnti (solette) nel punto di massimo momento

Modello a solette: la coppia interna

Nell'ipotesi che il momento sia assorbito *interamente* dalle solette, queste si comportano come una coppia di forze uguali e contrarie F , distanti quanto l'altezza del longherone h :

$$M_{\max} = F \cdot h \Rightarrow F = \frac{M_{\max}}{h}.$$

Imponendo nella soletta la tensione ammissibile, $\sigma = F/A \leq \sigma_{\text{amm}}$, si ricava l'area minima.

$$F = \frac{M_{\max}}{h} = \frac{22\,670}{0,12} \approx 188,9 \text{ kN} \quad \Rightarrow \quad A = \frac{F}{\sigma_{\text{amm}}} = \frac{M_{\max}}{h \sigma_{\text{amm}}}$$

$$A = \frac{22\,670}{0,12 \cdot 140 \times 10^6} = 1,349 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Punto 3 – Area di ciascuna soletta

$$\boxed{A \approx 1349 \text{ mm}^2 \approx 13,5 \text{ cm}^2}$$

Realizzabile, ad esempio, con un angolare a “L” di lato $\approx 60 \text{ mm}$ e spessore $\approx 8 \text{ mm}$ (o con doppio angolare). La soletta superiore (compressa) andrebbe verificata anche a instabilità locale.

Raffinamento

Assumendo come braccio della coppia non l'intera altezza ma il 90% ($0,9h$, posizione reale delle risultanti "a farfalla" negli angolari), si ottiene $A \approx 1499 \text{ mm}^2$: scelta più cautelativa e spesso adottata nelle soluzioni di riferimento.

5. Spessore minimo dell'anima a taglio**Anima a taglio: flusso uniforme**

Nello schema a solette, l'anima assorbe l'intero taglio con flusso di taglio approssimativamente uniforme $q_T = T_{\max}/h$. La tensione tangenziale media vale $\tau = q_T/t = T_{\max}/(ht)$. La tensione ammissibile a taglio si ricava dal criterio di Von Mises:

$$\tau_{\text{amm}} = \frac{\sigma_{\text{amm}}}{\sqrt{3}} \approx 0,577 \sigma_{\text{amm}}.$$

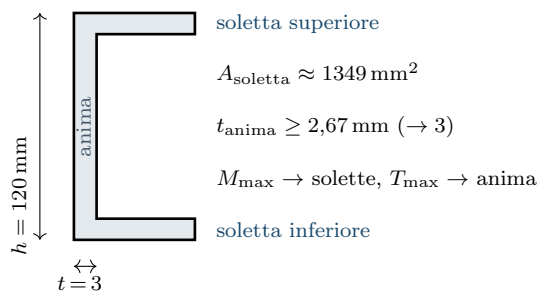
$$\tau_{\text{amm}} = \frac{140}{\sqrt{3}} \approx 80,8 \text{ MPa} \quad \Rightarrow \quad t \geq \frac{T_{\max}}{h \tau_{\text{amm}}} = \frac{25\,900}{0,12 \cdot 80,8 \times 10^6}$$

Punto 4 – Spessore minimo dell'anima

$$t_{\min} \approx 2,67 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad \text{si adotta lamiera commerciale } t = 3 \text{ mm}.$$

Variante più cautelativa

Trattando l'anima come sezione piena soggetta a taglio con distribuzione parabolica (Jourawski, $\tau_{\max} = \frac{3}{2} \tau_{\text{medio}}$), come nel manuale di riferimento, si avrebbe $t_{\min} \approx 4,0 \text{ mm}$. La scelta tra i due modelli dipende dal grado di idealizzazione assunto: con anima "pura a taglio" è corretto il flusso uniforme.

6. Sintesi del longherone dimensionato

Grandezza	Espressione	Valore
Densità a 9000 m	$\rho = p/(RT)$	0,466 kg/m ³
Pressione dinamica	$q = \frac{1}{2}\rho V_c^2$	12,34 kPa
Carico distribuito	$p_{\max} = n \Delta C_{L,\max} q c$	14,80 kN/m
Forza totale	$F = p_{\max} b$	51,8 kN
Reazioni / Taglio max	$T_{\max} = p_{\max} L/2$	25,9 kN
Momento flettente max	$M_{\max} = p_{\max} L^2/8$	22,67 kN m
Area di una soletta	$A = M_{\max}/(h \sigma_{\text{amm}})$	1349 mm ²
Spessore anima	$t = T_{\max}/(h \tau_{\text{amm}})$	2,67 mm ($\rightarrow 3$)

Seconda parte – Quesiti teorici

La traccia richiede la risposta a due soli quesiti. Di seguito sono svolti tutti e quattro a scopo didattico; in sede d'esame se ne scelgano due (ad esempio il 1 e il 2, che riprendono direttamente il tema della prima parte).

Quesito 1 – Inversione del comando di rollio (*aileron reversal*)

La deflessione verso il basso di un alettone genera un incremento di portanza arretrato rispetto all'asse elastico dell'ala: nasce così un momento torcente che tende a *ridurre* l'incidenza del profilo. Se l'ala è torsionalmente deformabile, questa rotazione negativa sottrae portanza, contrastando l'effetto dell'alettone.

La forza aerodinamica dell'alettone cresce con $q = \frac{1}{2}\rho V^2$, cioè con il quadrato della velocità; ma anche il momento torcente che "svergola" l'ala cresce con q . Esiste perciò una velocità, detta *velocità di inversione* V_{rev} , alla quale i due effetti si annullano: l'efficacia del comando diventa nulla. Oltre V_{rev} il comando si *inverte* (barra a destra $\rightarrow$ rollio a sinistra), con conseguenze potenzialmente catastrofiche. Poiché $V_{\text{rev}} \propto \sqrt{GJ}$ (rigidezza torsionale dell'ala), la velocità massima operativa V_{NE} deve restare con ampio margine sotto V_{rev} . I rimedi: aumentare la rigidezza torsionale del cassone alare, spostare gli alettoni verso la radice, oppure adottare alettoni interni o *spoiler* alle alte velocità.

Quesito 2 – Scelta dei materiali: leghe di alluminio vs. compositi

Per i materiali "selezionati" tradizionali (legno, leghe leggere, acciaio) l'*indice di merito* E/ρ è pressoché costante: a parità di rigidezza il peso strutturale è simile. La fibra di carbonio rompe questo equilibrio, perché unisce un modulo elastico paragonabile all'acciaio ($E \gtrsim 200$ GPa nella direzione delle fibre) a una densità prossima a quella del magnesio ($\approx 1,6$ kg/dm³): l'indice E/ρ aumenta di parecchie volte.

Per una struttura mobile come l'alettone i vantaggi del composito sono: minor peso (cruciale per il bilanciamento sull'asse di cerniera e per il flutter), elevata rigidezza specifica, possibilità di orientare le fibre per massimizzare la rigidezza torsionale (utile proprio contro l'*aileron reversal*), e ottimo comportamento a fatica (i compositi e le leghe di titanio risentono poco della fatica, a differenza delle leghe di alluminio, particolarmente sensibili e soggette a corrosione sinergica). Per contro: costo elevato, sensibilità ai danni da impatto (delaminazioni difficili da rilevare), ispezione più complessa. Le leghe 2024/7075 restano competitive per economicità, riparabilità e tecnologia consolidata.

Quesito 3 – Attuazione degli alettoni in sistema *Fly-by-Wire*

Nel FBW il comando del pilota non è collegato meccanicamente alla superficie: i movimenti della barra (o del side-stick) sono convertiti in segnali elettrici, elaborati dai calcolatori di volo (FCC) che, tenuto conto delle leggi di controllo e dell'involuppo di volo, comandano gli *attuatori idraulici* (servocomandi) dell'alettone. L'attuatore idraulico fornisce la potenza necessaria a vincere il momento di cerniera (molto elevato alle alte q), che il pilota non potrebbe sostenere manualmente.

La sicurezza si basa sulla *ridondanza*: più circuiti idraulici indipendenti (tipicamente identificati come Green/Blue/Yellow), più calcolatori in configurazione *command/monitor*, alimentazioni elettriche separate. In caso di avaria di un canale, il sistema riconfigura il controllo sui canali sani (*fail-operational/fail-safe*). La sensibilità artificiale al comando (*artificial feel*) viene ricreata, poiché manca il ritorno di forza aerodinamico naturale.

Quesito 4 – Ispezione delle cerniere e prove non distruttive (PND)

Le cerniere degli alettoni sono punti critici: lavorano sotto carichi alternati e in ambiente esposto. I difetti tipici sono la *corrosione* (puntiforme, interstiziale o da contatto galvanico tra materiali diversi), l'*usura dei cuscinetti* e dei perni (gioco eccessivo, ovalizzazione dell'occhiello), le *cricche da fatica* innescate ai raccordi. Le ispezioni si articolano in controlli visivi periodici, verifica del gioco e della libertà di rotazione, e prove non distruttive:

- **Liquidi penetranti (PT)**: cricche affioranti su superfici non porose.
- **Magnetoscopia (MT)**: difetti superficiali e sub-superficiali su materiali ferromagnetici (perni in acciaio).
- **Correnti indotte (ET)**: cricche e corrosione su leghe leggere, anche sotto strati di vernice.
- **Ultrasuoni (UT)**: difetti interni e misura di spessori residui.
- **Radiografia (RT)**: difetti volumetrici interni.

Per le cerniere in composito si privilegiano UT e termografia per individuare delaminazioni non visibili.

Tutti i valori numerici sono stati verificati per via computazionale. – Prof. Ing. B. Raucci