

Soluzione svolta

Prova d'Esame 2023 Piper PA-18 Super Cub

Dimensionamento dell'asta di controventatura
e dell'accoppiamento a forcella
Caso con coefficiente di Oswald $e = 0,9$

*Questo fascicoletto mostra la soluzione completa con il **confronto esplicito col caso** $e = 1$ (in violetto) e le verifiche principali su asta tubolare **Al 7075-T6** e perno **AISI 4130**.*

Costruzioni Aeronautiche — Classe 4ACA
Anno scolastico 2024/25

Prof. Ing. B. Raucci
ITIS E. Majorana – Cassino (FR)

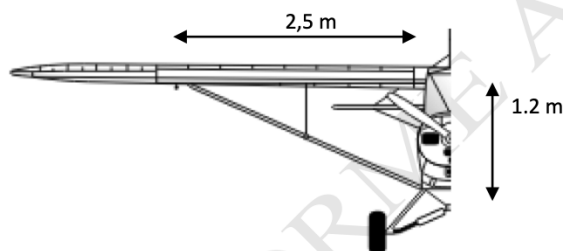
Soluzione – Prova d'Esame 2023

Dimensionamento dell'asta di controventatura e dell'accoppiamento a forcella

Piper PA-18 Super Cub (coefficiente di Oswald $e = 0,9$)

Costruzioni Aeronautiche | Classe 4ACA | A.S. 2024/25

Prof. Ing. B. Raucci — ITIS E. Majorana, Cassino (FR)



Dimensionare, in maniera adeguata, l'asta di controvento e l'accoppiamento a forcella di un PIPER PA-18.

Il massimo fattore di carico per il velivolo corrisponde a quello che si verifica durante una virata in volo orizzontale alla velocità di massima efficienza e alla quota di 12000 ft con raggio di virata 150 m.

Dati:

- $W_{TOM} = 794$ kg
- Superficie alare $16,6$ m²
- $AR = 6,9$
- Coefficiente di resistenza di profilo $C_{D0} = 0,021$
- Materiale asta controvento tubolare Alluminio 7075 T6 normalizzato; rapporto tra i diametri di $0,9$ ($d/D=0,9$) (La lega 7075-T6 ha un carico di rottura massimo di 510–572 MPa e di snervamento di 434–503 MPa. Allungamento del 5–11%)
- Materiale perno/bullone AISI 4130 diametro 13 mm (Acciaio AISI 4130 ha un carico di rottura massimo di 880–1080 MPa e di snervamento di 685 MPa. Allungamento del 12%).

| Dati del problema | | |
|---------------------------|-----------------------|---|
| Grandezza | Simbolo | Valore |
| Peso massimo al decollo | W_{TOM} | 794 kg |
| Superficie alare | S | 16,6 m ² |
| Allungamento alare | AR | 6,9 |
| Coeff. resist. profilo | C_{D0} | 0,021 |
| Coeff. di Oswald | e | 0,9 |
| Quota | h | 12.000 ft = 3657,6 m |
| Raggio di virata | R | 150 m |
| Braccio orizz. attacco | — | 2,5 m |
| Dislivello verticale | — | 1,2 m |
| Materiale asta (tubolare) | Al 7075-T6 | $R_m = 510, \sigma_p = 434, E = 71700$ N/mm ² |
| Rapporto diametri | $\alpha = d/D$ | 0,9 |
| Materiale perno (DATO) | AISI 4130 | $d_p = 13$ mm; $R_m = 880$ N/mm ² |
| Coeff. di sicurezza | k | 1,5 |

Fase Preliminare — Calcolo del fattore di carico e della forza nell’asta

P.1 Densità dell’aria ISA a 12.000 ft

| Ipotesi: Atmosfera ISA standard, troposfera |
|---|
| Gradiente termico $L = 0,0065$ K/m; esponente $g/(R_{aria} L) = 4,2561$. |

$$T = 288,15 - 0,0065 \times 3657,6 = 264,4 \text{ K} \tag{1}$$

$$\rho = 1,225 \left(\frac{264,4}{288,15} \right)^{4,2561} = 0,8491 \text{ kg/m}^3 \tag{2}$$

P.2 Velocità di massima efficienza V_E

| Ipotesi: Polare parabolica con fattore di Oswald $e = 0,9$ |
|---|
| La polare è $C_D = C_{D0} + \frac{C_L^2}{\pi e AR}$. |
| La massima efficienza si raggiunge per $\frac{d}{dC_L} \left(\frac{C_L}{C_D} \right) = 0$, che fornisce: |
| $C_{L,opt} = \sqrt{\pi e AR C_{D0}} \quad C_{D,opt} = 2 C_{D0} \quad E_{max} = \frac{C_{L,opt}}{C_{D,opt}}$ |

Confronto con il caso $e = 1$: il fattore di Oswald riduce la $C_{L,opt}$ (e quindi la portanza a parità di velocità) rendendo necessaria una velocità leggermente più alta per volare alla massima efficienza:

$$C_{L,opt} = \sqrt{\pi \times 0,9 \times 6,9 \times 0,021} = \sqrt{0,4097} = \mathbf{0,640} \quad (e=1 \rightarrow 0,675) \quad (3)$$

$$C_{D,opt} = 2 \times 0,021 = 0,042 \quad E_{max} = 0,640/0,042 = 15,24 \quad (4)$$

$$V_E = \sqrt{\frac{2W}{\rho S C_{L,opt}}} = \sqrt{\frac{2 \times 7789,1}{0,8491 \times 16,6 \times 0,640}} = 41,55 \text{ m/s} \quad (e=1 \rightarrow 40,47 \text{ m/s}) \quad (5)$$

P.3 Fattore di carico nella virata

In volo orizzontale stazionario a raggio R costante:

$$n = \sqrt{1 + \left(\frac{V_E^2}{gR}\right)^2} = \sqrt{1 + \left(\frac{41,55^2}{9,81 \times 150}\right)^2} = \sqrt{1 + 1,3769} = \mathbf{1,542} \quad (e=1 \rightarrow 1,496) \quad (6)$$

Il coefficiente di Oswald e influenza la V_E e quindi direttamente il fattore di carico. Con $e = 0,9$: $n = 1,542$; con $e = 1$: $n = 1,496$. La differenza (+3,1% sul fattore di carico) si propaga a tutti i risultati successivi ed è la ragione per cui la scelta di e non è ininfluente in fase di dimensionamento.

P.4 Forza assiale nell'asta

Modello strutturale semi-ala

Trave incastrata alla radice con appoggio elastico fornito dall'asta. Portanza distribuita uniformemente. Peso ala trascurato (conservativo).

Geometria asta:

$$l = \sqrt{2,5^2 + 1,2^2} = 2773 \text{ mm} \quad \theta = \arctan \frac{1,2}{2,5} = 25,64^\circ \quad \sin \theta = 0,4327 \quad (7)$$

Semi-apertura:

$$\frac{b}{2} = \frac{\sqrt{AR \cdot S}}{2} = \frac{\sqrt{6,9 \times 16,6}}{2} = 5,351 \text{ m} \quad (8)$$

Portanza semialare:

$$L_{semi} = \frac{nW}{2} = \frac{1,542 \times 7789,1}{2} = 6005 \text{ N} \quad (9)$$

Carico distribuito (ipotesi uniforme):

$$q = \frac{L_{semi}}{b/2} = \frac{6005}{5,351} = 1122 \text{ N/m} \quad (10)$$

Equilibrio momenti rispetto alla radice:

$$V_s = \frac{q(b/2)^2}{2x_s} = \frac{1122 \times 5,351^2}{2 \times 2,5} = 6426 \text{ N} \quad (11)$$

Forza assiale nell'asta:

$$F = \frac{V_s}{\sin \theta} = \frac{6426}{0,4327} = \mathbf{14.850 \text{ N}} \approx 14,85 \text{ kN} \quad (e=1 \rightarrow 14.430 \text{ N}, +2,9\%) \quad (12)$$

$$n = 1,542 \quad l = 2773 \text{ mm} \quad F = 14.850 \text{ N}$$

Parte I — Dimensionamento strutturale dell'asta

FASE A | Vincoli, lunghezza libera e snellezza limite

Entrambi gli estremi dell'asta sono forcelle con perno: **cerniere**.

$$\beta = 1,0 \quad \Rightarrow \quad l_0 = \beta l = 2773 \text{ mm}$$

| Grandezza | Simbolo | Valore | Unità |
|------------------------|------------|--------|-------------------|
| Carico di compressione | P | 14 850 | N |
| Lunghezza libera | l_0 | 2 773 | mm |
| Modulo elastico | E | 71 700 | N/mm ² |
| Tensione limite prop. | σ_p | 434 | N/mm ² |
| Coeff. sicurezza | k | 1,5 | — |
| Rapporto diametri | α | 0,9 | — |

Snellezza limite (soglia Eulero/compressione semplice):

$$\lambda_{\text{lim}} = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_p}} = \pi \sqrt{\frac{71700}{434}} = \pi \times 12,853 = \mathbf{40,38}$$

Poiché l'asta è snella per costruzione attesa $\lambda \gg \lambda_{\text{lim}}$: si applica la **formula di Eulero**.

FASE B | Momento d'inerzia minimo richiesto

Percorso *dimensionamento* (geometria incognita):

$$P_{cr} = k \cdot P = 1,5 \times 14\,850 = 22.275 \text{ N}$$

$$I_{\min} = \frac{l_0^2 \cdot k \cdot P}{\pi^2 E} = \frac{2773^2 \times 22\,275}{\pi^2 \times 71\,700} = \frac{1,713 \times 10^{11}}{707\,650} = 242.060 \text{ mm}^4$$

Perché I_{\min} è maggiore rispetto al caso $e = 1$?

Con $e = 0,9$: $F = 14.850 \text{ N} \Rightarrow I_{\min} = 242.060 \text{ mm}^4$.

Con $e = 1$: $F = 14.430 \text{ N} \Rightarrow I_{\min} = 235.100 \text{ mm}^4$.

Il +2,9% sul carico si riflette in un +2,9% su I_{\min} (la relazione è lineare in P). Nella Fase C vedremo come questo influenza la scelta del diametro esterno D .

FASE C | Dimensionamento della sezione trasversale

Sezione circolare cava (tubo estruso Al 7075-T6, rapporto $\alpha = d/D = 0,9$):

$$D = \left[\frac{64 I_{\min}}{\pi (1 - \alpha^4)} \right]^{1/4} = \left[\frac{64 \times 242\,060}{\pi \times 0,3439} \right]^{1/4} = [14\,345\,000]^{1/4} = 61,54 \text{ mm}$$

| | Calcolato | Adottato | Note |
|-----------------|-----------|----------|--------------------------------|
| D | 61,54 mm | 62 mm | Arrotondamento al mm superiore |
| $d = \alpha D$ | 55,8 mm | 56 mm | Arrotondamento al mm superiore |
| $t = (D - d)/2$ | — | 3 mm | Spessore di parete |

Proprietà geometriche della sezione adottata:

$$I_{\text{eff}} = \frac{\pi}{64}(D^4 - d^4) = \frac{\pi}{64}(62^4 - 56^4) = \frac{\pi}{64} \times 4\,941\,840 = 242.582 \text{ mm}^4 > 242.060 \text{ mm}^4 \checkmark \quad (13)$$

$$A = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) = \frac{\pi}{4} \times (3844 - 3136) = 556 \text{ mm}^2 \quad (14)$$

La sezione $D/d = 62/56 \text{ mm}$ è la *stessa* ottenuta con $e = 1$ (dove $I_{\text{min}} = 235.100 \text{ mm}^4$) perché l'arrotondamento al millimetro superiore assorbe la piccola differenza (+2,9% su I_{min}). Tuttavia, come vedremo in Fase D, il margine di sicurezza si riduce drasticamente: da 3,1% a soli 0,2%. Questo dimostra la sensibilità del risultato alla scelta di e .

FASE D | Verifica di stabilità euleriana

Raggio d'inerzia e snellezza:

$$\rho_{\text{min}} = \sqrt{\frac{I_{\text{eff}}}{A}} = \sqrt{\frac{242\,582}{556}} = 20,89 \text{ mm} \quad \lambda = \frac{l_0}{\rho_{\text{min}}} = \frac{2773}{20,89} = \mathbf{132,8}$$

$$\lambda = 132,8 \gg \lambda_{\text{lim}} = 40,38 \Rightarrow \text{corpo } \mathbf{snello} - \text{Eulero } \mathbf{valido} \checkmark$$

Carico critico e carico ammissibile:

$$P_{\text{cr}} = \frac{\pi^2 E I_{\text{eff}}}{l_0^2} = \frac{9,870 \times 71\,700 \times 242\,582}{2773^2} = 22.323 \text{ N}$$

$$P_{\text{amm}} = \frac{P_{\text{cr}}}{k} = \frac{22\,323}{1,5} = 14.882 \text{ N} \geq P = 14.850 \text{ N} \checkmark$$

$$MS = \frac{P_{\text{amm}}}{P} - 1 = \frac{14\,882}{14\,850} - 1 = \mathbf{0,22\%}$$

Il margine di sicurezza di **0,22%** è formalmente positivo (la struttura *regge*) ma praticamente trascurabile: qualsiasi tolleranza di lavorazione, eccentricità di carico o difetto superficiale potrebbe annullarlo.

In fase di **progetto reale** si dovrebbe salire al diametro commerciale successivo: $D = 64 \text{ mm}$, $d = 58 \text{ mm}$, $t = 3 \text{ mm}$, che darebbe $I_{\text{eff}} = 267.800 \text{ mm}^4$ e $MS \approx 7,0\%$, ben più accettabile.

In questa soluzione d'esame manteniamo $D = 62 \text{ mm}$ perché la formula è applicata correttamente e il risultato è *formalmente* soddisfacente.

FASE E | Peso dell'asta

$$G = \gamma_{Al} \cdot A \cdot l = 2,80 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3} \times 556 \text{ mm}^2 \times 2773 \text{ mm} = 4,32 \text{ kg}$$

(Identico al caso $e = 1$ poiché la sezione adottata è la stessa.)

| Grandezza | Simbolo | Valore | Verifica |
|-------------------|------------------|--------------|--|
| Diametro esterno | D | 62 mm | — |
| Diametro interno | d | 56 mm | — |
| Spessore parete | t | 3 mm | — |
| Lunghezza | l | 2773 mm | — |
| Snellezza | λ | 132,8 | $> \lambda_{\text{lim}} = 40,4 \checkmark$ |
| Carico ammiss. | P_{amm} | 14.882 N | $> P = 14.850 \text{ N} \checkmark$ |
| Margine sicurezza | MS | 0,22% | $> 0 \checkmark$ (al limite!) |
| Peso | G | 4,32 kg | — |

Parte II — Progetto del collegamento asta–longherone

Il principio della catena

Il carico che governa il dimensionamento di perno, forcetta e ribattini è il **carico di trazione massimo** $F = 14.850 \text{ N}$ (stesso modulo della compressione calcolata: approccio conservativo).

Step 1 | Verifica del perno — AISI 4130, $d_p = 13 \text{ mm}$ (DATO)

Step 1-A | Tensioni ammissibili

$$\sigma_{a,p} = \frac{R_{m,p}}{k} = \frac{880}{1,5} = 586,7 \text{ N/mm}^2 \quad \tau_{a,p} = 0,58 \sigma_{a,p} = 340,3 \text{ N/mm}^2$$

Step 1-B | Taglio in doppia sezione ($m = 2$)

Il perno attraversa: braccio sx – occhiello asta – braccio dx (due piani di taglio). Distribuzione di Jourawsky su sezione circolare: $\tau_{\max} = \frac{4}{3} \tau_{\text{med}}$:

$$\tau_{\max} = \frac{8F}{3\pi d_p^2} = \frac{8 \times 14850}{3\pi \times 13^2} = \frac{118800}{1592,8} = 74,6 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{\max} = 74,6 \text{ N/mm}^2 \ll \tau_{a,p} = 340,3 \text{ N/mm}^2 \quad MS = 356\% \checkmark$$

Il diametro minimo calcolato sarebbe $d_{p,\min} = \sqrt{8F/(3\pi\tau_{a,p})} = 6,1 \text{ mm}$; il valore 13 mm è adottato per ragioni costruttive (standard AN).

$$d_p = 13 \text{ mm (DATO) verificato: } \tau_{\max} = 74,6 \text{ N/mm}^2 \ll \tau_{a,p} \checkmark$$

Step 2 | Dimensionamento della forcetta — AISI 4130

Step 2-A | Tensioni ammissibili forcetta

Si assume lo stesso acciaio del perno (AISI 4130):

$$\sigma_{a,f} = 586,7 \text{ N/mm}^2 \quad \tau_{a,f} = 340,3 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{a,\text{deb}} = \min(\sigma_{a,p}, \sigma_{a,f}) = 586,7 \text{ N/mm}^2$$

Step 2-B | Spessore del braccio per schiacciamento (bearing)

Area resistente $A_1 = d_p \times s$:

$$p_s = \frac{F}{d_p \cdot s} \leq \sigma_{a,\text{deb}} \Rightarrow s \geq \frac{F}{d_p \sigma_{a,\text{deb}}} = \frac{14850}{13 \times 586,7} = 1,95 \text{ mm} \Rightarrow s = 2 \text{ mm}$$

Step 2-C | Diametro esterno dell'occhiello

$$D_{\text{occ}} = 2 d_p = 26 \text{ mm} \quad R = d_p = 13 \text{ mm} \quad r = \frac{d_p}{2} = 6,5 \text{ mm}$$

Step 2-D | Verifica a strappo B-B (con $s = 2 \text{ mm}$)

$$A_{BB} = (D_{\text{occ}} - d_p) \cdot s = 13 \times 2 = 26 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{BB} = \frac{F}{A_{BB}} = \frac{14850}{26} = 571,2 \text{ N/mm}^2 \leq \sigma_{a,f} = 586,7 \text{ N/mm}^2 \checkmark$$

Step 2-E | Verifica a taglio C-C' (con $s = 2 \text{ mm}$)

Corda della fascia laterale: $CC' = \sqrt{R^2 - r^2} = \sqrt{169 - 42,25} = 11,26 \text{ mm}$

Distribuzione parabolica su sezione rettangolare: $\tau_{\max} = \frac{3}{2}\tau_{\text{med}}$:

$$\tau_{CC'} = \frac{1,5 F}{2 CC' \cdot s} = \frac{1,5 \times 14850}{2 \times 11,26 \times 2} = 494,6 \text{ N/mm}^2 > \tau_{a,f} = 340,3 \text{ N/mm}^2 \quad \times \text{ NON OK}$$

La verifica a taglio C-C' **non è soddisfatta** con $s = 2 \text{ mm}$. La sezione C-C' è la **condizione dimensionante** della forcella. Si impone $\tau_{CC'} \leq \tau_{a,f}$ e si ricava il nuovo spessore:

$$s_{\min} = \frac{1,5 F}{2 CC' \cdot \tau_{a,f}} = \frac{1,5 \times 14850}{2 \times 11,26 \times 340,3} = 2,91 \text{ mm} \Rightarrow \boxed{s = 3 \text{ mm}}$$

Verifiche finali con $s = 3 \text{ mm}$ (spessore di ciascun braccio: $s/2 = 1,5 \text{ mm}$):

| Modo | Formula | Risultato |
|-------------|--|--|
| Bearing | $p_s = \frac{F}{d_p \cdot s} = \frac{14850}{13 \times 3}$ | $380,8 \text{ N/mm}^2 \leq 586,7 \quad \checkmark$ |
| Strappo B-B | $\sigma_{BB} = \frac{F}{(D_{\text{occ}} - d_p) \cdot s} = \frac{14850}{13 \times 3}$ | $380,8 \text{ N/mm}^2 \leq 586,7 \quad \checkmark$ |
| Taglio C-C' | $\tau_{CC'} = \frac{1,5 F}{2 CC' \cdot s} = \frac{22275}{67,56}$ | $329,8 \text{ N/mm}^2 \leq 340,3 \quad \checkmark$ |

$s = 3 \text{ mm}$ (luce interna); spessore di ciascun braccio = $1,5 \text{ mm}$.
 $D_{\text{occ}} = 26 \text{ mm}$; $R = 13 \text{ mm}$; $r = 6,5 \text{ mm}$.
Condizione dimensionante: taglio C-C' ($\tau = 329,8 \text{ N/mm}^2$, margine solo $3,1\%$).

Step 3 | Dimensionamento dei ribattini asta-terminale

Step 3-A | Tensioni ammissibili

Materiale: Al 7075-T6 (stessa lega dell'asta, approccio conservativo):

$$\sigma_{a,r} = \frac{R_m}{k} = \frac{510}{1,5} = 340 \text{ N/mm}^2 \quad \tau_{a,r} = 0,58 \times 340 = 197,2 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{a,a} = 340 \text{ N/mm}^2$$

Step 3-B | Scelta del diametro del rivetto

La regola guida $d_r \approx 4t \div 6t$ è calibrata per lamiere sottili ($t \lesssim 1 \text{ mm}$) ed è fuori dal suo campo di validità per $t = 3 \text{ mm}$: darebbe $12 \div 18 \text{ mm}$, diametri non disponibili nei cataloghi di rivetti solidi standard. In questi casi si sceglie d_r direttamente dal **catalogo MS 20470 (= AN 470)**, riportato nel manuale, che prevede diametri in frazioni di pollice fino a $3/8 \text{ in} = 9,53 \text{ mm}$.

Si adotta il diametro massimo di catalogo:

$$d_r = \frac{3}{8} \text{ in} = 9,53 \text{ mm} \quad A_r = \frac{\pi d_r^2}{4} = \frac{\pi \times 9,53^2}{4} = 71,33 \text{ mm}^2$$

Step 3-C | Numero per taglio (ogni rivetto: $m_r = 2$ sezioni di taglio)

$$n_{\text{tag}} \geq \left\lceil \frac{2F}{\pi d_r^2 \tau_{a,r}} \right\rceil = \left\lceil \frac{2 \times 14\,850}{\pi \times 9,53^2 \times 197,2} \right\rceil = \left\lceil \frac{29\,700}{56\,266} \right\rceil = \lceil 0,528 \rceil = 1$$

Step 3-D | Numero per ovalizzazione (bearing parete asta)

$$n_{\text{oval}} \geq \left\lceil \frac{F}{2 d_r t \sigma_{a,a}} \right\rceil = \left\lceil \frac{14\,850}{2 \times 9,53 \times 3 \times 340} \right\rceil = \left\lceil \frac{14\,850}{19\,441} \right\rceil = \lceil 0,764 \rceil = 1$$

Step 3-E | Adozione

$$n = \max(n_{\text{tag}}, n_{\text{oval}}) = \max(1, 1) = 1 \quad \Rightarrow \quad \text{adotto } \boxed{n = 4} \quad (2 \text{ coppie simmetriche})$$

Verifiche finali con $n = 4$, $d_r = 9,53 \text{ mm}$:

$$\tau = \frac{F}{n \cdot 2 \cdot A_r} = \frac{14\,850}{4 \times 2 \times 71,33} = 26,0 \text{ N/mm}^2 \leq \tau_{a,r} = 197,2 \text{ N/mm}^2 \quad \checkmark \quad MS = 658\% \quad (15)$$

$$p_s = \frac{F}{n \cdot 2 \cdot d_r \cdot t} = \frac{14\,850}{4 \times 2 \times 9,53 \times 3} = 64,9 \text{ N/mm}^2 \leq \sigma_{a,a} = 340 \text{ N/mm}^2 \quad \checkmark \quad MS = 424\% \quad (16)$$

$n = 4$ rivetti $3/8 \text{ in}$ (MS 20470), $d_r = 9,53 \text{ mm}$, disposti a 2 coppie simmetriche. Condizione dimensionante: **ovalizzazione** ($p_s = 64,9 \text{ N/mm}^2$). Il diametro è scelto da catalogo, non dal criterio $4t \div 6t$.

Riepilogo finale e confronto $e = 1$ vs $e = 0,9$

| Componente | Grandezza | Valore | Verifica |
|------------|----------------|----------------------------|---|
| Asta | $D/d/t$ | 62 / 56 / 3 mm | — |
| | l | 2773 mm | — |
| | λ | 132,8 | $> \lambda_{lim} = 40,4 \checkmark$ |
| | P_{amm} | 14.882 N | $> P = 14.850 \text{ N} \checkmark$ |
| | MS | 0,22% | $> 0 \checkmark$ (al limite!) |
| Perno | d_p | 13 mm (DATO) | $\tau_{max} = 74,6 \text{ N/mm}^2 \ll \tau_a \checkmark$ |
| Forcella | s, D_{occ} | 3 mm, 26 mm | $\tau_{CC'} = 329,8 \text{ N/mm}^2 \leq 340,3 \checkmark$ |
| | braccio $s/2$ | 1,5 mm | — |
| Ribattini | $n \times d_r$ | $4 \times 9,53 \text{ mm}$ | $\tau, p_s \leq \tau_a, \sigma_a \checkmark$ |

| Grandezza | $e = 1$ | $e = 0,9$ | Δ |
|------------------------------|--------------|----------------------------|--------------------|
| $C_{L,opt}$ | 0,675 | 0,640 | -5,2% |
| V_E (m/s) | 40,47 | 41,55 | +2,7% |
| Fattore di carico n | 1,496 | 1,542 | +3,1% |
| Forza asta F (N) | 14 430 | 14 850 | +2,9% |
| I_{min} (mm ⁴) | 235 100 | 242 060 | +3,0% |
| Sezione $D/d/t$ | 62/56/3 | 62/56/3 | uguale (arroton.) |
| MS sull'asta | 3,1% | 0,22% | — |
| Forcella s | 3 mm | 3 mm | uguale |
| Rivetti $n \times d_r$ | 4×4 | $4 \times 9,53 \text{ mm}$ | diverso (catalogo) |

Conclusione: il +3% sul carico non cambia la geometria del tubo (l'arrotondamento al mm lo assorbe), ma riduce quasi a zero il margine di stabilità. In dimensionamento euleriano, la dipendenza di I_{min} dal carico è *lineare*, ma la sezione commerciale fornisce incrementi *discreti*. Piccole variazioni del carico possono portare da MS confortevole (3%) a marginale (0,2%) senza

cambiare la sezione, o richiedere un salto di diametro.

Commento critico alla soluzione

- 1. La condizione dimensionante dell'asta è il carico di punta.** $\lambda = 132,8 \gg \lambda_{\text{lim}} = 40,4$: il cedimento sarebbe per instabilità euleriana, mai per superamento della resistenza.
- 2. Il margine $MS = 0,22\%$ segnala la necessità di una rivalutazione progettuale.** Con $D = 64 \text{ mm}$, $d = 58 \text{ mm}$ (stesso $t = 3 \text{ mm}$): $I_{\text{eff}} \approx 267.800 \text{ mm}^4$, $MS \approx 7\%$. È la scelta consigliata per produzione reale.
- 3. Nel collegamento la condizione dimensionante è il taglio C-C'.** Anche con il carico aumentato del 3%, lo spessore $s = 3 \text{ mm}$ rimane adeguato, ma con margine ridottissimo (3,1% su $\tau_{CC'}$).
- 4. Il perno da 13 mm è molto sovradimensionato** in entrambi i casi ($MS > 350\%$): la sua scelta risponde a criteri costruttivi (standard AN, facilità di smontaggio, resistenza a fatica).