

Dimensionamento completo dell'asta di controventatura

Instabilità euleriana • Sezione resistente
Collegamento al longherone: perno, forcella, ribattini

Costruzioni Aeronautiche — Classe 4ACA
Anno scolastico 2024/25

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

Indice

1	Introduzione: l’asta di controventatura nell’ala	2
I	Dimensionamento strutturale dell’asta	3
2	Quando si applica la teoria del carico di punta?	3
2.1	Il rapporto di snellezza	3
2.2	La snellezza limite λ_{lim}	3
2.3	Valori tipici di λ_{lim} per materiali aeronautici	4
2.4	Raccogliere i dati numerici	5
2.5	Identificare i vincoli e calcolare l_0	5
2.6	Scegliere il percorso: dimensionamento o verifica	6
2.7	La formula di Eulero — forma diretta e invertita	7
2.8	Sezione circolare cava	8
2.9	Sezione ellittica cava	9
2.10	Schema riassuntivo della Parte I	12
II	Progetto del collegamento asta–longherone	14
3	Il collegamento come problema autonomo	14
4	Modalità di cedimento — panoramica generale	15
4.1	Calcolo delle tensioni ammissibili — regola comune a tutti gli Step	15
4.2	Step 1-A Raccogliere i dati e calcolare $\sigma_{a,p}$ e $\tau_{a,p}$	16
4.3	Step 1-B Dimensionamento a taglio — calcolo di d_p	16
4.4	Step 2-A Raccogliere i dati e calcolare $\sigma_{a,f}$ e $\tau_{a,f}$	17
4.5	Step 2-B Spessore del braccio per schiacciamento (<i>bearing</i>)	17
4.6	Step 2-C Diametro esterno dell’occhiello	18
4.7	Step 2-D Verifica a strappo — sezione B-B	18
4.8	Step 2-E Verifica a taglio — sezione C-C’	19
4.9	Step 3-A Tensioni ammissibili	20
4.10	Step 3-B Scelta del diametro del rivetto	20
4.11	Step 3-C Numero minimo di ribattini per taglio	20
4.12	Step 3-D Numero minimo di ribattini per ovalizzazione	20
4.13	Step 3-E Adozione e verifiche finali	20
5	Schema riassuntivo della Parte II	21

1 Introduzione: l'asta di controventatura nell'ala

Nei velivoli ad ala alta controventata (come il Piper PA-18 *Super Cub*, il Cessna 152 o gran parte degli ultraleggeri), l'ala non è in grado, da sola, di resistere ai carichi flessionali prodotti dalla portanza: è necessario un sistema di **controventatura esterna** che colleghi la parte inferiore della fusoliera alla zona di mezzeria o al terzo medio dell'ala.

Questo sistema è composto da una o più **aste di controvento** (*struts* o *jury struts*), elementi strutturali rettilinei e snelli che lavorano prevalentemente a **compressione** o **trazione** in funzione della condizione di volo.



Figura 1: Piper PA-18 Super Cub: si noti l'asta di controventatura e dei vincoli: cerniera lato fusoliera, cerniera lato longherone.

Perché un'asta snella in compressione è pericolosa?

Un'asta corta e tozza sottoposta a compressione cede perché il materiale supera la tensione di rottura: il cedimento è governato dalla resistenza del materiale. Un'asta lunga e sottile, invece, può cedere *molto prima* di raggiungere quella tensione: si inflette lateralmente in modo improvviso e catastrofico. Questo fenomeno si chiama **instabilità euleriana** (o *buckling*) ed è governato non dalla resistenza ma dalla **rigidezza** del materiale, cioè dal modulo di elasticità E .

In campo aeronautico, dove le strutture sono progettate per essere il più leggere possibile, le aste sono inevitabilmente *snelle*: il carico di punta è sempre la condizione dimensionante.

Il presente documento vi guida, in modo completo e autosufficiente, attraverso *tutte le fasi* del dimensionamento dell'asta di controventatura:

- 1. Parte I — Dimensionamento dell'asta** (Fasi A–E): si determina la sezione trasversale dell'asta affinché resista al carico di punta secondo il metodo di Eulero.
- 2. Parte II — Progetto del collegamento** (Steps 1–3): si dimensionano il *perno*, la *forcella* e i *ribattini* che connettono l'asta al longherone alare.

Le due parti sono concettualmente distinte ma fisicamente inseparabili: un'asta perfettamente dimensionata è inutile se il suo attacco al longherone cede prima di lei.

Parte I

Dimensionamento strutturale dell'asta

2 Quando si applica la teoria del carico di punta?

Prima di iniziare qualsiasi calcolo, è necessario capire *quale tipo di cedimento* governa il nostro elemento. Il discriminante è il **rapporto di snellezza** λ .

2.1 Il rapporto di snellezza

Ogni elemento compresso è caratterizzato da un parametro adimensionale che misura quanto esso è “lungo e sottile” rispetto alla propria sezione:

$$\boxed{\lambda = \frac{l_0}{\rho_{\min}}} \quad \text{con} \quad \rho_{\min} = \sqrt{\frac{I_{\min}}{A}} \quad (1)$$

dove:

- l_0 è la **lunghezza libera d'inflessione** (vedremo come calcolarla);
- ρ_{\min} è il **raggio d'inerzia minimo** della sezione, in mm;
- I_{\min} è il momento d'inerzia minimo baricentrico, in mm⁴;
- A è l'area della sezione trasversale, in mm².

Il significato fisico è intuitivo: λ grande significa asta “snella” (lunga rispetto alla sezione), λ piccolo significa corpo “tozzo” (corto e massiccio).

2.2 La snellezza limite λ_{\lim}

Esiste un valore di soglia, λ_{\lim} , che separa due regimi di cedimento completamente diversi. Lo si calcola imponendo che la tensione critica di Eulero σ_{cr} eguagli la tensione al limite di proporzionalità σ_p del materiale (il punto oltre il quale il diagramma σ - ε cessa di essere lineare):

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda_{\lim}^2} = \sigma_p \quad \Rightarrow \quad \boxed{\lambda_{\lim} = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_p}}} \quad (2)$$

Significato fisico di λ_{\lim}

λ_{\lim} è la snellezza per cui la formula di Eulero predice una tensione critica σ_{cr} esattamente uguale a σ_p . Per $\lambda < \lambda_{\lim}$, la formula di Eulero darebbe $\sigma_{cr} > \sigma_p$: ma ciò è *fisicamente impossibile*, perché il materiale avrebbe già ceduto plasticamente prima di raggiungere quella tensione. In altre parole, **Eulero è valido solo nel campo elastico** ($\sigma \leq \sigma_p$), cioè solo quando $\lambda \geq \lambda_{\lim}$.

Il confronto tra λ calcolato e λ_{\lim} determina quale formula usare:

Condizione	Regime	Formula
$\lambda < \lambda_{\text{lim}}$	Corpo tozzo: il cedimento avviene per superamento della tensione ammissibile. La sezione è insufficiente a resistere allo sforzo normale di compressione.	$\sigma = P/A \leq \sigma_{\text{amm}}$
$\lambda \geq \lambda_{\text{lim}}$	Corpo snello: il cedimento avviene per instabilità elastica <i>prima</i> che la tensione raggiunga σ_p . È obbligatorio applicare il metodo di Eulero.	Formula di Eulero

2.3 Valori tipici di λ_{lim} per materiali aeronautici

Materiale	E [N/mm ²]	σ_p [N/mm ²]	λ_{lim}
Acciaio comune	206 000	200	≈ 101
Al 2024-T4 (Avional)	73 100	324	≈ 47
Al 7075-T6 (Ergal)	71 700	503	≈ 38

Le strutture aeronautiche snelle (aste di controvento, comandi rigidi di volo) presentano tipicamente $\lambda \gg \lambda_{\text{lim}}$: **Eulero è sempre il metodo corretto.**

FASE A | Dati del problema e scelta del percorso

In questa fase si raccolgono tutti i dati numerici, si identifica il tipo di vincolo e si calcola la lunghezza libera d'inflessione l_0 . Si stabilisce inoltre se il problema richiede un *dimensionamento* (progetto) o una *verifica*.

2.4 Raccogliere i dati numerici

Prima di qualsiasi calcolo, è buona norma costruire una tabella ordinata con tutte le grandezze note.

Grandezza	Simbolo	Unità	Note
Carico esterno di compressione	P	N	Dato del problema
Lunghezza geometrica dell'asta	l	mm	Dato del problema
Modulo di elasticità	E	N/mm ²	Proprietà del materiale
Tensione di rottura / snervamento	R_s o $R_{p0,2}$	N/mm ²	Proprietà del materiale
Coefficiente di sicurezza	k	—	$k = 1,5$ per strutture aeronautiche
Tipo di sezione	—	—	Circolare cava, ellittica cava, ...
Rapporto diametri (o semiassi)	$\alpha = d/D$	—	Fissato dal progettista (es. 0,80 ÷ 0,95)

2.5 Identificare i vincoli e calcolare l_0

La **lunghezza libera d'inflessione** l_0 è la grandezza chiave della teoria di Eulero:

$$l_0 = \beta l \quad (3)$$

Caso	Vincoli	β	l_0	Applicazione aeronautica
(a)	Cerniera–Cerniera	1,0	l	Aste di controvento alare (forcelle ai due estremi)
(b)	Incastro–Libero	2,0	$2l$	Elemento a sbalzo senza vincolo all'apice
(c)	Incastro–Cerniera	0,7	$0,7l$	Aste con piede incastrato e testa su cerniera
(d)	Incastro–Incastro	0,5	$0,5l$	Caso più vantaggioso: la lunghezza efficace si dimezza

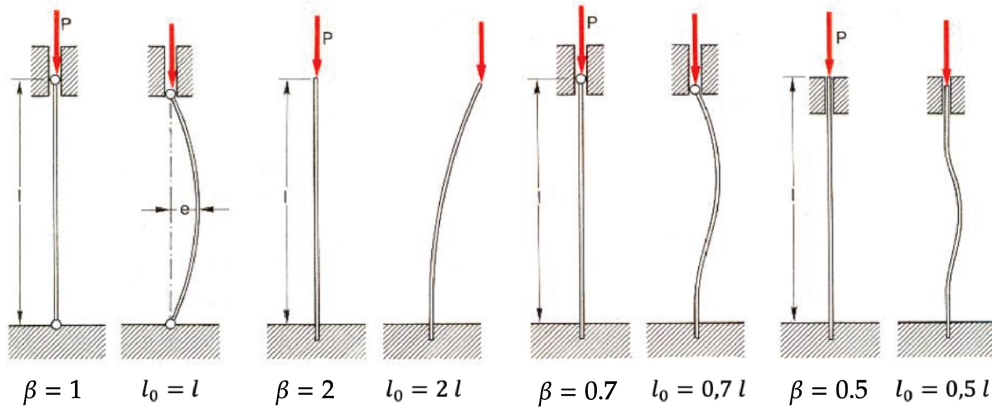


Figura 2: Lunghezza libera di inflessione: i valori di β – coefficiente di vincolo.

Perché l’asta di controvento è cerniera–cerniera?

L’asta di controvento è collegata alla fusoliera e al longherone mediante *forcelle con perno* (clevis & pin). Un perno cilindrico in un foro consente la rotazione relativa ma impedisce la traslazione: è, per definizione, una cerniera. Pertanto $\beta = 1$ e $l_0 = l$.

2.6 Scegliere il percorso: dimensionamento o verifica

Percorso	Cosa si conosce	Formula di partenza
Dimensionamento (progetto)	P, l, E, k — la geometria è incognita	$P_{cr} = k \cdot P$
Verifica	P, l, E, k e la geometria completa (nota)	$P_{cr} = \frac{\pi^2 E I_{min}}{l_0^2}$ e si verifica $P \leq P_{cr}/k$

△! Attenzione

Scegliere un solo percorso e **non cambiarlo a metà calcolo**. Il coefficiente $k = 1,5$ garantisce un margine di sicurezza del 50% sul carico critico.

FASE B | Calcolo del momento d'inerzia minimo richiesto

Applicando la formula di Eulero in forma invertita, si ricava il valore minimo di I_{\min} che la sezione deve possedere per garantire stabilità.

2.7 La formula di Eulero — forma diretta e invertita

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E I_{\min}}{l_0^2} \quad (4)$$

$$I_{\min} = \frac{l_0^2 \cdot P_{cr}}{\pi^2 \cdot E} = \frac{l_0^2 \cdot k \cdot P}{\pi^2 \cdot E} \quad (5)$$

Quattro osservazioni fondamentali sulla formula di Eulero

1. I_{\min} governa la direzione di cedimento.
2. Il carico critico non dipende dalla resistenza del materiale (R_s , $R_{p0,2}$), ma esclusivamente dal modulo elastico E .
3. Le sezioni cave sono ottimali. A parità di area A , massimizzano I_{\min} .
4. Sezioni con $I_x \approx I_y$ sono preferibili.

Risultato di Fase B: $I_{\min} = \frac{l_0^2 \cdot k \cdot P}{\pi^2 \cdot E}$ [mm⁴] \rightarrow porta in Fase C.

FASE C | Dimensionamento della sezione trasversale

Noto I_{\min} , si sceglie la forma della sezione e si ricavano le dimensioni geometriche imponendo che il momento d'inerzia geometrico eguagli il valore richiesto dalla Fase B.

- **Sezione circolare cava:** aste dei comandi rigidi di volo.
- **Sezione ellittica cava:** aste di controvento alare (profilo a bassa resistenza aerodinamica).

2.8 Sezione circolare cava

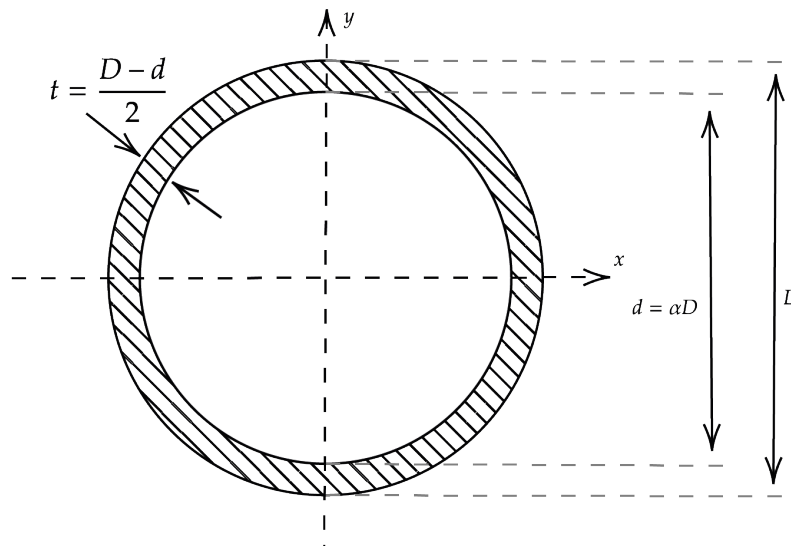


Figura 3: Sezione circolare cava: corona circolare con diametro esterno D , diametro interno $d = \alpha D$, spessore parete $t = (D - d)/2$.

Geometria. Diametro esterno D , interno $d = \alpha D$, con $\alpha \in [0,80; 0,95]$.

$$I_x = I_y = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4) = \frac{\pi}{64} D^4 (1 - \alpha^4) \tag{6}$$

$$\boxed{D = \sqrt[4]{\frac{64 I_{\min}}{\pi (1 - \alpha^4)}}} \quad A = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \tag{7}$$

2.9 Sezione ellittica cava

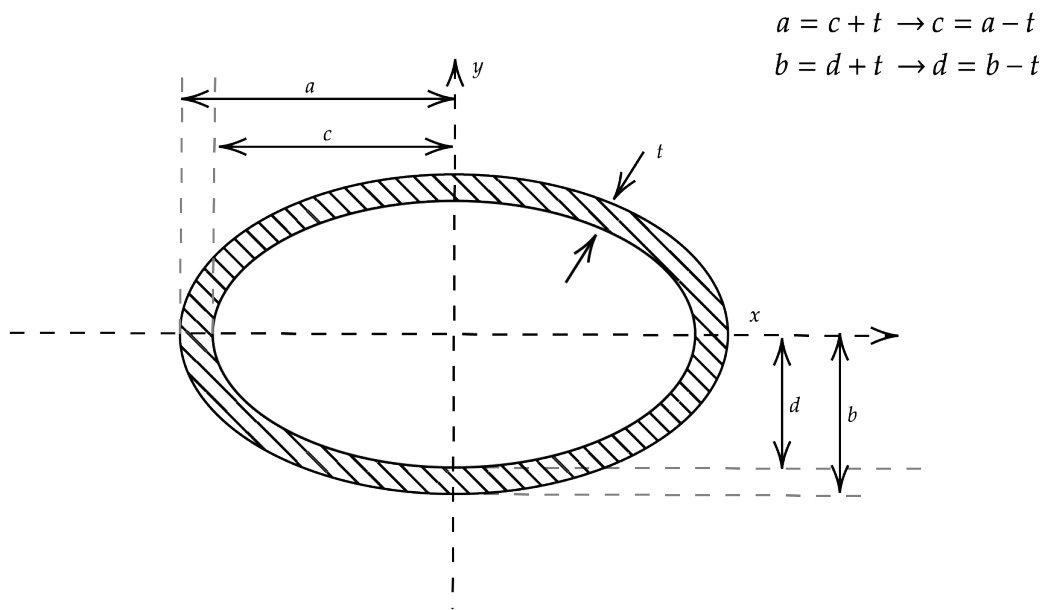


Figura 4: Sezione ellittica cava: semiassi esterni a, b ; semiassi interni $c = a - t, d = b - t$; spessore uniforme t .

$$I_x = 0,7854 (a^3 b - c^3 d) \tag{8}$$

$$I_y = 0,7854 (b^3 a - d^3 c) \tag{9}$$

$I_{\min} = \min(I_x, I_y)$. **Area:** $A = \pi (ab - cd)$

△! Attenzione

Arrotondare **sempre** le dimensioni al millimetro superiore.

FASE D | Verifica della stabilità e rapporto di snellezza

La verifica serve a confermare che il dimensionamento è corretto e che l'uso della formula di Eulero è legittimo.

$$\lambda = \frac{l_0}{\rho_{\min}} \quad \text{con} \quad \rho_{\min} = \sqrt{\frac{I_{\min, \text{eff}}}{A}} \quad (10)$$

Qui $I_{\min, \text{eff}} = \min(I_x, I_y)$ è il momento d'inerzia **della sezione effettivamente adottata** (quella ricavata in Fase C), rispetto all'asse di instabilità.

Se $\lambda \geq \lambda_{\text{lim}}$ (corpo snello, Eulero valido):

$$P \leq \frac{P_{cr}}{k} = \frac{\pi^2 E I_{\min, \text{eff}}}{k l_0^2} \quad (11)$$

FASE E | Confronto tra materiali e peso dell'asta (facoltativa)

Si calcola il peso dell'asta e, se richiesto, si confronta con quello di un'asta equivalente in un materiale diverso.

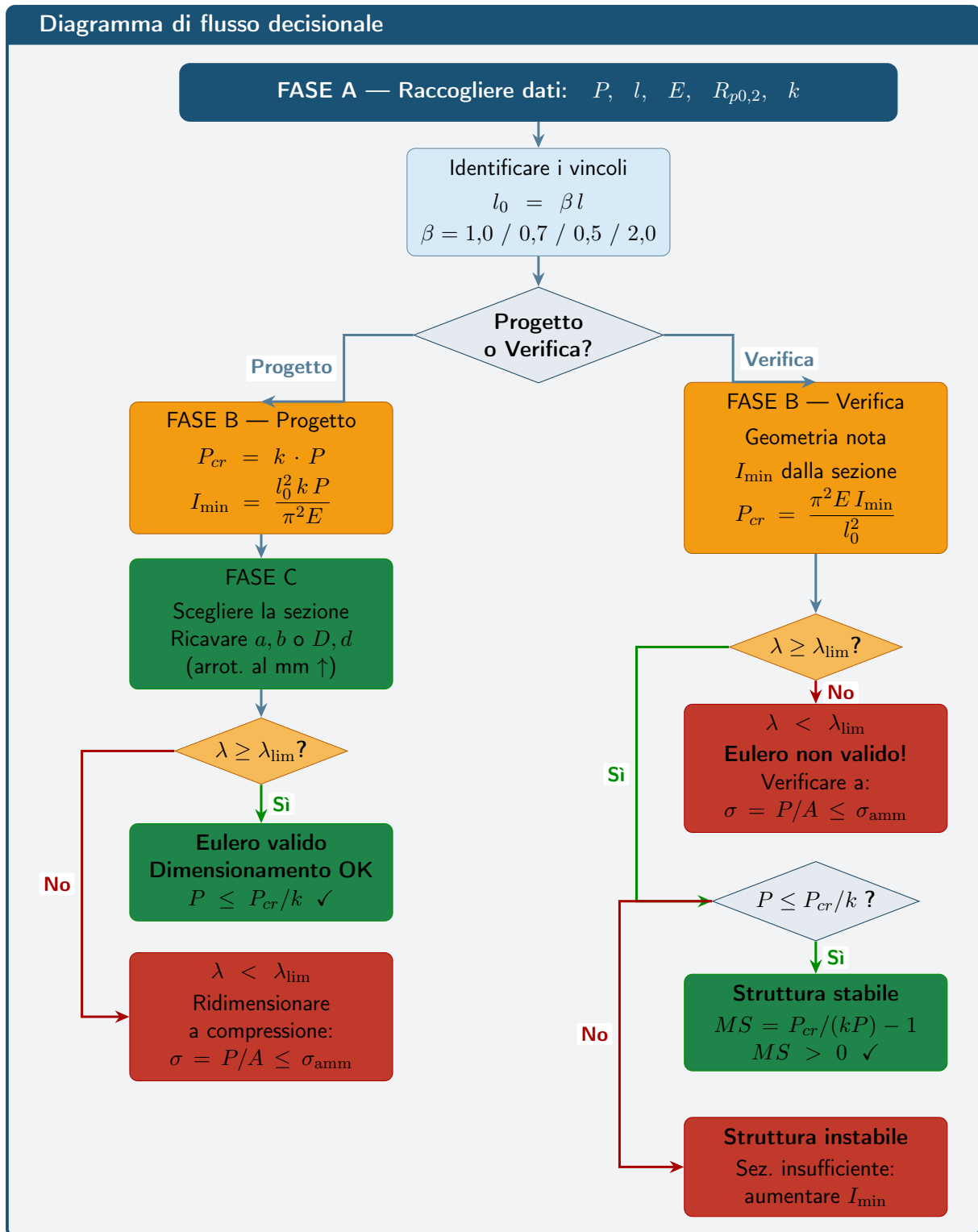
$$A = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2), \quad V = A \cdot l, \quad G = \gamma \cdot V \quad (12)$$

$$\frac{G_{Al}}{G_{Ac}} = \frac{\gamma_{Al}}{\gamma_{Ac}} \cdot \sqrt{\frac{E_{Ac}}{E_{Al}}} \approx \frac{2,78}{7,85} \cdot \sqrt{\frac{206\,000}{73\,100}} \approx 0,59 \quad (13)$$

A parità di P_{cr} e l_0 : l'alluminio 2024-T4 pesa circa il 40% in meno dell'acciaio.

2.10 Schema riassuntivo della Parte I

Fase	Cosa si calcola	Formula chiave	Risultato
A	Vincoli $\rightarrow l_0$; scelta percorso	$l_0 = \beta l; P_{cr} = kP$	l_0, P_{cr}
B	I_{\min} richiesto	$I_{\min} = \frac{l_0^2 k P}{\pi^2 E}$	I_{\min} [mm ⁴]
C	Dimensioni sezione	$D = \sqrt[4]{\frac{64 I_{\min}}{\pi(1 - \alpha^4)}}$	D, d [mm]
D	Snellezza + verifica	$\lambda = l_0/\rho_{\min}; P \leq P_{cr}/k$	λ ; esito
E	Peso + confronto (opz.)	$G = \gamma \cdot A \cdot l$	G [kg]



Parte II

Progetto del collegamento asta-longherone

3 Il collegamento come problema autonomo

Una volta dimensionata l'asta strutturale (Parte I), è necessario progettare il suo **collegamento al longherone** dell'ala. Il collegamento è realizzato mediante un sistema **forcella con perno** (*clevis & pin*).

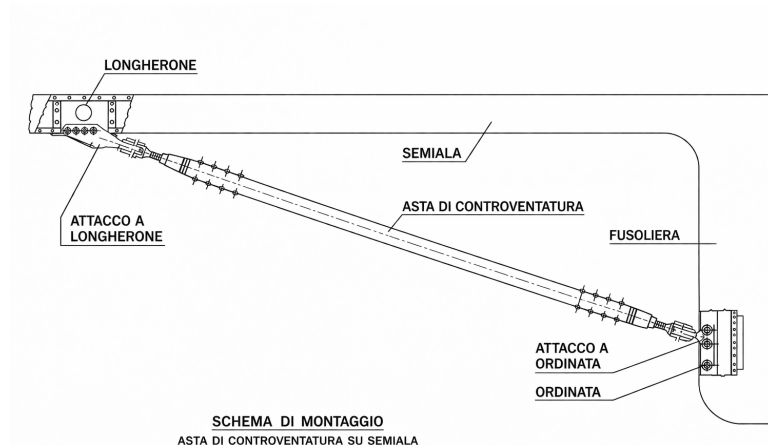


Figura 5: Asta di controventatura – Schema di montaggio.

Il principio della catena: il collegamento non deve essere l'anello debole

Il principio cardine di progetto è che **il collegamento non deve cedere prima dell'asta**. Ignorare anche una sola modalità di cedimento rende il calcolo non conservativo.

Step	Elemento	Cosa si dimensiona	Output → Step successivo
1	Perno (<i>pin</i>)	Diametro d_p — taglio in doppia sezione	d_p entra nello Step 2
2	Forcella (<i>clevis</i>)	Spessore braccio s , diametro esterno D ; verifica strappo e taglio	s, D, r, R entrano nello Step 3 (indirettamente)
3	Ribattini (<i>rivets</i>)	Numero minimo n a parità di d_r scelto; verifica taglio e ovalizzazione	—

Quale carico governa il collegamento?

Il sistema perno–forcella–ribattini è dimensionato sul **carico di trazione massimo** $F = F_t$, che è il più gravoso per questi elementi.

4 Modalità di cedimento — panoramica generale

N.	Elemento	Modalità	Descrizione fisica
1	Perno	Taglio	Il gambo del perno viene reciso nelle sezioni di interfaccia.
2	Perno/Forcella	Schiacciamento (<i>bearing</i>)	Il perno preme lateralmente sul foro della forcella.
3	Forcella	Strappo (B-B)	I bracci cedono per trazione nella sezione netta perpendicolare a F .
4	Forcella	Taglio (C-C')	Le fasce laterali dell'occhiello cedono per taglio parallelo a F .
5	Ribattini	Taglio	Il gambo del rivetto viene reciso nelle sezioni di interfaccia.
6	Parete asta	Ovalizzazione (<i>bearing</i>)	Il gambo del rivetto deforma il foro in forma ellittica.

4.1 Calcolo delle tensioni ammissibili — regola comune a tutti gli Step

$$\sigma_a = \frac{R_s}{k} \quad \tau_a = 0,58 \sigma_a = \frac{0,58 R_s}{k} \quad (14)$$

Fattori 4/3 e 3/2 — la distribuzione parabolica di Jourawsky

- **Sezione circolare** (perno): $\tau_{\max} = \frac{4}{3} \tau_{\text{med}}$
- **Sezione rettangolare** (fasce dell'occhiello): $\tau_{\max} = \frac{3}{2} \tau_{\text{med}}$

Step 1 | Dimensionamento del perno

Il perno lavora a **taglio in doppia sezione**. Il diametro d_p è ingresso obbligatorio per lo Step 2.

4.2 Step 1-A | Raccogliere i dati e calcolare $\sigma_{a,p}$ e $\tau_{a,p}$

$$\sigma_{a,p} = \frac{R_{s,p}}{k} \quad \tau_{a,p} = 0,58 \sigma_{a,p}$$

4.3 Step 1-B | Dimensionamento a taglio — calcolo di d_p

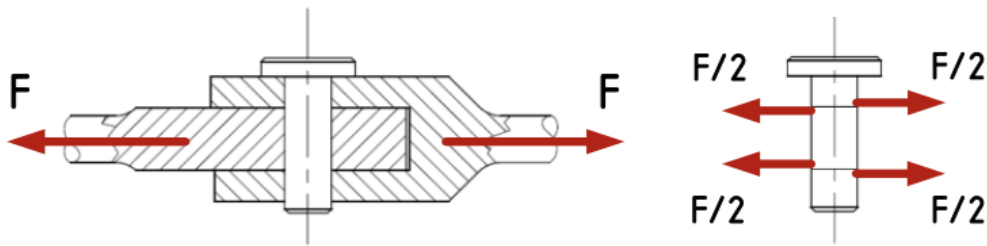


Figura 6: Verifica a tranciamento del perno e suo dimensionamento.

Il perno traversa: braccio sinistro forcella — occhiello asta — braccio destro forcella. Si generano **due piani di taglio** ($m = 2$). La distribuzione di Jourawsky sulla sezione circolare dà $\tau_{\max} = \frac{4}{3} \tau_{\text{med}}$:

$$\tau_{\max} = \frac{4}{3} \frac{F}{2 \frac{\pi d_p^2}{4}} = \frac{8F}{3\pi d_p^2} \leq \tau_{a,p} \quad (15)$$

$$d_p \geq \sqrt{\frac{8F}{3\pi \tau_{a,p}}} \quad (16)$$

Risultato Step 1-B: d_p [mm], $\tau_{\max} \leq \tau_{a,p}$ ✓
 d_p entra come dato nello Step 2.

Step 2 | Dimensionamento della forcella

Si dimensionano nell'ordine: lo **spessore del braccio** s (da schiacciamento), il **diametro esterno** D dell'occhiello (regola geometrica), e si verificano le sezioni a **strappo** (B-B) e a **taglio** (C-C').

4.4 Step 2-A | Raccogliere i dati e calcolare $\sigma_{a,f}$ e $\tau_{a,f}$

$$\sigma_{a,f} = \frac{R_{s,f}}{k} \qquad \tau_{a,f} = 0,58 \sigma_{a,f}$$

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

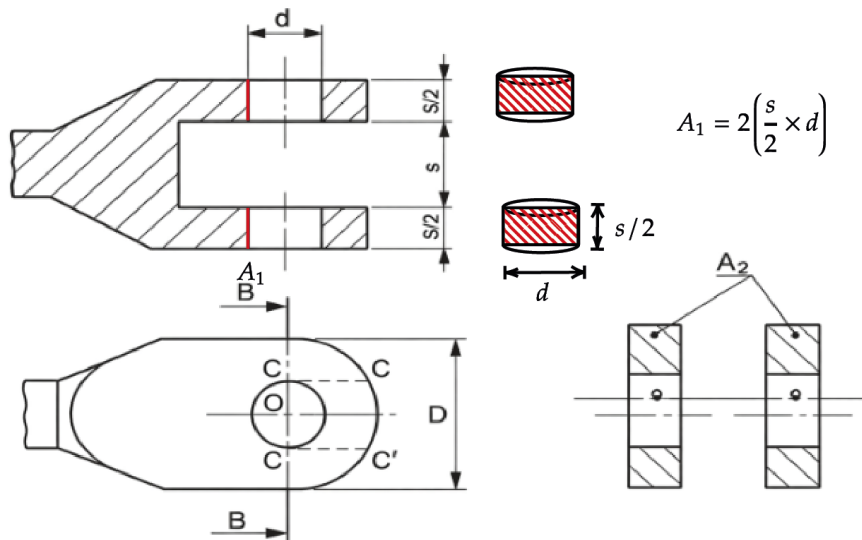


Figura 7: Verifica a schiacciamento del perno e dimensionamento dello spessore della forcella.

Il perno preme sulla parete interna del foro della forcella. L'area resistente a schiacciamento per ciascun braccio è

$$A_1 = \frac{s}{2} \times d_p + \frac{s}{2} \times d_p = d_p \times s.$$

La pressione specifica si pone uguale alla tensione ammissibile del **componente più debole** tra perno e forcella:

$$p_s = \frac{F}{d_p \cdot s} \leq \sigma_{a,deb} \quad \Rightarrow \quad \boxed{s \geq \frac{F}{d_p \sigma_{a,deb}}} \qquad (17)$$

Arrotondare s al millimetro superiore.

Quale tensione ammissibile usare per lo schiacciamento?

Il cedimento avviene sul componente che raggiunge per primo il proprio limite:

$$\sigma_{a,deb} = \min(\sigma_{a,p}, \sigma_{a,f}).$$

Se il perno è in acciaio comune e la forcella in acciaio ad alta resistenza, $\sigma_{a,deb} = \sigma_{a,p}$.

Risultato Step 2-B: s [mm] (s [mm] – luce interna della forcella; spessore di ciascun braccio = $s/2$).

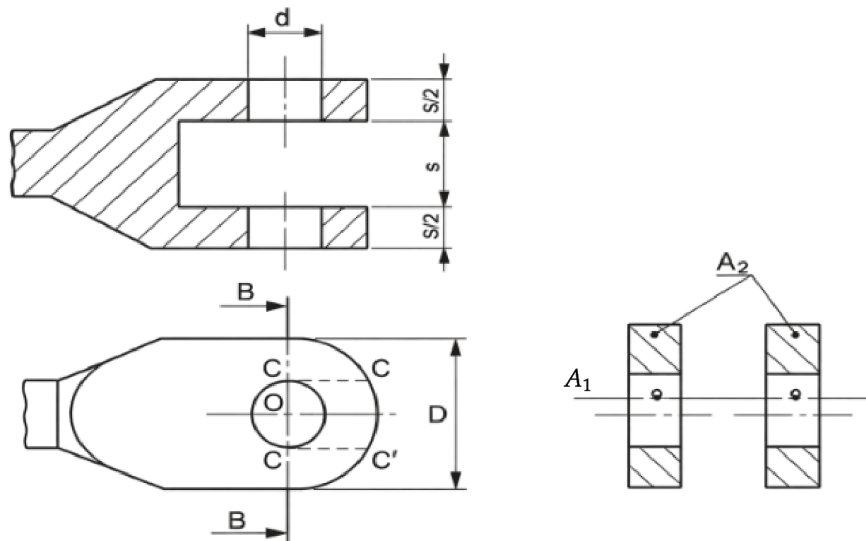


Figura 8: Schema della forcella e delle sezioni.

4.6 Step 2-C | Diametro esterno dell'occhiello

$$\boxed{D = 2 d_p} \quad \Rightarrow \quad R = \frac{D}{2} = d_p, \quad r = \frac{d_p}{2} \quad (18)$$

Risultato Step 2-C: D [mm], $R = d_p$ [mm], $r = d_p/2$ [mm].

△! Attenzione

Il tranciamento è causato dalle τ ; lo strappo, invece, è causato dalle σ .

4.7 Step 2-D | Verifica a strappo — sezione B-B

L'area resistente a strappo (sezione netta del braccio perpendicolare a F):

$$A_{BB} = \underbrace{2}_{\text{bracci}} \times (D - d_p) \times \underbrace{\frac{s}{2}}_{\text{spessore braccio}} = (D - d_p) \cdot s \quad (19)$$

$$\boxed{\sigma_{BB} = \frac{F}{A_{BB}} = \frac{F}{(D - d_p) s} \leq \sigma_{a,f}} \quad (20)$$

Se la verifica **non** è soddisfatta:

$$s_{\min} = \frac{F}{(D - d_p) \sigma_{a,f}} \quad \text{oppure} \quad D_{\min} = \frac{F}{s \sigma_{a,f}} + d_p \quad (21)$$

4.8 Step 2-E | Verifica a taglio — sezione C-C'

La corda di ciascuna fascia laterale vale $CC' = \sqrt{R^2 - r^2}$. L'area resistente a taglio (due sezioni per braccio):

$$A_{CC'} = 2 CC' \cdot s = 2 \sqrt{R^2 - r^2} \cdot s \tag{22}$$

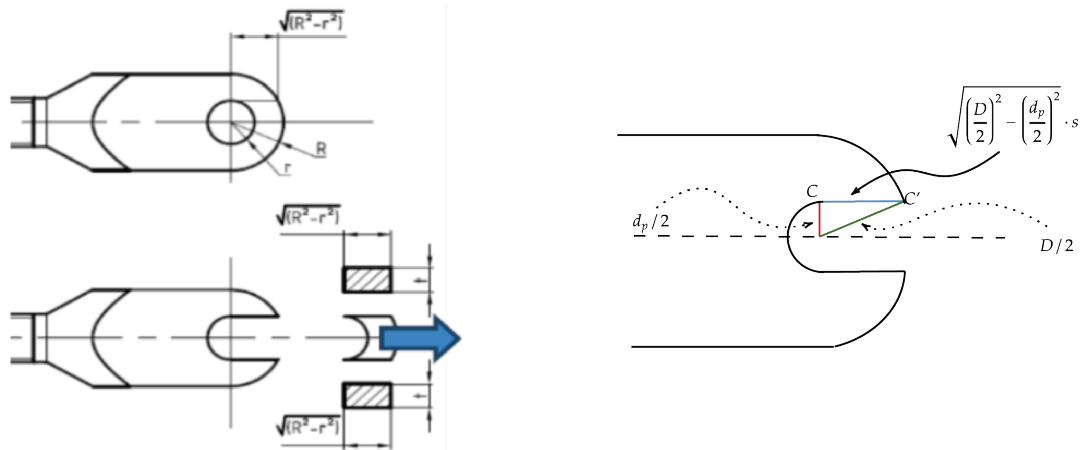


Figura 9: Verifica della forcella a tranciamento.

Per sezione rettangolare $\tau_{\max} = 1,5 \tau_{\text{med}}$:

$$\tau_{CC'} = \frac{1,5 F}{2 \sqrt{R^2 - r^2} \cdot s} \leq \tau_{a,f} \tag{23}$$

Risultato Step 2: d_p, s, D [mm] con $\sigma_{BB} \leq \sigma_{a,f} \checkmark$ $\tau_{CC'} \leq \tau_{a,f} \checkmark$

Step 3 | Dimensionamento dei ribattini asta–forcella

Ogni rivetto lavora a **taglio in doppia sezione** ($m_r = 2$) e genera una **pressione di ovalizzazione** sulla sottile parete dell'asta.

4.9 Step 3-A | Tensioni ammissibili

$$\sigma_{a,r} = \frac{R_{s,r}}{k} \quad \tau_{a,r} = 0,58 \sigma_{a,r} \quad (24)$$

$$\sigma_{a,a} = \frac{R_{s,a}}{k} \quad (\text{per l'ovalizzazione della parete asta}) \quad (25)$$

4.10 Step 3-B | Scelta del diametro del rivetto

Regola pratica: $d_r \approx 4t \div 6t$ dove t è lo spessore della parete dell'asta.

4.11 Step 3-C | Numero minimo di ribattini per taglio

$$n_{\text{tag}} \geq \left\lceil \frac{2F}{\pi d_r^2 \tau_{a,r}} \right\rceil \quad (26)$$

4.12 Step 3-D | Numero minimo di ribattini per ovalizzazione

$$n_{\text{oval}} \geq \left\lceil \frac{F}{2 d_r t \sigma_{a,a}} \right\rceil \quad (27)$$

4.13 Step 3-E | Adozione e verifiche finali

$$n = \max(n_{\text{tag}}, n_{\text{oval}}) \quad (28)$$

Verifiche finali con n adottato:

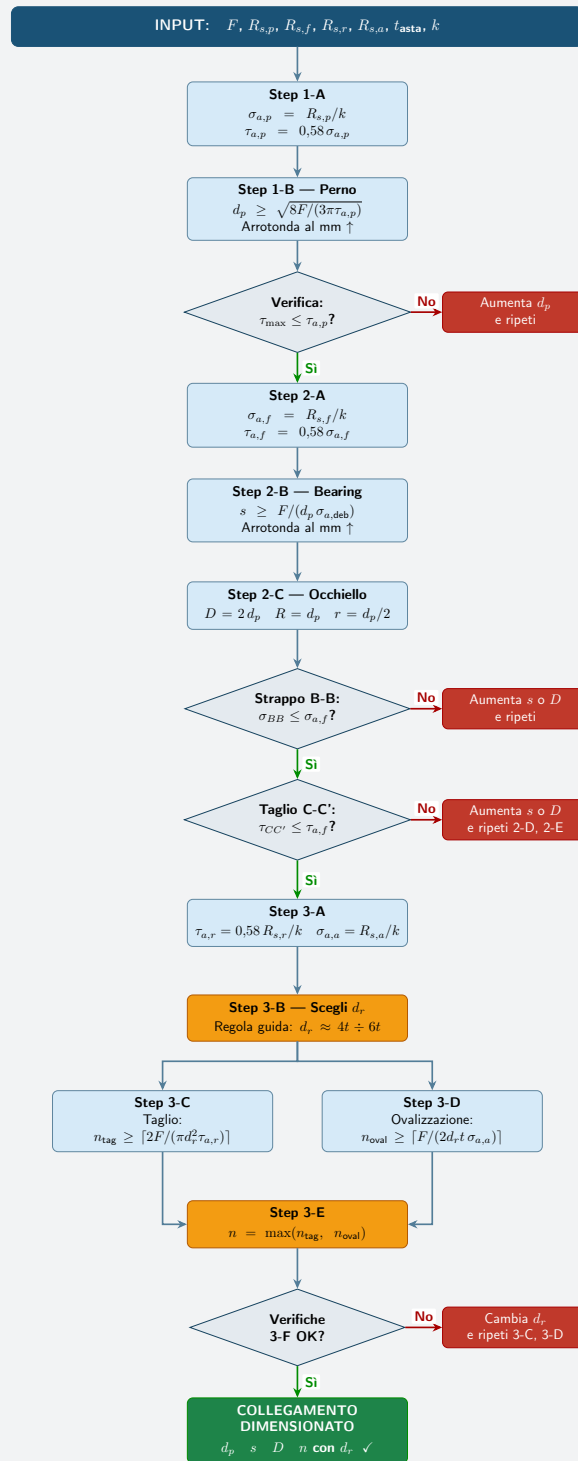
$$\tau = \frac{F}{n \cdot 2 \cdot \frac{\pi d_r^2}{4}} \leq \tau_{a,r} \quad p_{s,a} = \frac{F}{n \cdot 2 \cdot d_r \cdot t} \leq \sigma_{a,a} \quad (29)$$

Risultato Step 3: n ribattini con d_r [mm] con $\tau \leq \tau_{a,r} \checkmark$ $p_{s,a} \leq \sigma_{a,a} \checkmark$

5 Schema riassuntivo della Parte II

Step	Cosa si calcola	Formula chiave	Risultato
1-A	Tensioni amm. perno	$\sigma_{a,p} = R_{s,p}/k; \tau_{a,p} = 0,58 \sigma_{a,p}$	$\sigma_{a,p}, \tau_{a,p}$ [N/mm ²]
1-B	Diametro perno (taglio)	$d_p \geq \sqrt{\frac{8F}{3\pi\tau_{a,p}}}$	d_p [mm]
2-A	Tensioni amm. forcella	$\sigma_{a,f} = R_{s,f}/k; \tau_{a,f} = 0,58 \sigma_{a,f}$	$\sigma_{a,f}, \tau_{a,f}$ [N/mm ²]
2-B	Spessore braccio s (bearing)	$s \geq \frac{F}{d_p \sigma_{a,deb}}$	s [mm]
2-C	Diametro esterno occhiello	$D = 2 d_p \quad R = d_p \quad r = d_p/2$	D, R, r [mm]
2-D	Verifica strappo B-B	$\sigma_{BB} = \frac{F}{(D - d_p) s} \leq \sigma_{a,f}$	σ_{BB} [N/mm ²]
2-E	Verifica taglio C-C'	$\tau_{CC'} = \frac{1,5 F}{2\sqrt{R^2 - r^2} s} \leq \tau_{a,f}$	$\tau_{CC'}$ [N/mm ²]
3-A	Tensioni amm. ribattini/asta	$\tau_{a,r} = 0,58 R_{s,r}/k; \sigma_{a,a} = R_{s,a}/k$	$\tau_{a,r}, \sigma_{a,a}$ [N/mm ²]
3-B	Scelta d_r	$d_r \approx 4t \div 6t$ (prova iniziale)	d_r [mm]
3-C	n_{tag} da taglio	$n_{tag} \geq \left\lceil \frac{2F}{\pi d_r^2 \tau_{a,r}} \right\rceil$	n_{tag}
3-D	n_{oval} da ovalizzazione	$n_{oval} \geq \left\lceil \frac{F}{2 d_r t \sigma_{a,a}} \right\rceil$	n_{oval}
3-E	n adottato	$n = \max(n_{tag}, n_{oval})$	n

Diagramma di flusso — Progetto del collegamento (Steps 1–3)



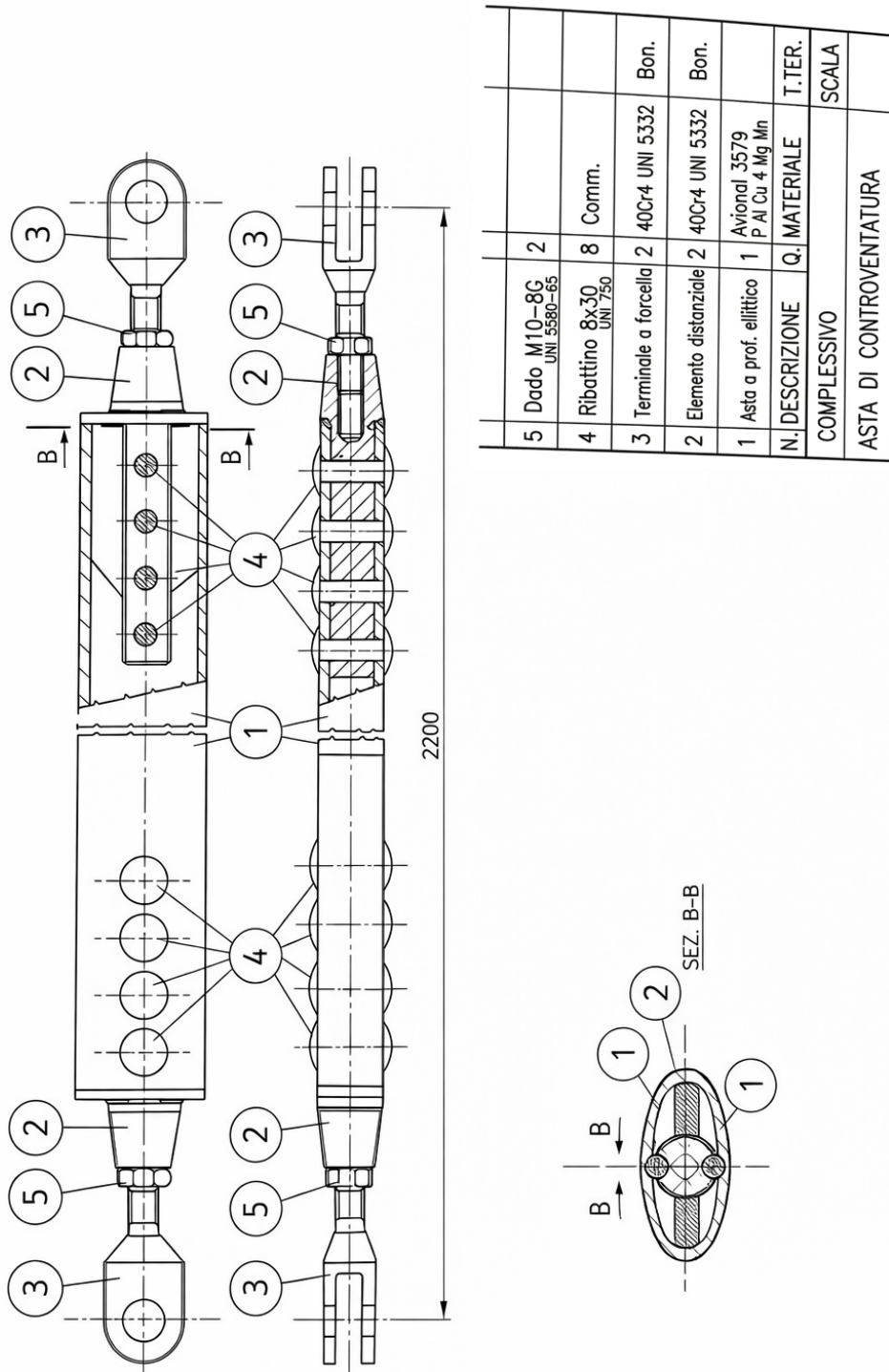


Figura 10: Asta di controventatura – complessivo