

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

Relazione per la prova finale
***Aerodinamica del rotore principale di un
elicottero convenzionale***

Tutor universitario: *Prof. Francesco Picano*

Laureando: *Cristiano Luzzetti*

Padova, 24/09/2024

➤ **Sistema di ali *finite* rotanti:**

- **Volo a flusso assiale:**
 - 1) *Hovering.*
 - 2) *Salita/discesa.*
- **Eventuale spinta *propulsiva*.**
- **Strutture *vorticose* elicoidali.**
- **Portanza più *intensa* alle estremità.**

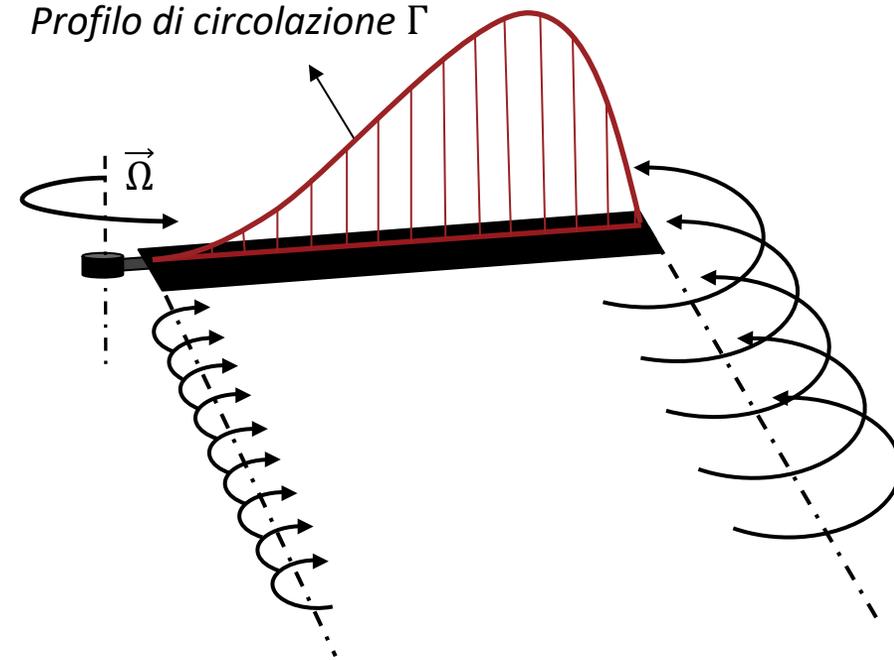
➔ **Spesa ingente di *potenza indotta*.**

➤ **Conferimento di una *geometria caratteristica* alle pale:**

- $\frac{\partial \Gamma}{\partial y}$ *più dolce* lungo la pala ➔ **Uniformazione del profilo di portanza.**

➔ **Riduzione media della *velocità indotta*.**

Profilo di circolazione Γ



➤ Svergolamento "Washout":

- Svergolamento lineare (idealmente iperbolico): $\theta(y) = \theta_0 - |\theta_{tw}| \frac{y}{R}$.
- Passo palare $\theta := \alpha_G - \alpha_L = 0$.

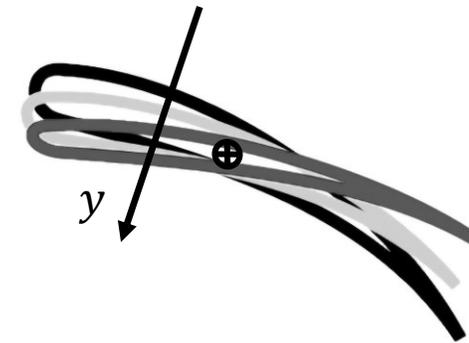
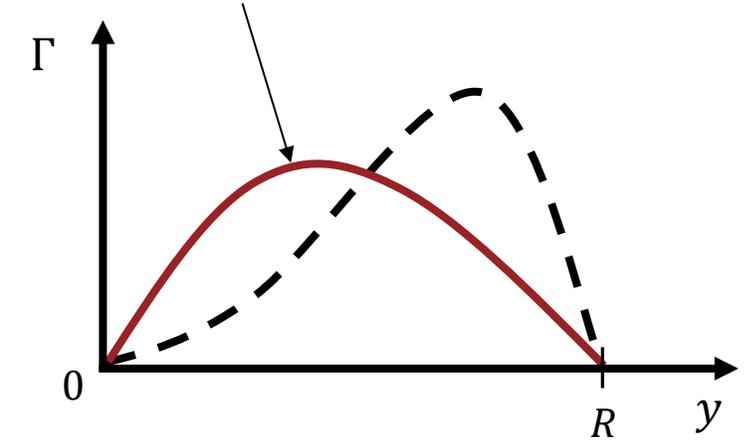
➤ Rastremazione:

- Idealmente distribuzione di corda iperbolica, più frequentemente:
 - 1) Rastremazione lineare.
 - 2) Pianta rettangolare e "taper" localizzato al tip.
- Rapporti di rastremazione moderati: $c \searrow \Rightarrow Re \searrow \Rightarrow C_D \nearrow$.

➤ Freccia palare all'estremità $\Lambda \neq 0$:

- $U_T \mapsto U_T \cos(\Lambda)$.

Svergolamento e rastremazione



➤ Componenti di velocità adimensionalizzate all'elemento di pala:

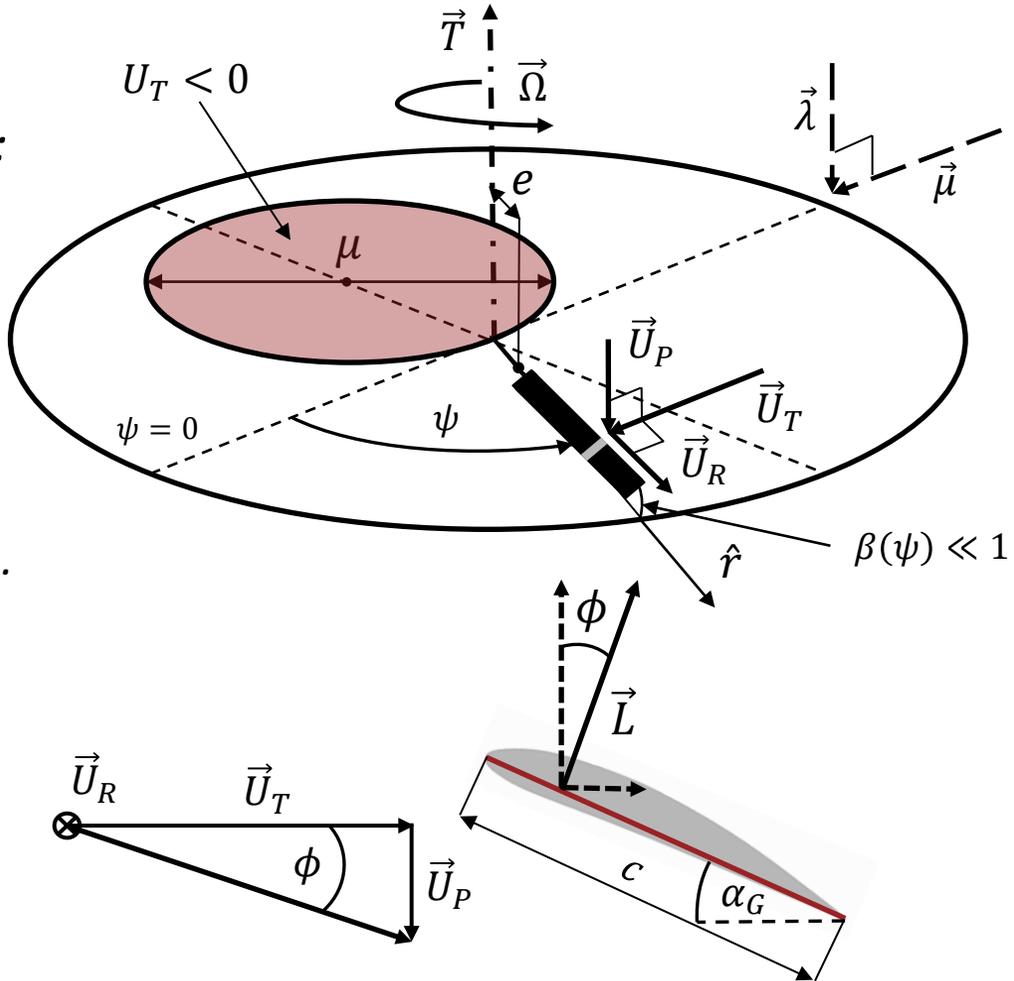
$$\frac{\vec{U}(r,\psi)}{\Omega R} = \begin{pmatrix} \frac{U_T}{\Omega R} \\ \frac{U_P}{\Omega R} \\ \frac{U_R}{\Omega R} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r + \mu \sin(\psi) \\ \lambda(r, \psi) + (r - e) \frac{\dot{\beta}}{\Omega} + \mu \beta(\psi) \cos(\psi) \\ \mu \cos(\psi) \end{pmatrix},$$

- $r := \frac{y}{R} \in [0; 1]$.
- λ : velocità ortogonale \rightarrow Velocità indotta.
- μ : componente di \vec{V}_∞ complanare. \rightarrow Componente di velocità asintotica \vec{V}_∞ .
- e : offset di cerniera.

➤ Dissimmetria del campo di portanza:

$$L \approx \frac{1}{2} \rho c \frac{c_L}{c'_L} \left(\theta - \underbrace{\frac{U_P}{U_T}}_{\phi} \right) \underbrace{\left[\Omega R (r + \mu \sin(\psi)) \right]^2}_{U_T} \quad [N/m].$$

➔ Con pala assimilabile a una "trave a sbalzo"



Momenti al **rollio**.

Sollecitazioni cicliche alla radice da L e D .

➤ **Articolazione del rotore** → 2 GdL ulteriori:

- Angolo di flappeggio: $\beta(\psi)$
- Angolo di arretramento palare: $\zeta(\psi)$

→ Genesi di componenti di velocità aggiuntive.

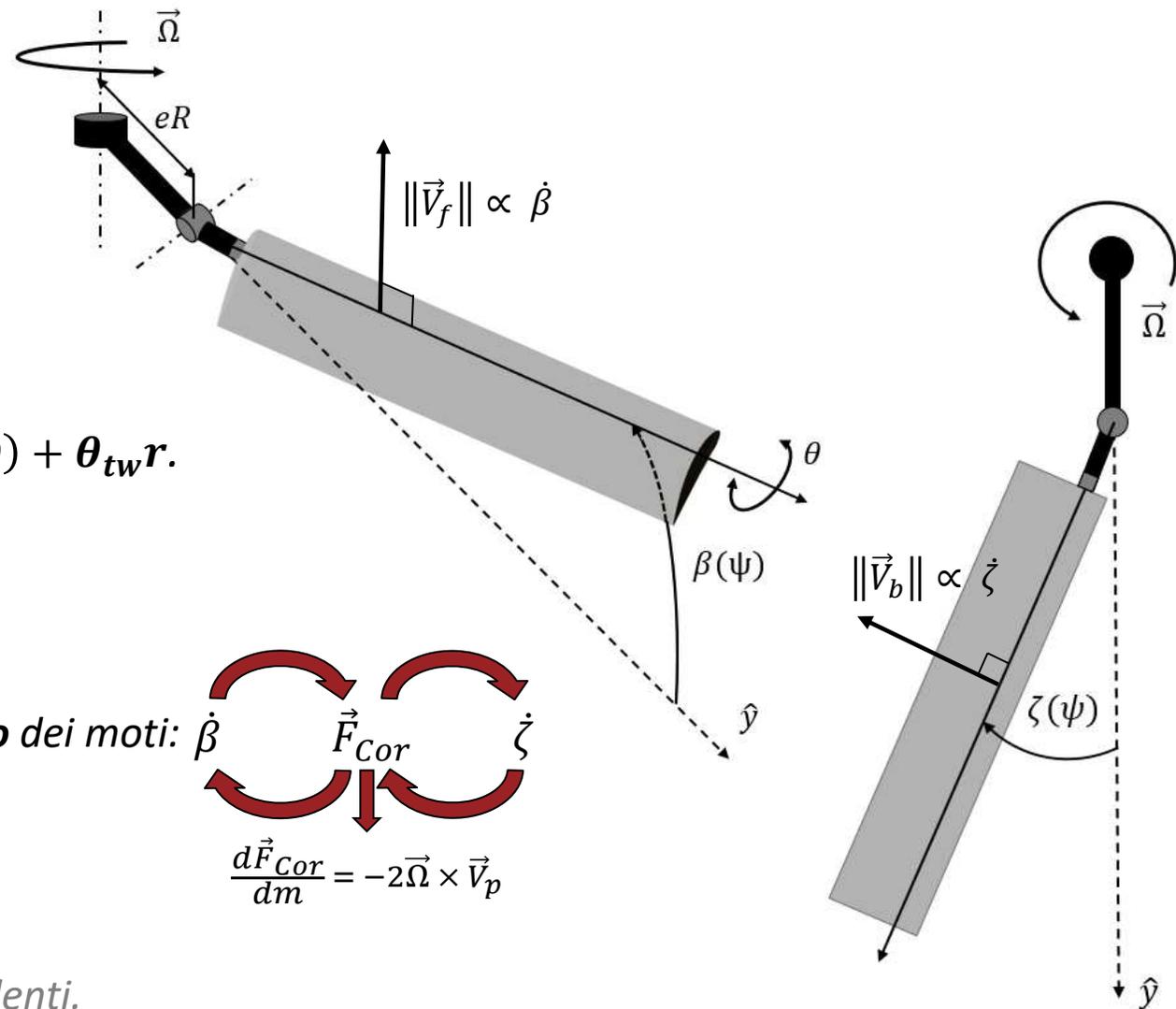
➤ 3° GdL: variazione del passo palare: $\theta(r, \psi) = \theta_0(\psi) + \theta_{tw}r$.

➤ Non-inerzialità dei sistemi rotanti a più GdL:

- Forze centrifughe.
- Forze di Coriolis → **Accoppiamento dinamico** dei moti: $\dot{\beta}$ \vec{F}_{Cor} $\dot{\zeta}$

➤ Assunzioni:

- $\zeta < \beta \ll 1$.
- λ costante e pari al suo valore medio.
- Cerniere di flappeggio e brandeggio supposte coincidenti.
- Pale assimilabili a corpi rigidi.



$$\frac{d\vec{F}_{Cor}}{dm} = -2\vec{\Omega} \times \vec{V}_p$$

➤ Equazioni della dinamica rotazionale in ψ rispetto alle cerniere ($x'(\psi) = \frac{\dot{x}(t)}{\Omega}$):

$$\begin{cases} \beta'' + v_\beta^2 \beta - 2\zeta' \beta = \frac{1}{I_\beta \Omega^2} \int_{eR}^R (L - \rho_B g)(y - eR) dy \\ \zeta'' + v_\zeta^2 \zeta + 2\beta' \beta = \frac{1}{I_\zeta \Omega^2} \int_{eR}^R (D + \phi L)(y - eR) dy \end{cases} \quad \text{con} \quad \begin{cases} I_\beta v_\beta^2 = I_\beta + eR \int_{eR}^R \rho_B (y - eR) dy \\ I_\zeta v_\zeta^2 = eR \int_{eR}^R \rho_B (y - eR) dy \end{cases}$$

Momenti di inerzia della pala rispetto agli assi delle cerniere

➤ Espansione in serie di Fourier arrestata alla **prima armonica** di:

- $\beta(\psi) = \beta_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} \beta_{nc} \cos(n\psi) + \beta_{ns} \sin(n\psi) \approx \beta_0 + \beta_{1c} \cos(\psi) + \beta_{1s} \sin(\psi).$

- $\theta(r, \psi) = \tilde{\theta}_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} \theta_{nc} \cos(n\psi) + \theta_{ns} \sin(n\psi) + \theta_{tw} r \approx \tilde{\theta}_0 + \theta_{1c} \cos(\psi) + \theta_{1s} \sin(\psi) - |\theta_{tw}| r.$

➤ Focus sul flapping:

- $e = 0 \Rightarrow v_\beta = 1.$
- $\zeta \equiv 0 \forall \psi.$

Passo Ciclico

➤ *Caso particolare:*

- *Flusso assiale ($\mu \rightarrow 0$).*
- *Variazioni cicliche del passo (2π -periodiche).*

➔
$$\beta'' + \frac{\gamma}{8}\beta' + \beta = h(\psi), \quad \text{con } \gamma := \frac{\rho C_L' c R^4}{I_\beta} \text{ numero di Lock.}$$

- 1) *Elevato **smorzamento** aerodinamico ($\gamma \in [8; 10]$).*
- 2) *Forzante h dipendente in ψ solo dal passo: $\omega = 1$.*
- 3) *Pulsazione naturale del sistema: $\omega_n = 1$.*

➔ Condizione di **risonanza con smorzamento**.

- *Lo smorzamento mantiene **stabile** l'escursione palare ➔ $\dot{\beta} > 0 \Rightarrow \text{AoA} \downarrow$.*
- *La forzante è in **quadratura in anticipo** rispetto alla risposta del sistema.*

$$\beta(\psi) \approx \beta_0 + \beta_{1c} \cos(\psi) + \beta_{1s} \sin(\psi)$$

➤ **Conicità: β_0**

- *Indice del rapporto* “ $\frac{\text{Momenti della portanza}}{\text{Momenti centrifughi}}$ ”.
- **Sempre presente.**

➤ **Angolo di flappeggio longitudinale: β_{1c}**

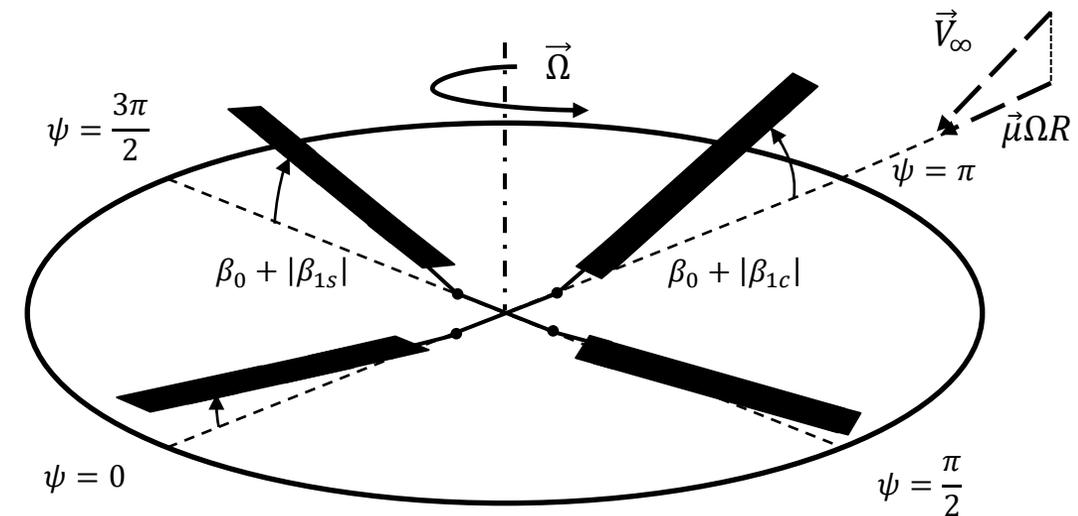
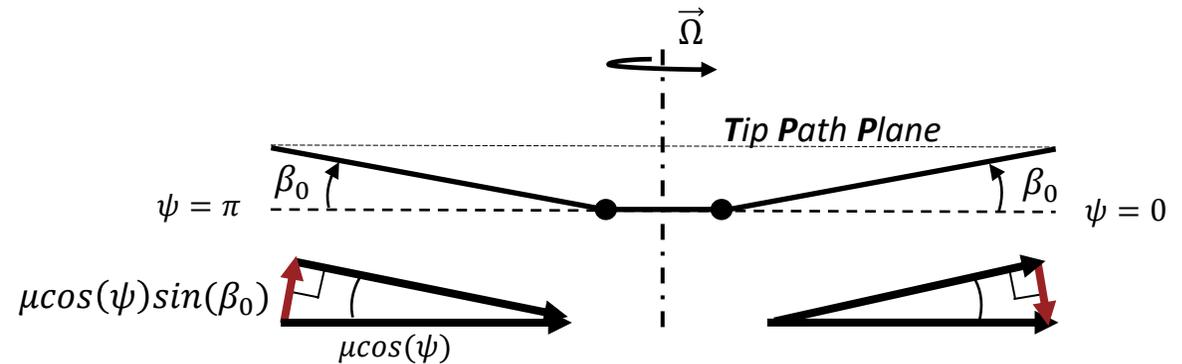
- *Pressione dinamica* $q = \frac{1}{2} \rho [\Omega R (r + \mu \sin(\psi))]^2$.

➔ **Flapback** (Inclinazione all'indietro del TPP).

➤ **Angolo di flappeggio laterale: β_{1s}**

- *Presenza di una conicità palare.*

➔ **Inflow roll** (Inclinazione a destra del TPP).



$$\theta(r, \psi) \approx \tilde{\theta}_0 + \theta_{1c} \cos(\psi) + \theta_{1s} \sin(\psi) - |\theta_{tw}|r$$

È possibile

- riorientare
- ridimensionare

 la spinta \vec{T} tramite variazioni di:

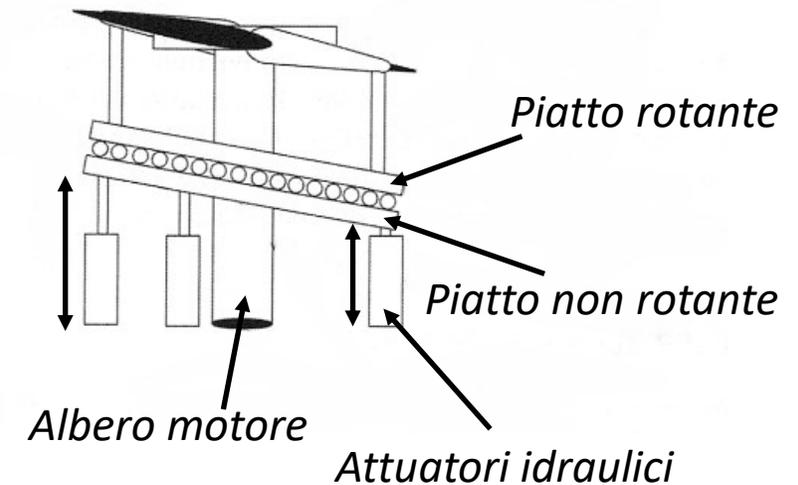
- *Passo collettivo: $\tilde{\theta}_0$*
 - *Variazione simultanea dell'angolo di calettamento delle pale.*

➔ *Azione diretta su $\|\vec{T}\|$.*

- *Passo ciclico longitudinale: θ_{1s}*
- *Passo ciclico laterale: θ_{1c}*
 - *Introduzione di una dipendenza del passo dalla collocazione azimutale della pala.*

➔ *Azione diretta su \hat{T} .*

Cinematismo a piatto oscillante



➤ ***Peculiarità evidenziate del rotore principale di un elicottero:***

- *Salita/discesa **assiale**.*
- *Sostentamento a **punto fisso**.*
- ***Articolazione** della pala tramite cerniere.*

➡ *Moto di **flappeggio**.*

- ***Controllo** della spinta agendo sulla dinamica della pala.*

➡ *Generazione di una forza propulsiva associata **esclusivamente** alla portanza delle pale.*

➡ *Maggiore **versatilità operativa** rispetto ai velivoli ad ala fissa.*